



Plano de Trabalho

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

Relatório Final



SUMÁRIO

<u>LISTA DE FIGURAS</u>	5
<u>LISTA DE TABELAS</u>	8
<u>1. INTRODUÇÃO</u>	10
1.1 O TEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA	10
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	12
<u>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	13
2.1 O SOFTWARE ME-PDG	13
2.2 INFORMAÇÕES SOBRE O PROJETO	15
2.3 INFORMAÇÕES GERAIS	15
2.4 PARÂMETROS DE ANÁLISE	16
2.5 DADOS DE ENTRADA	17
2.5.1 Tráfego	17
2.5.2 Clima	22
2.5.3 Estrutura	23
<u>3. CONTAGEM VOLUMÉTRICA DE TRÁFEGO</u>	25
3.1 RODOVIA: BR 101/RS	25
3.1.1 Método de pesquisa	27
3.1.2 Volume médio diário de veículos comerciais	28
3.1.3 Fator de Eixo	29
3.1.4 Fator de carga	30
3.1.5 Cálculo do númeroN	31
3.1.6 Taxa de crescimento do tráfego	32
3.1.7 RESULTADOS DO POSTO DE CONTAGEM A – CAPÃO DA CANOA/RS	32
3.1.8 Volume médio diário de veículos no posto A	34
3.1.9 Cálculo do número Npara o postoA	35
3.1.10 Cálculo do Número Npara oPosto B - TORRES	37
3.2 RODOVIA: BR-290/ RS	42
<u>4. RODOVIAS CONSIDERADAS NAS ANÁLISES E RESULTADOS DA PESAGEM NAS BALANÇAS DA BR-290/RS</u>	46
4.1 RODOVIA BR-290/ RS –FREEWAY	46
4.2 RODOVIA BR-101/RS – LOTES 1 E 3 DA DUPLICAÇÃO	47
4.3 MÉTODO DE PESQUISA	48
4.4 RESULTADOS DAS PESAGENS NAS BALANÇAS DA FREEWAY	48

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.

Relatório Final



5. ANÁLISE DOS EFEITOS DE SOBRECARGAS NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS TÍPICOS DA REGIÃO SUL DO PAÍS

5.1 RODOVIA: BR-290/RS	52
5.1.1 Informações Gerais	52
5.1.2 Dados de Tráfego	53
5.1.3 Dados de Clima	56
5.1.4 Dados da Estrutura do Pavimento	56
5.1.5 Análises Realizadas com o ME-PDG	60
5.2 BR-101/RS	68
5.2.1 Informações Gerais	68
5.2.2 Dados de Tráfego	68
5.2.3 Dados de Clima	69
5.2.4 Estruturas dos Pavimentos	69
5.2.5 Análises Realizadas com o ME-PDG	69

6. ANÁLISE DOS EFEITOS DE SOBRECARGAS NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS DA OBRA DE DUPLICAÇÃO DA BR-101/RS

6.1 INFORMAÇÕES GERAIS	82
6.2 ANÁLISES REALIZADAS COM O ME-PDG	85
6.3 COMENTÁRIOS A RESPEITO DO TRINCAMENTO DE CIMA PARA BAIXO	93

7. ESTUDO DOS EFEITOS DA COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

7.1 INFORMAÇÕES GERAIS	95
7.2 AS MISTURAS ASFÁLTICAS CONSIDERADAS	95

8. COMPARAÇÃO ENTRE OS DESEMPENHOS PREVISTOS COMO ME-PDG E RESULTADOS DE MONITORAMENTO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS EM RODOVIAS DA REGIÃO SUL

8.1 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DA BR-290/RS OBTIDOS POR VITORELLO (2008)	101
8.1.1 Histórico da Rodovia	101
8.1.2 Estrutura avaliada	105
8.1.3 LEVANTAMENTOS REALIZADOS	107
8.1.3.1 Irregularidade Longitudinal	107
8.1.3.2 Afundamento de trilha de roda	108
8.1.4 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE	109
8.1.4.1 Fatores determinantes na análise	109
8.1.5 Metodologia dos levantamentos	113
8.1.6 Análise estatística	113
8.1.7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	115



8.1.7.1	BANCO DE DADOS	115
8.1.8	Levantamentos Realizados	115
8.1.8.1	Irregularidade Longitudinal	115
8.1.8.2	Afundamento de trilha de roda	116
8.1.8.3	Idade dos Pavimentos e Histórico do Tráfego	117
8.1.9	Intervenções nos pavimentos	118
8.1.10	LINHAS DE TENDÊNCIAS DE DESEMPENHO DESENVOLVIDA PARA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL	118
8.1.11	LINHAS DE TENDÊNCIAS DE DESEMPENHO DESENVOLVIDAS PARA AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA	123
8.1.12	SÍNTESE DOS MODELOS OBTIDOS POR VITORELLO (2008)	129
8.2	COMPARAÇÕES ENTRE VALORES PREVISTOS DE IRI E DE ATR EMPREGANDO O ME-PDG E VALORES PREVISTOS COM AS LINHAS DE TENDÊNCIA OBTIDAS POR VITORELLO (2008)	130
8.2.1	Comparações entre valores previstos de Irregularidade Longitudinal	131
8.2.2	Comparações entre valores previstos de Afundamentos nas Trilhas de Roda	133
8.2.3	Conclusões da pesquisa realizada por Vitorello (2008)	134
9	CONCLUSÕES	136
9.1	RELATÓRIO I	136
9.2	RELATÓRIO II	136
9.2.1	Quanto à ocorrência de sobrecarga na Rodovia Br-290/RS (Freeway)	136
9.2.2	Quanto aos efeitos da ocorrência de sobrecarga e do aumento da pressão de inflação dos pneus no desempenho do pavimento da BR-290/RS	137
9.2.3	Quanto aos efeitos da taxa de crescimento do tráfego e do aumento da pressão de inflação dos pneus no desempenho do pavimento da BR-101/RS	138
9.3	RELATÓRIO III	139
9.3.1	Quanto à ocorrência de sobrecarga nas Rodovias BR-290/RS e BR-101/RS	139
9.3.2	Quanto aos efeitos da ocorrência de sobrecarga no desempenho do pavimento da BR-101/RS	139
9.3.3	Quanto aos efeitos da composição das misturas asfálticas no desempenho de pavimentos	140
9.4	RELATÓRIO IV	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		143



LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma geral de projeto para pavimentos	14
Figura 2: Parâmetros de análise de pavimentos flexíveis	16
Figura 3: Tela <i>Inputs</i> com dados de Tráfego, Clima e Estrutura do Pavimento	17
Figura 4: Fatores de ajustes mensais	18
Figura 5: Distribuição de classes de veículos	19
Figura 6: Distribuição horária do tráfego de caminhões	20
Figura 7: Fatores de distribuição de cargas de eixo	21
Figura 8: Ilustração de possíveis sistemas de camadas para pavimentos	24
FIGURA 9: Mapa de Situação	25
FIGURA 10: Mapa de Localização	26
Figura 11: Vista geral do posto de contagem A em Capão da Canoa.....	32
Figura 12: Vista geral do posto de contagem B em Torres	37
Figura 13: Mapa de Situação	42
FIGURA 14: Mapa de Situação da Freeway	46
FIGURA 15: Mapa de Situação dos Lotes 1 e 3 da Obra de Modernização e Ampliação de Capacidade (Duplicação) da BR-101/RS	47
Figura 16: Diagrama de setores de ocorrência de excesso de carga quanto ao PBT	50
Figura 17: Diagrama de setores de ocorrência de excesso nos eixos simples	51
Figura 18: Diagrama de setores de ocorrência de excesso nos eixos tandem duplos	51
Figura 19: Diagrama de setores de ocorrência de excesso nos eixos tandem triplos	51
FIGURA 20: Mapa de Situação da Freeway	52
Figura 21: Estrutura do pavimento da BR-290/RS	57
Figura 22: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando sem sobrecarga.....	62
Figura 23: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando com sobrecarga.....	63
Figura 24: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR) em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando sem sobrecarga	63
Figura 25: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR) em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando com sobrecarga	64
Figura 26: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando sem sobrecarga.....	65
Figura 27: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando com sobrecarga.....	66
Figura 28: Evolução do Trincamento por Fadiga em função da sobrecarga, com pressão de inflação dos pneus igual a 120 psi.....	67
Figura 29: Evolução do Trincamento por Fadiga em função da sobrecarga, com pressão de inflação dos pneus igual a 150 psi.....	67
Figura 30: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) no pavimento do Lote 1 ...	71
Figura 31: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 1	71
Figura 32: Evolução do Trincamento por Fadiga (TR em %) do pavimento do Lote 1	72



Figura 33: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (TDC em %) do pavimento do Lote 1	72
Figura 34: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) no pavimento do Lote 3 ...	73
Figura 35: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 3.....	73
Figura 36: Evolução do Trincamento por Fadiga (TR em %) do pavimento do Lote 3	74
Figura 37: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (TDC em %) do pavimento do Lote 3	74
Figura 38: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) no pavimento do Lote 1em função da pressão de inflação nos pneus	77
Figura 39: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 1em função da pressão de inflação nos pneus.....	77
Figura 40: Evolução do Trincamento por Fadiga (%) no pavimento do Lote 1 em função da pressão de inflação nos pneus	78
Figura 41: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo no pavimento do Lote 1em função da pressão de inflação nos pneus	78
Figura 42: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI em m/km) no pavimento do Lote 3 em função da pressão de inflação nos pneus	79
Figura 43: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 3em função da pressão de inflação nos pneus.....	79
Figura 44: Evolução do Trincamento por Fadiga (%) no pavimento do Lote 3em função da pressão de inflação nos pneus	80
Figura 45: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (%) no pavimento do Lote 3em função da pressão de inflação nos pneus	80
Figura 46: Evolução da Irregularidade (IRI em m/km) no pavimento do Lote 1	87
Figura 47: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 1.....	87
Figura 48: Evolução do Trincamento por Fadiga (TR em %) do pavimento do Lote 1	88
Figura 49: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (TDC em ft/mi) na superfície do pavimento do Lote 1	88
Figura 50: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI em m/km) no pavimento do Lote 3	89
Figura 51: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 3.....	89
Figura 52: Evolução do Trincamento por Fadiga (TR em %) do pavimento do Lote 3	90
Figura 53: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (TDC em ft/mi) na superfície do pavimento do Lote 3	90
Figura 54: Trincamentos de cima para baixo em amostras extraídas na BR-116/RS, trecho Camaquã-Pelotas, Observa-se segregação de agregados na mistura	94
Figura 55: Evolução da Irregularidade (IRI em m/km) no pavimento analisado, em função da composição das misturas asfálticas	97
Figura 56: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento analisado, em função da composição das misturas asfálticas.....	97
Figura 57: Evolução do Trincamento por Fadiga (TR em %) no pavimento analisado, em função da composição das misturas asfálticas	98



Figura 58: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (TDC em ft/mi) na superfície do pavimento, em função da composição das misturas asfálticas	98
Figura 59: Configuração da pista da rodovia BR-290/RS antes e após a obra de ampliação que a Concessionária está realizando	103
Figura 60: Seção transversal da pista apresentando a configuração da pista antes e após a ampliação	103
Figura 61: Esquema dos trechos em que as obras de ampliação da rodovia já estão concluídas	104
Figura 62: Estrutura típica considerada nesta pesquisa.....	106
Figura 63: Perfilômetro a laser em levantamento ocorrido na rodovia BR-290/RS	108
Figura 64: Exemplo de modelos obtidos na proposta de tendências de desempenho de pavimentos considerando as intervenções com remendos profundos realizadas	111
Figura 65: Representação esquemática dos 3 tipos de remendos profundos usualmente executados na rodovia BR-290/RS.....	112
Figura 66: Dados de Irregularidade Longitudinal considerados na pesquisa	116
Figura 67: Dados de afundamento de trilha de roda considerados na pesquisa...	117
Figura 68: Evolução da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, considerando-se todos os dados	119
Figura 69: Evolução da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios	120
Figura 70: Evolução da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios e considerando as intervenções.....	121
Figura 71: Scatterplot para a linha de tendência da Irregularidade Longitudinal...	122
Figura 72: Evolução da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios, considerando as intervenções nos pavimentos e excluindo levantamento ocorrido em 2007	123
Figura 73: Evolução do afundamento de trilha de roda com o número de solicitações, considerando-se todos os dados	124
Figura 74: Evolução do afundamento de trilha de roda com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios.....	125
Figura 75: Evolução do ATR com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios pavimentos e excluindo levantamento ocorrido em 2007	126
Figura 76: Scatterplot para a linha de tendência do afundamento de trilha de roda	127
Figura 77: Evolução do ATR com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios, considerando as intervenções e excluindo levantamento ocorrido em 2007	128
Figura 78: Evoluções da Irregularidade Longitudinal (escala IRI) previstas pelos modelos do ME-PDG (sem sobrecarga e com sobrecarga) e de Vitorello (2008)..	132
Figura 79: Evoluções dos Afundamentos nas Trilhas de Roda previstas pelos modelos do ME-PDG (sem sobrecarga e com sobrecarga) e de Vitorello (2008)..	133



LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fatores empregados para extrapolar o tráfego comercial de 12 a 24 horas	28
Tabela 2. Efeito da sazonalidade no tráfego de veículos da BR-101/RS (ano de 2001)	29
Tabela 3. Fatores de Equivalência de Carga pelo USACE	30
Tabela 4. Fatores de Equivalência de Carga pela AASHTO	30
Tabela 5. Fatores de Equivalência de Carga adotados na pesquisa	31
Tabela 6. Cálculo do Número N considerando t = 2% a.a.	36
Tabela 7. Cálculo do Número N considerando t = 3% a.a.	36
Tabela 8. Cálculo do Número N considerando t = 5% a.a.	37
Tabela 9. Cálculo do Número N considerando t = 2% a.a.	41
Tabela 10. Cálculo do Número N considerando t = 3% a.a.	41
Tabela 11. Cálculo do Número N considerando t = 5% a.a.	42
Tabela 12. Percentuais de veículos comerciais de acordo com as classes empregadas pela CONCEPA e pelo ME-PDG	43
Tabela 13. Distribuição horária do tráfego comercial.....	44
Tabela 14. Fatores Mensais de Ajuste de Tráfego	45
Tabela 15. Síntese do registro de excesso de carga na Balança Sul	49
Tabela 16. Síntese do registro de excesso de carga na Balança Norte	49
Tabela 17. Percentuais de veículos comerciais de acordo com as classes empregadas pela CONCEPA e pelo ME-PDG	53
Tabela 18. Distribuição horária do tráfego comercial.....	54
Tabela 19. Fatores Mensais de Ajuste de Tráfego	54
Tabela 20. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento da Freeway em função da ocorrência de sobrecarga (pressão nos pneus = 120 psi).....	61
Tabela 21. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento da Freeway em função da ocorrência de sobrecara (pressão nos pneus 150 psi).....	61
Tabela 22. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 1 em função da taxa de crescimento anual do tráfego comercial	70
Tabela 23. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 3 em função da taxa de crescimento anual do tráfego comercial	70
Tabela 24. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 1em função da pressão de inflação nos pneus	76
Tabela 25. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 3em função da pressão de inflação nos pneus	76
Tabela 26. Percentuais de veículos comerciais de acordo com as classes empregadas pela CONCEPA e pelo ME-PDG	83
Tabela 27. Distribuição horária do tráfego comercial.....	83
Tabela 28. Fatores Mensais de Ajuste de Tráfego	84
Tabela 29. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 1 considerando tráfegos sem e com sobrecarga	86
Tabela 30. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 3 considerando tráfegos sem e com sobrecarga	86
Tabela 31. Composição das Misturas Asfálticas Consideradas	96
Tabela 32: Segmentos da rodovia a serem considerados neste estudo	105



Tabela 33: Período da construção da estrutura de pavimento nos segmentos do trecho em análise com a definição do número equivalente de operações	117
Tabela 34: Resultados estatísticos da relação da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, considerando-se todos os dados	119
Tabela 35: Resultados estatísticos da relação da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios.....	120
Tabela 36: Resultados estatísticos da relação da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios e considerando as intervenções nos pavimentos	121
Tabela 37: Resultados estatísticos da relação da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios, considerando as intervenções nos pavimentos e excluindo levantamento ocorrido em 2007	123
Tabela 38: Resultados estatísticos da relação do afundamento de trilha de roda com o número de solicitações, considerando-se todos os dados	124
Tabela 39: Resultados estatísticos da relação do afundamento de trilha de roda com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios.....	125
Tabela 40: Resultados estatísticos da relação do ATR com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios e o levantamento ocorrido em 2007	126
Tabela 41: Resultados estatísticos da relação do ATR com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios, considerando as intervenções nos pavimentos e excluindo levantamento ocorrido em 2007.....	128
Tabela 42: Resumo dos levantamentos considerados nesta pesquisa	129
Tabela 43: Resumo dos melhores ajustes de linhas de tendências de desempenho propostas por Vitorello (2008)	130



1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o tráfego rodoviário tem crescido de forma significativa, acompanhando o desenvolvimento econômico do País, com reflexos na Região Sul. Para atender a demanda por condições satisfatórias ao transporte de cargas e passageiros, o Governo Federal vem realizando importantes obras rodoviárias, como as duplicações das BR-101 e BR-392 e a construção da BR-448/RS (Rodovia do Parque). Inserem-se nesse esforço as obras de ampliação da capacidade da BR-290/RS, trecho Osório-Porto Alegre (*Freeway*) e as melhorias realizadas e a serem implantadas nos próximos anos na BR-116.

Contudo, não basta construir novos pavimentos. Torna-se cada vez mais necessário prever seu desempenho face às solicitações, que têm aumentado a taxas muito elevadas, em função do maior número de caminhões pesados, com número de eixos muito superior ao existente há apenas uma década.

1.1 O TEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

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 ao longo do Período de Projeto.

Além dos efeitos do novo espectro de cargas (incluindo os excessos) na vida de fadiga dos pavimentos asfálticos (prática que se realiza desde o final dos anos 1970, através de Procedimentos do DNIT) é de fundamental importância quantificar seus efeitos nos parâmetros de desempenho dos pavimentos, quais sejam Irregularidade Longitudinal, Afundamentos nas Trilhas de Rodas, Trincamentos por Fadiga e por Reflexão, com origem na fibra inferior dos revestimentos asfálticos (*bottom-up*) e Superficiais com origem na superfície do pavimento (*top-down cracking*).

Por outra parte, é importante analisar quais os efeitos de mudanças na granulometria dos agregados e no tipo de ligante asfáltico na evolução dos mesmos parâmetros; mais uma potencialidade do software ME-PDG. Uma análise de sensibilidade permitirá evidenciar a necessidade de alterar-se a distribuição



granulométrica dos agregados de misturas asfálticas, ou de adotar-se um tipo de ligante diferente, que proporcionem um melhor desempenho do pavimento, face à agressividade do tráfego e às interferências climáticas

A ferramenta básica para as análises de desempenho de pavimentos flexíveis, a serem desenvolvidas nesta pesquisa, é o Guia da AASHTO 2004, desenvolvido pelo Departamento de Transportes dos Estados Unidos no projeto NCHRP 1-37A. Este guia é hoje um dos mais modernos métodos para dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos rígidos e flexíveis. Prevê-se o uso do software ME-PDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*), cujos modelos foram desenvolvidos por este guia de dimensionamento, e que pode ser considerado como uma das ferramentas mais completas para previsão de desempenho de pavimentos, na atualidade.

Os sistemas de classificação utilizados pelo *software* para identificação do tipo de tráfego são do FHWA (*Federal Highway Administration*) e do LTPP (*Long Term Pavement Performance*). Os valores da Média Diária Anual de Tráfego Comercial (AADTT - *Annual Average Daily Truck Traffic*) serão determinados a partir de estudos de tráfego.

O princípio de funcionamento do *software* ME-PDG é baseado na análise de dados dos materiais componentes das camadas do pavimento ao longo da vida de projeto utilizando métodos mecanísticos. Em cada iteração, as propriedades dos materiais são calculadas e os danos induzidos pelo tráfego correspondente em cada diferencial de tempo, acumulados. No caso específico de uma análise de recapeamento, o módulo das camadas estabilizadas é reduzido ao longo do tempo em função do grau de trincamento modelado. As camadas asfálticas têm seus parâmetros alterados para simular o envelhecimento do ligante e a reflexão de trincas.

A deformação permanente é calculada em cada camada separadamente e integrada para determinar o afundamento de trilha de roda observado. A irregularidade também é analisada para estimar seu crescimento em cada instante da vida de projeto.



Estas análises permitem ao projetista a determinação do comportamento do pavimento ao longo da vida de projeto, facilitando, assim, a determinação do momento no qual o pavimento perderá ou sua capacidade estrutural, ou funcional, necessitando intervenções. Com um ciclo de análises são definidas as estratégias necessárias para manter os pavimentos dentro de condições especificadas.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Conforme o Plano de trabalho, os principais objetivos da pesquisa foram:

- Conhecer a constituição atual da frota que trafega em rodovias federais do RS e SC, identificando os tipos de veículos comerciais predominantes e classificando-os de acordo com os sistemas atual do DNIT e da AASHTO (*American Association of State Highways and Transportation Officials*)
- Atualizar o conhecimento sobre o espectro de cargas que solicitam os pavimentos dessas rodovias, quantificando também o excesso de carga.
- Avaliar os efeitos de novos tipos de veículos comerciais e de excessos de cargas no desempenho dos pavimentos em foco, empregando modelos de previsão de desempenho do software ME-PDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*), desenvolvido pela AASHTO e já em emprego no Brasil.
- Realizar um estudo de sensibilidade, com emprego do ME-PDG, para avaliar os efeitos de mudanças na granulometria dos agregados e no tipo de ligante (convencionais e modificados) no desempenho de pavimentos.
- Comparar os desempenhos previstos com a aplicação do ME-PDG com resultados de monitoramento de trechos experimentais em rodovias da Região Sul.
- Utilizar este projeto para fortalecer a parceria entre ANTT, CONCEPA e a empresa S&T Engenharia, Arquitetura e Meio Ambiente, utilizando verbas de RDT (Recursos de Desenvolvimento Tecnológico).



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se neste capítulo uma Revisão Bibliográfica sobre o software ME-PDG, ferramenta que foi empregada para prever o desempenho de pavimentos das rodovias BR-290/RS (trecho Osório-Porto Alegre) e BR-101/RS (trecho Torres-Osório), a partir dos espectros de carga obtidos no Estudo de Tráfego.

2.1 O SOFTWARE ME-PDG

O *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*, da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), também conhecido como M-E PDG, foi recentemente disponibilizado nos Estados Unidos. O desenvolvimento de tal procedimento foi conduzido pela *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) com o patrocínio da AASHTO. O M-E PDG e seu respectivo software permitem a análise e previsão do desempenho de diferentes tipos de pavimentos flexíveis e rígidos.

O ME-PDG utiliza 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. Previsões de desempenho são feitas a partir de tensões e qualidade de rolamento.

Os principais passos utilizados no M-E PDG para o projeto de um pavimento são:

- a) adotar uma estrutura de projeto para as condições específicas do local. Definir suporte do subleito e outras propriedades dos materiais de pavimentação, carregamento do tráfego, tipo de pavimento, projeto do pavimento e características de construção;
- b) estabelecer critérios aceitáveis de desempenho para o pavimento no fim do período de projeto;
- c) selecionar o nível desejado de confiabilidade para cada um dos indicadores de desempenho;
- d) obter valores mensais de entrada de tráfego, variações sazonais dos materiais e clima, necessários na avaliação do projeto;

- e) calcular respostas estruturais (degradações superficiais e deformações) usando a teoria elástica de multicamadas ou elementos finitos (baseado nos modelos de resposta de pavimentos), para cada tipo de eixo e carga de eixo e, para cada cálculo de dano, durante o período de projeto;
- f) calcular degradações acumuladas e/ou danos no final de cada período de análise para todo o período de projeto;
- g) prever as principais degradações (afundamento de trilha de roda, trincas por fadiga e trincas térmicas) ao longo do período de projeto;
- h) prever irregularidades (IRI), como função do IRI inicial de projeto, degradações acumuladas no tempo e fatores locais, no final de cada incremento de análise;

A Figura 1 apresenta o esquema de projeto de um pavimento flexível.

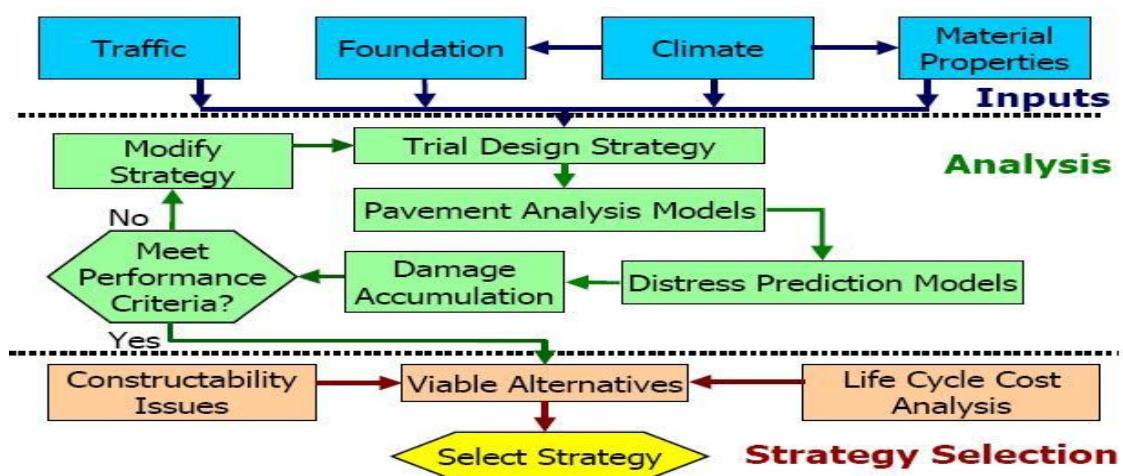


Figura 1: Fluxograma geral de projeto para pavimentos

Os dados de entrada para o projeto de pavimentos flexíveis são caracterizados como:

- a) informações gerais (período de projeto e tipo de pavimento);
- b) identificação do local e projeto;
- c) parâmetros de análise;
- d) tráfego;
- e) clima;
- f) drenagem e propriedades da superfície;



g) estrutura do pavimento.

A seguir, são descritos os dados referentes à utilização do software M-E PDG.

2.2 INFORMAÇÕES SOBRE O PROJETO

Nesse item são apresentados os dados necessários relativos às informações do projeto. A tela *Site/Project Identification* do software M-E PDG é apenas para identificação do projeto, não tendo influência na análise que foi trabalhada, por isso não foi abordada.

2.3 INFORMAÇÕES GERAIS

A seguir são apresentados os dados da tela *General Information* do software M-E PDG

- a) período de projeto (*Design Life*) é a expectativa do período de projeto do pavimento, ou seja, o tempo considerado entre a sua construção e a principal reabilitação;
- b) mês de construção base/subleito (*Base/Subgrade Construction Month*), é o mês aproximado no qual a base e o subleito são preparados para a construção. Se esse dado é desconhecido, o projetista deverá utilizar o mês no qual a maioria das construções de pavimento ocorre na região;
- c) mês de construção do pavimento (*Pavement Construction Month*) é o mês no qual o pavimento será construído. Se esse dado é desconhecido, utilizar o mês no qual a maioria das construções de pavimento ocorre na região;
- d) mês de abertura do tráfego (*Traffic Open Month*) é o mês no qual o pavimento será aberto ao tráfego. Este valor define as condições climáticas quando da abertura do tráfego, que afetam a temperatura e gradientes de umidade, assim como o valor dos módulos das camadas e subleito;
- e) tipo de projeto (*Type of Design*): determina o método de avaliação do projeto e os modelos de desempenho aplicáveis.

2.4 PARÂMETROS DE ANÁLISE

A Figura 2 mostra a tela *Analysis Parameters* do software M-E PDG.

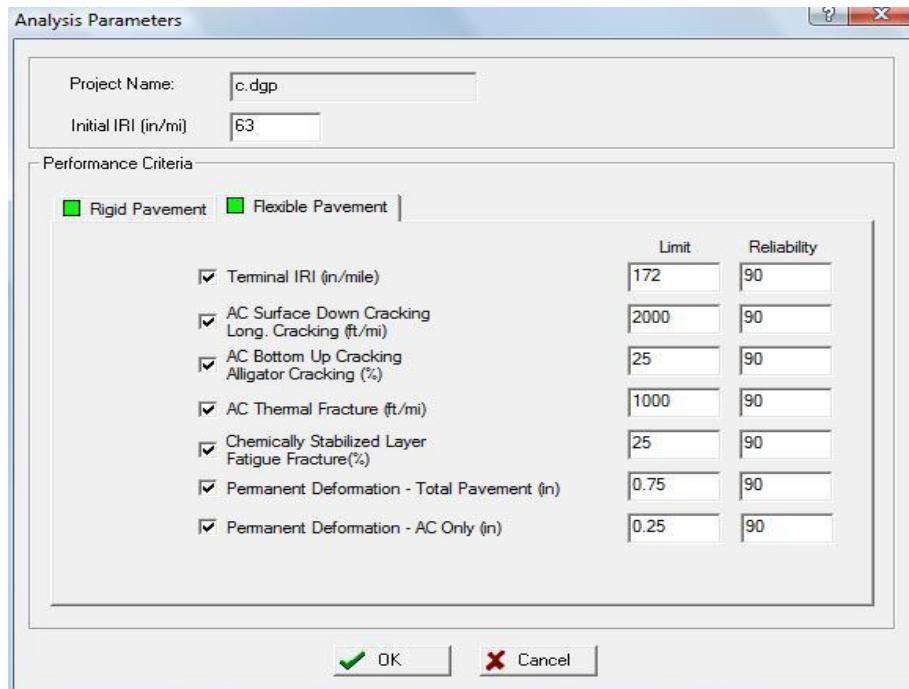


Figura 2: Parâmetros de análise de pavimentos flexíveis

Irregularidade Longitudinal Inicial (*Initial IRI*)

De acordo com National Cooperative Highway Research Program (2004), o IRI (*International Roughness Index*) inicial define a Irregularidade do pavimento construído. Este parâmetro tem um significativo impacto sobre a qualidade de rolamento do pavimento.

Critérios de Desempenho (*Performance Criteria*)

O projetista deve selecionar alguns ou todos os indicadores de desempenho e estabelecer critérios para avaliar o projeto e fazer as devidas modificações. Os indicadores de desempenho a serem considerados nas análises realizadas neste capítulo são:

- a) trincamento de cima para baixo(*surface-down cracking*);
- b) trincamento por fadiga de baixo para cima(*bottom-up fatigue cracking*);

c) deformação permanente, incluindo a Irregularidade Longitudinal (IRI) e os Afundamentos nas Trilhas de Roda (*total permanent deformation*).

2.5 DADOS DE ENTRADA

A seguir serão apresentados os dados de entrada (*Inputs*). A Figura 3 apresenta a tela relacionada a estes dados.

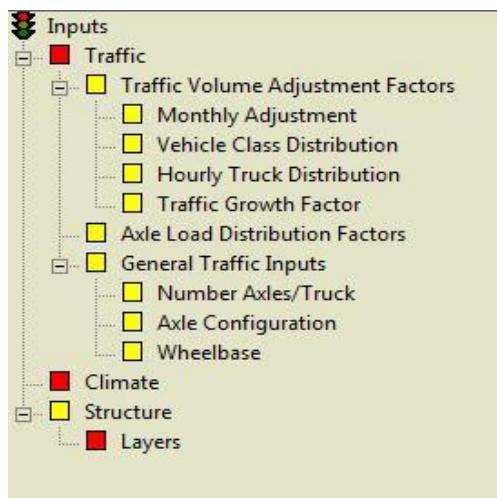


Figura 3: Tela *Inputs* com dados de Tráfego, Clima e Estrutura do Pavimentos

2.5.1 Tráfego

O Tráfego é um dos principais elementos requeridos para a análise e projeto de estruturas de pavimentos. A opção padrão de dados de tráfego para o projeto de pavimentos flexíveis é especificar o atual espectro de carga atuante na estrutura para os eixos simples, tandem, tandem triplo e quádruplo.

A segunda opção de dados de tráfego é a configuração de eixo especial. Esta opção permite a análise de desempenho do pavimento para sistemas de veículos:

- a) especiais;
- b) pesados;
- c) não convencionais.



Fatores de Ajuste do Volume do Tráfego (Traffic Volume Adjustment Factors)

Os fatores de ajuste do volume do tráfego são caracterizados como:

- a) fatores de ajuste mensal;
- b) distribuição de classe de veículo;
- c) distribuição horária do tráfego de caminhões;
- d) fatores de crescimento do tráfego.

Estes fatores são discutidos a seguir.

Fatores de Ajuste Mensal (Monthly Adjustment Factors)

Os fatores de distribuição mensal de caminhões são usados para determinar a variação mensal no tráfego de caminhões dentro do ano base. Esses valores são simplesmente o coeficiente do tráfego de caminhões para o *Average Annual Daily Truck Traffic* (AADTT, média anual do tráfego diário de caminhões). A média dos coeficientes para os doze meses do ano base tem que ser igual a 1.0. Se nenhuma informação está disponível, assume-se 1.0 para todos os meses e todas as classes de veículos. A Figura 4 apresenta a tela Fatores de Ajustes Mensais.

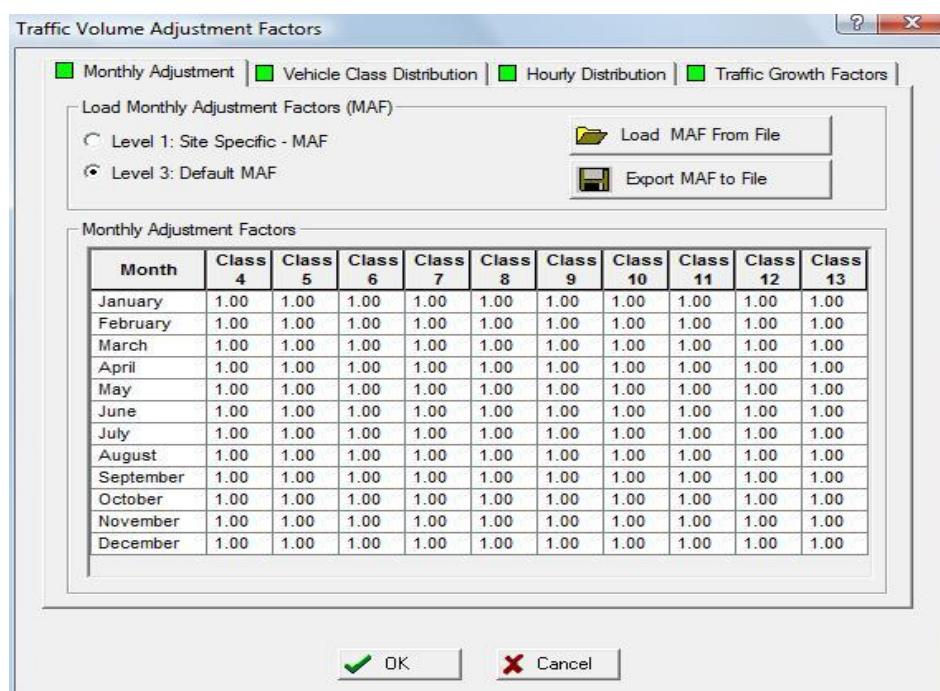


Figura 4: Fatores de ajustes mensais

Distribuição de Classe de Veículo (Vehicle Class Distribution)

De acordo com National Cooperative Highway Research Program (2004) a distribuição padrão de classes de veículos representa a porcentagem de cada classe de caminhão (classe 4 até a 13) dentro da AADTT para o ano base. A soma dos percentuais tem que ser obrigatoriamente 100. A Figura 5 mostra a tela Distribuição de Classes de Veículos.

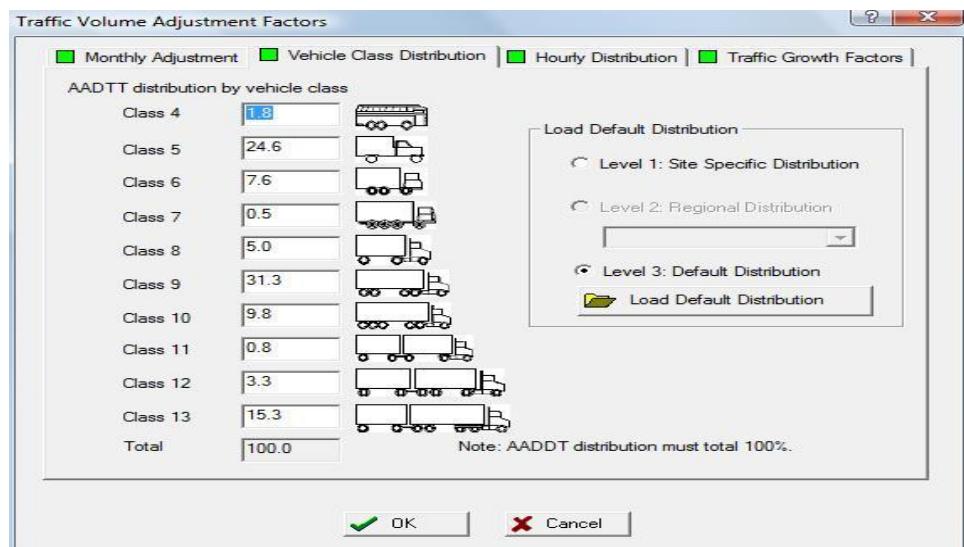


Figura 5: Distribuição de classes de veículos

Distribuição Horária do Tráfego de Caminhões (Hourly Truck Traffic Distribution)

De acordo com National Cooperative Highway Research Program (2004) os fatores de distribuição horária representam a porcentagem do AADTT dentro de cada hora do dia. Esses fatores são mais importantes para o projeto de pavimentos rígidos. A Figura 6 apresenta a tela Distribuição Horária do Tráfego de Caminhões.

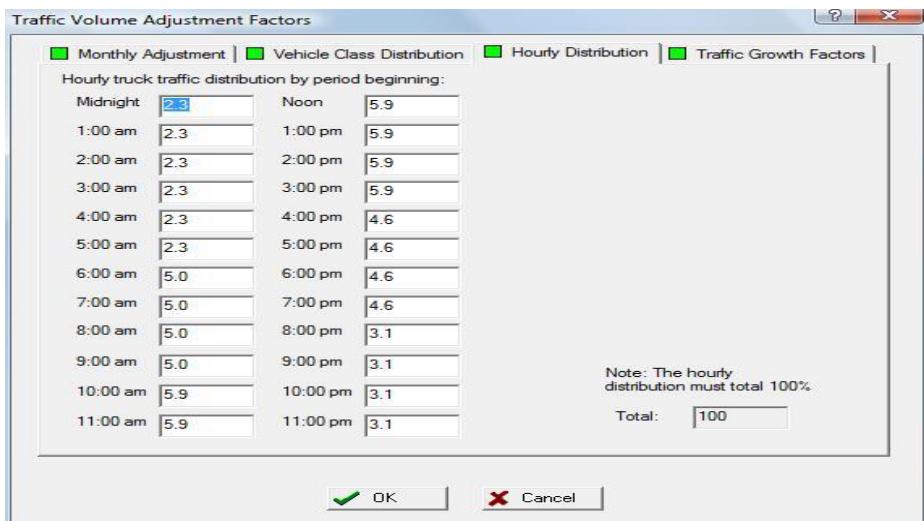


Figura 6: Distribuição horária do tráfego de caminhões

Fatores de Crescimento do Tráfego (Traffic Growth Factors)

A função crescimento do tráfego permite quantificar o crescimento ou decaimento do tráfego de caminhões durante o tempo. Três funções são disponíveis para estimar o futuro volume de tráfego de caminhões:

- a) sem crescimento;
- b) crescimento linear;
- c) crescimento composto.

Em uma mesma obra, diferentes funções de crescimento podem ser usadas para diferentes classes funcionais. Baseado na escolha da função, na data de abertura da estrutura ao tráfego e do período de projeto, o tráfego é projetado no futuro.

Fatores de Distribuição de Carga de Eixo (Axe Load Distribution Factors)

Segundo National Cooperative Highway Research Program (2004), os fatores de distribuição de carga de eixo simplesmente representam a porcentagem de todas as aplicações de eixo dentro de cada intervalo de carregamento para um específico tipo de eixo e classe de veículo. Esses dados precisam ser preenchidos para cada mês e para cada classe de veículo.



Uma definição de intervalos de carregamento para cada tipo de eixo é apresentada a seguir.

- a) eixos simples (3.000 lb a 41.000 lb em intervalos de 1.000 lb);
- b) eixos tandem (6.000 lb a 82.000 lb em intervalos de 2.000 lb);
- c) tandem triplo e quádruplo (12.000 lb a 102.000 lb em intervalos de 3.000 lb).

A Figura 7 apresenta a tela Fatores de Distribuição de Cargas de Eixo.

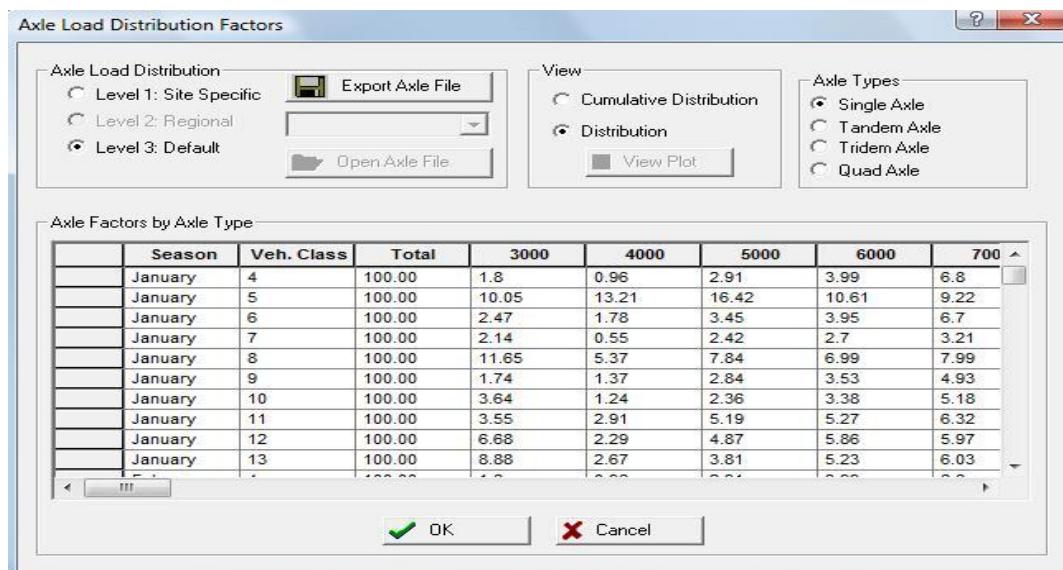


Figura 7: Fatores de distribuição de cargas de eixo

Dados de Entrada Gerais de Tráfego (General Traffic Data Inputs)

A maioria dos dados dessa categoria define a configuração da carga de eixo e detalhes do carregamento para cálculo da resposta do pavimento. As exceções são os dados de Número de Tipos de Eixos por Classe de Caminhão e Base da Roda, que são utilizados no cálculo do tráfego. *General Traffic Data Inputs* são caracterizados como:

- a) localização média da roda (*Mean Wheel Location*) é a distância externa da borda da roda até a marca do pavimento. Esse dado é muito importante para computar danos por fadiga;



- b) desvio padrão do tráfego (*Traffic Wander Standard Deviation*): desvio lateral do tráfego influencia no número de aplicações de carga em um ponto. Assume-se que o tráfego é uma distribuição normal e o desvio lateral é o seu desvio padrão;
- c) largura de projeto da pista (*Design Lane Width*) é a distância das marcas da pista de cada lado da pista desejada;
- d) número de tipos de eixos por classe de caminhão (*Number of Axle Types per Truck Class*): esta categoria representa a média do número de eixos por cada classe de caminhão (classe 4 a classe 13);
- e) configuração de eixo (*Axle Configuration*): alguns elementos são necessários para descrever os detalhes das configurações de eixo. Estes elementos são,
 - largura média do eixo (*Average Axle-Width*): distância entre duas bordas externas de um eixo;
 - espaçamento do pneu duplo (*Dual Tire Spacing*), que é distância dos centros de um pneu duplo;
 - pressão do pneu (*Tire Pressure*), que é a pressão de inflação ou a pressão de contato de pneu simples ou duplo;
 - Espaçamento do Eixo (*Axle Spacing*): distância entre dois eixos consecutivos.
- f) base da roda (*Wheelbase*). Esta informação é primeiramente usada para pavimentos rígidos, tendo pouco efeito na análise de pavimentos flexíveis.

2.5.2 Clima

As condições ambientais têm um efeito significativo no desempenho de pavimentos flexíveis. A interação dos fatores climáticos com os materiais do pavimento e carregamentos é bastante complexa. Fatores como precipitações e temperatura afetam diretamente a capacidade de resistência das camadas ao carregamento e alteram, por fim, o desempenho do pavimento. As informações a seguir são os dados climáticos necessários para o projeto de pavimento flexível:

- a) temperatura horária do ar durante o período de projeto;



- b) precipitação horária durante o período de projeto;
- c) velocidade horária do vento durante o período de projeto;
- d) porcentagem horária de luz solar durante o período de projeto;
- e) valores horários de umidade relativa do ambiente;
- f) tabela de profundidade da água, sazonal ou constante, do local do projeto.

Os primeiros cinco itens podem ser obtidos através de dados de estações climáticas de um determinado local. O M-E PDG possui um banco de dados com estações climáticas de mais de 800 localidades dos Estados Unidos e Canadá.

Todas as informações climáticas necessárias, de qualquer localidade dentro dos Estados Unidos, podem ser geradas simplesmente entrando com os seguintes dados: localização do pavimento (latitude e longitude) e elevação.

2.5.3 Estrutura

O procedimento de projeto de pavimentos flexíveis permite a inclusão de uma grande variedade de propriedades de materiais e espessura de camadas de asfalto, base e sub-base, como mostrado na Figura 8.

As camadas e os seus respectivos dados de entrada são discutidos a seguir.

Concreto Asfáltico e Camadas Asfálticas Estabilizadas (Asphalt Concrete and Asphalt Stabilized Layers)

Os dados de materiais requeridos para a camada de concreto asfáltico são:

- a) dados gerais das materiais. Essas propriedades são,
 - espessura da camada;
 - coeficiente de Poisson;
 - condutividade térmica;
 - calor específico;
 - massa específica.
- b) dados requeridos para a previsão do trincamento térmico. Esses dados são,
 - resistência à tração a 14° F;

- valores de fluênci;a;
- coeficiente de contração térmica.

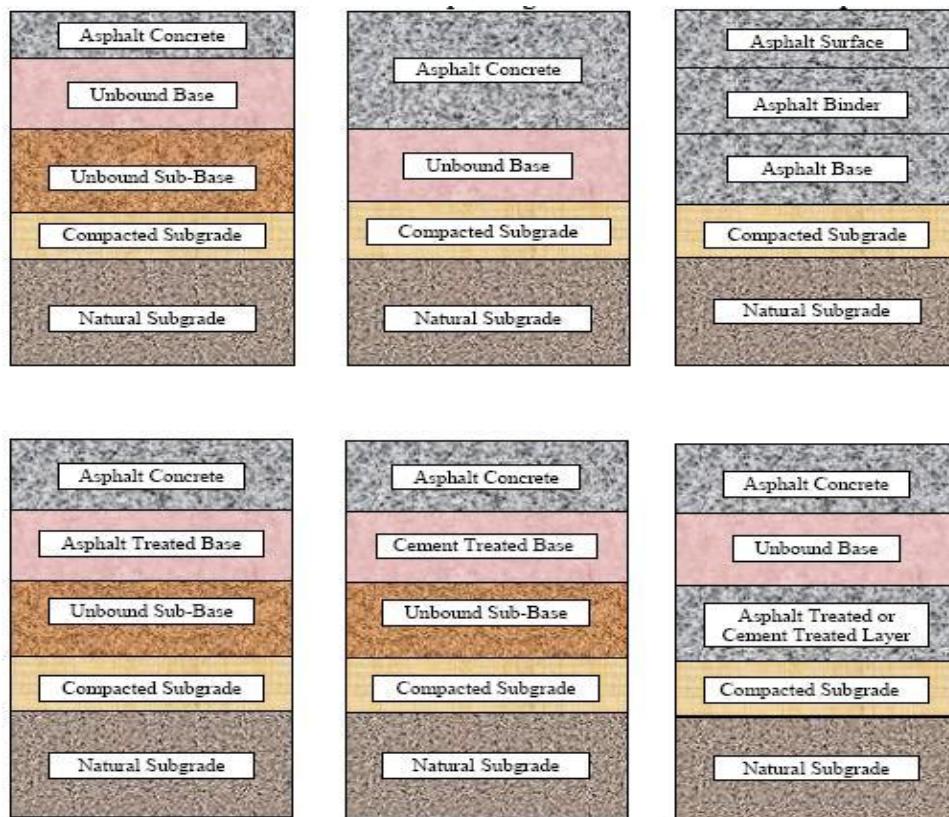


Figura 8: Ilustração de possíveis sistemas de camadas para pavimentos

Base, Sub-base e Subleito (Unbound Base/Subbase/Subgrade)

Os principais dados de entrada para as camadas de base, sub-base e subleito são:

- a) espessura da camada;
- b) módulo de resiliência da camada;
- c) coeficiente de Poisson;
- d) coeficiente de empuxo lateral do solo K_0 .

3. CONTAGEM VOLUMÉTRICA DE TRÁFEGO

3.1 RODOVIA: BR 101/RS

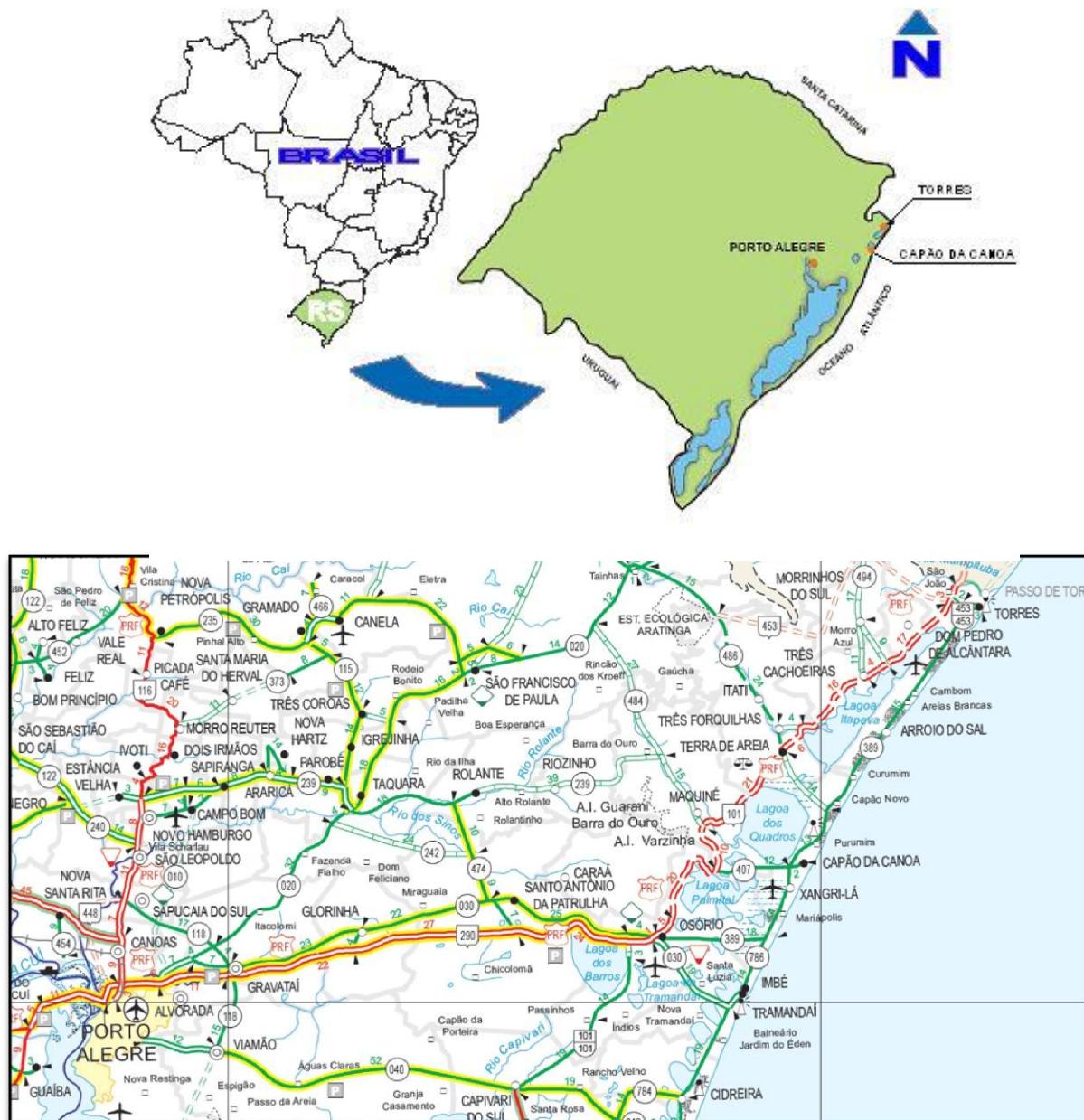


FIGURA 9: Mapa de Situação



POSTO A

RODOVIA: BR 101/RS
KM 56+700
CAPÃO DA CANOA

POSTO B

RODOVIA: BR 101/RS
KM 0+100
TORRES

FIGURA 10: Mapa de Localização

A contagem volumétrica classificatória de tráfego rodoviário na BR 101/RS, trecho Torres-Osório, foi realizada em dois postos de contagens escolhidos estrategicamente para avaliar uma possível heterogeneidade do tráfego no segmento em questão. Desta forma, os locais determinados visaram estabelecer a variação de fluxo de veículos devido ao abastecimento da região litorânea.



Assim sendo, optou-se pela contagem de fluxo nos seguintes pontos da rodovia BR 101/RS:

- **Posto A:** km 56+700, junto a uma casa desapropriada no município de Capão da Canoa;
- **Posto B:** km 0+100, junto ao Posto da Polícia Rodoviária Federal no município de Torres.

Os Estudos de Tráfego têm geralmente a finalidade estimar o Número N em postos de contagem para um determinado Período de Projeto (geralmente 10 anos). Para atender os objetivos, faz-se necessário lembrar que o dito Número N consiste no número de repetições de carga do eixo-padrão, que é um Eixo Simples de Rodado Duplo (ESRD) com carga de 8,2 tf, que passa na faixa mais solicitada do pavimento durante determinado período (Período de Projeto).

Na estimativa do Número N, os tipos de veículos que realmente interessam para análise são os comerciais (caminhões e ônibus), pois os veículos leves causam danos que podem ser desconsiderados à estrutura. Desta forma, a ênfase dos estudos apresentados neste relatório se dará em função do Volume Médio Diário de Veículos Comerciais (VMDc) e não do Volume Médio Diário (VMD).

3.1.1 Método de pesquisa

A pesquisa rodoviária de contagem classificatória de tráfego contou com duas equipes trabalhando simultaneamente em dois Postos locados em pontos estratégicos da rodovia durante o período de uma semana. Cada equipe de contagem era composta por três pesquisadores que se revezavam durante as 12 horas diárias (das 6:00 às 18:00) de coleta de dados.

Após a contagem volumétrica com duração de uma semana, tabularam-se os dados coletados em campo, de modo a facilitar o manuseio das informações expressas pelos mesmos. Posteriormente, os dados foram resumidos e expandidos a ponto de determinar o fluxo comercial em cada Posto de Contagem.

Uma vez que os dados coletados em campo representam um período de 12 horas por dia, das 6:00 h às 18:00 h, extrapolaram-se estes dados com base em



informações particulares dos consultores, obtidas junto à praça de pedágio localizada no km 78 da BR-101/RS. Os fatores empregados são os seguintes:

Tabela 1. Fatores empregados para extrapolar o tráfego comercial de 12 a 24 horas

Sentido	Posto A (Capão da Canoa)	Posto B (Torres)
Osório – Torres	1,8	2,0
Torres – Osório	1,5	1,6

Com base nos dados coletados em campo e com os fatores propostos para extração, foi possível determinar o VMDc para cada Posto de Contagem. Sendo que para tanto, determinou-se a média diária de veículos comerciais em cada sentido aplicando os fatores apresentados na Tabela 1 e efetuou-se a soma dos volumes obtidos.

Por fim, para cálculo do Número N, seguiu-se as etapas apresentadas na sequência.

3.1.2 Volume médio diário de veículos comerciais

Conforme mencionado anteriormente, o Volume Médio de Veículos Comerciais (VMDc) foi determinado aplicando-se fatores de extração aos dados coletados em campo.

Entretanto, cabe ressaltar que, normalmente, o comportamento do tráfego sofre influências devido a variações sazonais, portanto é equivocado usar os resultados de contagens de curta duração sem aplicar a devida correção sazonal.

Visando atender este quesito, recorreu-se à base de dados do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) para consultar o efeito da sazonalidade no tráfego da BR 101/RS e obteve-se o resultado apresentado na Tabela 2.



Tabela 2. Efeito da sazonalidade no tráfego de veículos da BR-101/RS (ano de 2001)

Mês	Volume de veículos	Fator de expansão
Janeiro	8467	1,09
Fevereiro	8895	1,15
Março	6653	0,86
Abril	6282	0,81
Maio	5980	0,77
Junho	5831	0,75
Julho	6120	0,79
Agosto	5931	0,76
Setembro	6165	0,79
Outubro	6486	0,84
Novembro	7377	0,95
Dezembro	7762	1,00
Fator de expansão médio		0,88

Para estimar o volume diário de veículos representativo do ano (VMDca) basta obter o fator de expansão médio, que no caso estudado é de 0,88, e multiplicá-lo pelo VMDc encontrado no mês de contagem.

3.1.3 Fator de Eixo

O Fator de Eixo (FE) é definido como o coeficiente que multiplicado pelo número de veículos resulta no número de eixos correspondentes a amostra. Este coeficiente é determinado pela Equação 1.

$$FE = \frac{n}{Vtc} \quad (1)$$

Onde

n: número total de eixos da frota; e

Vtc: volume de veículos comerciais na amostragem.

Para o cálculo do FE considerou-se como amostra todos os veículos comerciais contados durante os 7 dias de pesquisa.



3.1.4 Fator de carga

Os Fatores de Equivalência de Cargas (FC) convertem o tráfego misto em um número equivalente de operações de um eixo-padrão. Existem dois métodos distintos para determinação do FC, um desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano (USACE) e outro pela AASHTO. As expressões para determinação dos FC's são apresentadas nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Fatores de Equivalência de Carga pelo USACE

Tipos de eixo	Carga (t)	Equações
Dianteiro Simples e Traseiro Simples	0 – 8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem Duplo	0 – 11	$FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,4840}$
Tandem Triplo	0 – 18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

Tabela 4. Fatores de Equivalência de Carga pela AASHTO

Tipos de eixo	Equações
Simples de Rodagem Simples	$FC = (P / 7,77)^{4,32}$
Simples de Rodagem Dupla	$FC = (P / 8,17)^{4,32}$
Tandem Duplo	$FC = (P / 15,08)^{4,14}$
Tandem Triplo	$FC = (P / 22,95)^{4,22}$

Para o cálculo do FC por ambos os métodos, considera-se P como sendo o peso bruto total sobre o eixo expresso em tf.

Devido à falta de dados de pesagem até o momento de elaboração deste Relatório, para o cálculo do FC considerou-se que os veículos trafegam com a carga máxima permitida por lei, conforme apresentado na Tabela 5.

Embora esta consideração possa ser vista como “pessimista”, uma vez que nem todos os veículos trafegam com carga máxima legal, é preciso ter em conta que muitos veículos trafegam com excesso de carga. Como não há ao longo da BR-101/RS balanças em operação, não foi possível determinar a carga de cada eixo de todos os veículos comerciais operantes. Pelo exposto, e considerando que se sabe



(embora não se possa provar) que número expressivo de veículos trafega com excesso de carga, conclui-se que a visão “pessimista”, seja talvez, até mesmo, “ótima”.

Tabela 5. Fatores de Equivalência de Carga adotados na pesquisa

Tipos de eixo	Carga legal (tf)	FC do USACE	FC da AASHTO
Simples de Rodagem Simples	6	0,28	0,33
Simples de Rodagem Dupla	10	3,29	2,39
Tandem Duplo	17	8,55	1,64
Tandem Triplo	25,5	9,30	1,56

Sendo que o FC geral da amostra será obtido através da média ponderada dos Fatores de Carga para cada eixo (FCi), ou seja:

$$FC = \frac{\% \text{ } FCi}{100} \quad (2)$$

3.1.5 Cálculo do númeroN

Após obter os fatores de eixo e carga, realiza-se o cálculo estimado do Número N através da Equação 3.

$$N = 365 \text{ } Fd \text{ } VMDca \text{ } FE \text{ } FC \quad (3)$$

Onde

Fd: fator de distribuição de tráfego;

VMDca: volume médio diário de veículos comerciais durante o ano;

FE: fator de eixo; e

FC: fator de carga.

Uma vez que a rodovia estudada é uma via de pista dupla com duas faixas, considerou-se o fator de distribuição de tráfego (Fd) como sendo de 50%.

3.1.6 Taxa de crescimento do tráfego

Na falta de estudos sócio-econômicos para determinar uma taxa de crescimento (t) do tráfego na rodovia estudada, optou-se por avaliar três cenários distintos, a saber:

- Cenário 1 – Pessimista, a taxa de crescimento é de 2,0 % ao ano;
- Cenário 2 – Conservador, a taxa de crescimento é de 3,0 % ao ano; e
- Cenário 3 – Otimista, a taxa de crescimento é de 5,0 % ao ano.

A taxa de crescimento que se deve tomar como referência é a de 3,0 %, pois parece ser a mais realista e está em consonância com a orientação geral do DNIT para projetos rodoviários sem estudos econômicos.

3.1.7 RESULTADOS DO POSTO DE CONTAGEM A – CAPÃO DA CANOA/RS

A contagem volumétrica de tráfego no Posto A, situado no município de Capão da Canoa, teve duração de uma semana e foi realizada de segunda a domingo, respectivamente.

A contagem de tráfego foi estratificada em função do tipo de veículo e pela hora do dia, sendo que a contagem teve duração contínua de 12 horas com início às 06:00 h. A imagem a seguir apresenta uma visão geral do Posto A.



Figura 11: Vista geral do posto de contagem A em Capão da Canoa

O fluxo de tráfego no Posto A, km 56+700 da BR-101/RS, é influenciado principalmente pela rodovia RS 486. A RS-486, conhecida como Rota do Sol, serve de ligação para a Mesorregião Metropolitana de Porto Alegre.



Os formulários utilizados na contagem de tráfego são específicos da metodologia recomendada pelo DNIT para estimativa do Número N, ou seja, número virtual de passagens do eixo-padrão de 8,2 tf sobre a faixa mais solicitada do pavimento. Visando determinar o número N, tabularam-se os dados levantados em campo e os mesmos são apresentados na seqüência.

3.1.8 Volume médio diário de veículos no posto A

Tipo de Veículo	Sentido		Expansão para 24h		Tráfego	
	Osório - Torres	Torres - Osório	Osório – Torres	Torres - Osório	Total	%
	Passeio	559	497	1005	746	1752
	Utilitário	82	86	147	129	276
	2CB	60	53	107	80	187
	3CB	35	32	64	48	111
	4CB	1	1	3	1	4
	4CD	5	5	8	7	16
	2C	207	192	372	289	661
	3C	424	441	764	661	1425
	4C	0	0	0	0	0,00
	2S1	4	3	6	5	12
	2S2	139	119	250	179	428
	2S3	292	333	525	500	1025
	3S1	0	1	1	1	2
	3S2	15	15	28	23	50
	3S3	229	252	412	378	790
	2C2	5	2	8	2	11
	2C3	1	1	1	1	3
	3C2	3	3	5	4	9
	3C3	0	3	1	5	5
	3D4	85	83	153	125	277
	3D6*	0	2	0	3	3
	3T6	16	19	29	28	57
						0,80

VMDc	5076
VMDca	4467

3.1.9 Cálculo do número N para o posto A

Tipo de Veículo	Sentido		Tráfego			
	Osório - Torres	Torres - Osório	Total	Nº eixos	ni	
	Passeio	3910	3482	7392	2	Não considerado
	Utilitário	573	600	1173	2	Não considerado
	2CB	418	373	791	2	1582
	3CB	247	222	469	2	938
	4CB	10	5	15	2	30
	4CD	33	33	66	2	132
	2C	1448	1347	2795	2	5590
	3C	2971	3086	6057	2	12114
	4C	0	0	0	2	0
	2S1	25	24	49	3	147
	2S2	971	834	1805	3	5415
	2S3	2042	2333	4375	3	13125
	3S1	3	4	7	3	21
	3S2	108	105	213	3	639
	3S3	1601	1764	3365	3	10095
	2C2	33	11	44	4	176
	2C3	5	6	11	4	44
	3C2	20	18	38	4	152
	3C3	3	22	25	4	100
	3D4	594	582	1176	4	4704
	3D6*	0	16	16	4	64
	3T6	111	132	243	5	1215

n	56283
FE	2,61



Tipo de Eixo	Quantidade	% amostra	% .FCi	
			USACE	AASHTO
Simples de Rodagem Simples	21479	38,19	10,69	12,60
Simples de Rodagem Dupla	10038	17,85	58,72	42,66
Tandem Duplo	16906	30,06	257,02	49,30
Tandem Triplo	7816	13,90	129,25	21,68
			FC	4,56
			1,26	

Desta forma, pode-se estimar o Número N no Posto A através da Equação 3. Nas Tabelas a seguir, apresenta-se a evolução prevista para o tráfego comercial durante um período de 10 anos.

Tabela 6. Cálculo do Número N considerando t = 2% a.a.

Ano	VMDc	Número N anual		Número N acumulado	
		USACE	AASHTO	USACE	AASHTO
2009	4467	9,7E+06	2,7E+06	9,7E+06	2,7E+06
2010	4556	9,9E+06	2,7E+06	2,0E+07	5,4E+06
2011	4647	1,0E+07	2,8E+06	3,0E+07	8,2E+06
2012	4740	1,0E+07	2,9E+06	4,0E+07	1,1E+07
2013	4835	1,0E+07	2,9E+06	5,0E+07	1,4E+07
2014	4932	1,1E+07	3,0E+06	6,1E+07	1,7E+07
2015	5031	1,1E+07	3,0E+06	7,2E+07	2,0E+07
2016	5131	1,1E+07	3,1E+06	8,3E+07	2,3E+07
2017	5234	1,1E+07	3,1E+06	9,5E+07	2,6E+07
2018	5338	1,2E+07	3,2E+06	1,1E+08	2,9E+07
2019	5445	1,2E+07	3,3E+06	1,2E+08	3,3E+07

Tabela 7. Cálculo do Número N considerando t = 3% a.a.

Ano	VMDc	Número N anual		Número N acumulado	
		USACE	AASHTO	USACE	AASHTO
2009	4467	9,7E+06	2,7E+06	9,7E+06	2,7E+06
2010	4601	1,0E+07	2,8E+06	2,0E+07	5,5E+06
2011	4739	1,0E+07	2,9E+06	3,0E+07	8,3E+06
2012	4881	1,1E+07	2,9E+06	4,1E+07	1,1E+07
2013	5028	1,1E+07	3,0E+06	5,1E+07	1,4E+07
2014	5178	1,1E+07	3,1E+06	6,3E+07	1,7E+07
2015	5334	1,2E+07	3,2E+06	7,4E+07	2,1E+07
2016	5494	1,2E+07	3,3E+06	8,6E+07	2,4E+07
2017	5659	1,2E+07	3,4E+06	9,9E+07	2,7E+07
2018	5828	1,3E+07	3,5E+06	<u>1,1E+08</u>	3,1E+07
2019	6003	1,3E+07	3,6E+06	<u>1,2E+08</u>	3,4E+07

Tabela 8. Cálculo do Número N considerando $t = 5\% \text{ a.a.}$

Ano	VMDc	Número N anual		Número N acumulado	
		USACE	AASHTO	USACE	AASHTO
2009	4467	9,7E+06	2,7E+06	9,7E+06	2,7E+06
2010	4690	1,0E+07	2,8E+06	2,0E+07	5,5E+06
2011	4925	1,1E+07	3,0E+06	3,1E+07	8,5E+06
2012	5171	1,1E+07	3,1E+06	4,2E+07	1,2E+07
2013	5430	1,2E+07	3,3E+06	5,4E+07	1,5E+07
2014	5701	1,2E+07	3,4E+06	6,6E+07	1,8E+07
2015	5986	1,3E+07	3,6E+06	7,9E+07	2,2E+07
2016	6286	1,4E+07	3,8E+06	9,3E+07	2,6E+07
2017	6600	1,4E+07	4,0E+06	1,1E+08	3,0E+07
2018	6930	1,5E+07	4,2E+06	1,2E+08	3,4E+07
2019	7276	1,6E+07	4,4E+06	1,4E+08	3,8E+07

3.1.10 Cálculo do Número N para o Posto B - TORRES

A contagem volumétrica de tráfego no Posto B, situado no município de Torres, teve duração de uma semana e foi realizada de segunda a domingo, respectivamente. A contagem de tráfego foi estratificada em função do tipo de veículo e pela hora do dia, sendo que a contagem teve duração contínua de 12 horas com início às 06:00 h. A imagem a seguir apresenta uma visão geral do Posto B.



Figura 12: Vista geral do posto de contagem B em Torres

O fluxo de tráfego no Posto B, km 0+100 da BR 101/RS é influenciado principalmente pela rodovia RS-389. Entretanto, a RS-389, conhecida como Estrada



do Mar, somente é trafegada por veículos de passeio, que não são objeto de interesse deste estudo.

Os formulários utilizados na contagem de tráfego são específicos da metodologia recomendada pelo DNIT para estimativa do Número N, ou seja, número virtual de passageiros do eixo-padrão de 8,2 tf sobre a faixa mais sobrecarregada do pavimento. Visando determinar o número N, tabulou-se os dados levantados em campo e os mesmos são apresentados na seqüência.

3.1.11 Volume médio diário de veículos no posto B

Tipo de Veículo	Sentido		Expansão para 24h		Tráfego	
	Osório - Torres	Torres - Osório	Osório – Torres	Torres - Osório	Total	%
	Passeio	1733	1684	3466	2695	6161
	Utilitário	274	262	549	419	967
	2CB	29	34	59	55	113
	3CB	33	28	65	45	110
	4CB	2	1	3	2	5
	4CD	5	5	9	8	17
	2C	143	139	287	223	509
	3C	482	460	964	736	1700
	4C	0	0	0	0	0,00
	2S1	2	2	3	3	6
	2S2	124	99	249	159	407
	2S3	340	350	680	560	1240
	3S1	0	0	1	1	1
	3S2	15	16	30	25	56
	3S3	245	258	491	413	903
	2C2	1	1	3	2	5
	2C3	1	0	2	0	2
	3C2	2	2	5	3	8
	3C3	2	1	4	2	6
	3D4	92	93	184	148	332
	3D6*	3	2	6	4	9
	3T6	15	20	30	32	63

VMDc	5494
VMDca	4835

3.1.12 Cálculo de N para o Posto B

Tipo de Veículo	Sentido		Tráfego			
	Osório - Torres	Torres - Osório	Total	Nº eixos	ni	
	Passeio	12130	11791	23921	2	Não considerado
	Utilitário	1921	1831	3752	2	Não considerado
	2CB	205	239	444	2	888
	3CB	229	196	425	2	850
	4CB	11	10	21	2	42
	4CD	32	35	67	2	134
	2C	1003	975	1978	2	3956
	3C	3373	3222	6595	2	13190
	4C	0	0	0	2	0
	2S1	12	12	24	3	72
	2S2	870	694	1564	3	4692
	2S3	2379	2452	4831	3	14493
	3S1	2	3	5	3	15
	3S2	106	111	217	3	651
	3S3	1717	1806	3523	3	10569
	2C2	9	9	18	4	72
	2C3	6	2	8	4	32
	3C2	17	12	29	4	116
	3C3	14	10	24	4	96
	3D4	644	648	1292	4	5168
	3D6*	20	16	36	4	144
	3T6	106	141	247	5	1235

n	56415
FE	2,64



Tipo de Eixo	Quantidade	% amostra	% .FCi	
			USACE	AASHTO
Simples de Rodagem Simples	21260	37,70	10,56	12,44
Simples de Rodagem Dupla	8986	15,93	52,42	38,08
Tandem Duplo	17707	31,40	268,44	51,49
Tandem Triplo	8444	14,97	139,24	23,36

FC	4,71	1,25
----	------	------

Assim, estimou-se o Número N no Posto B através da Equação 3. Nas Tabelas a seguir, apresenta-se a evolução prevista para o tráfego comercial durante 10 anos.

Tabela 9. Cálculo do Número N considerando t = 2% a.a.

Ano	VMDc	Número N anual		Número N acumulado	
		USACE	AASHTO	USACE	AASHTO
2009	4835	1,1E+07	2,9E+06	1,1E+07	2,9E+06
2010	4932	1,1E+07	3,0E+06	2,2E+07	5,9E+06
2011	5030	1,1E+07	3,0E+06	3,4E+07	8,9E+06
2012	5131	1,2E+07	3,1E+06	4,5E+07	1,2E+07
2013	5234	1,2E+07	3,2E+06	5,7E+07	1,5E+07
2014	5338	1,2E+07	3,2E+06	6,9E+07	1,8E+07
2015	5445	1,2E+07	3,3E+06	8,2E+07	2,2E+07
2016	5554	1,3E+07	3,4E+06	9,4E+07	2,5E+07
2017	5665	1,3E+07	3,4E+06	1,1E+08	2,9E+07
2018	5778	1,3E+07	3,5E+06	1,2E+08	3,2E+07
2019	5894	1,3E+07	3,6E+06	1,3E+08	3,6E+07

Tabela 10. Cálculo do Número N considerando t = 3% a.a.

Ano	VMDc	Número N anual		Número N acumulado	
		USACE	AASHTO	USACE	AASHTO
2009	4835	1,1E+07	2,9E+06	1,1E+07	2,9E+06
2010	4980	1,1E+07	3,0E+06	2,2E+07	5,9E+06
2011	5129	1,2E+07	3,1E+06	3,4E+07	9,0E+06
2012	5283	1,2E+07	3,2E+06	4,6E+07	1,2E+07
2013	5442	1,2E+07	3,3E+06	5,8E+07	1,6E+07
2014	5605	1,3E+07	3,4E+06	7,1E+07	1,9E+07
2015	5773	1,3E+07	3,5E+06	8,4E+07	2,2E+07
2016	5946	1,3E+07	3,6E+06	9,8E+07	2,6E+07
2017	6125	1,4E+07	3,7E+06	1,1E+08	3,0E+07
2018	6309	1,4E+07	3,8E+06	1,3E+08	3,4E+07
2019	6498	1,5E+07	3,9E+06	1,4E+08	3,7E+07

Tabela 11.Cálculo do Número N considerando t = 5% a.a.

Ano	VMDc	Número N anual		Número N acumulado	
		USACE	AASHTO	USACE	AASHTO
2009	4835	1,1E+07	2,9E+06	1,1E+07	2,9E+06
2010	5077	1,2E+07	3,1E+06	2,2E+07	6,0E+06
2011	5331	1,2E+07	3,2E+06	3,5E+07	9,2E+06
2012	5597	1,3E+07	3,4E+06	4,7E+07	1,3E+07
2013	5877	1,3E+07	3,6E+06	6,1E+07	1,6E+07
2014	6171	1,4E+07	3,7E+06	7,5E+07	2,0E+07
2015	6479	1,5E+07	3,9E+06	8,9E+07	2,4E+07
2016	6803	1,5E+07	4,1E+06	1,0E+08	2,8E+07
2017	7143	1,6E+07	4,3E+06	1,2E+08	3,2E+07
2018	7501	1,7E+07	4,5E+06	1,4E+08	3,7E+07
2019	7876	1,8E+07	4,8E+06	1,6E+08	4,2E+07

3.2 RODOVIA: BR-290/ RS



Figura 13: Mapa de Situação

Os dados de tráfego rodoviário na BR-290/RS, trecho Osório-Porto Alegre, foram obtidos junto às praças de pedágio localizadas nos km 19 (no município de Santo Antônio da Patrulha) e km 77 (município de Gravataí).

Nesta rodovia foi realizado um Estudo de Tráfego com contagem de maior precisão, pois contemplou os dados da praça de pedágio para o período de 12 horas contínuas, e os dados pesquisados objetivaram a futura previsão de desempenho de pavimentos, empregando-se o software ME-PDG.



Obtiveram-se, então, os seguintes dados:

AADTT¹ ou média anual do tráfego diário de caminhões igual a **4.640**.

A classificação de veículos comerciais foi feita seguindo os padrões empregados pela CONCEPA na cobrança de pedágios. Na Tabela 12, a seguir, apresentam-se os percentuais de veículos comerciais das classes empregadas pela CONCEPA e as classes equivalentes segundo o ME-PDG. Lembra-se que a descrição visual das classes de veículos do ME-PDG foi apresentada na Figura 5.

Tabela 12.Percentuais de veículos comerciais de acordo com as classes empregadas pela CONCEPA e pelo ME-PDG

Classe de veículo segundo a CONCEPA	Classe de veículo equivalente no ME-PDG	% de veículos na classe
2	5	27,22
4	4, 6 e 8	30,89
6	7	5,78
7	9	18,64
8	10	12,91
11, 12, 13, 14 e 15	13	4,56

Os dados disponibilizados pela CONCEPA também permitiram definir os percentuais de veículos comerciais que trafegam sobre a rodovia, de hora em hora. Esses dados são apresentados na Tabela 13.

¹ AADTT é a sigla de Average Annual Daily Truck Traffic



Tabela 13. Distribuição horária do tráfego comercial²

Meianoite	1,8%	Meiodia	4,6%
1:00 am	1,3%	1:00 pm	4,9%
2:00 am	1,1%	2:00 pm	5,6%
3:00 am	1,0%	3:00 pm	5,7%
4:00 am	1,4%	4:00 pm	6,0%
5:00 am	2,7%	5:00 pm	6,4%
6:00 am	5,0%	6:00 pm	6,4%
7:00 am	6,2%	7:00 pm	5,5%
8:00 am	5,8%	8:00 pm	4,3%
9:00 am	5,6%	9:00 pm	3,4%
10:00 am	5,5%	10:00 pm	2,6%
11:00 am	5,2%	11:00 pm	2,0%

Além disso, a disponibilização dos dados por parte da Concessionária permitiu definir Fatores de Ajuste de Tráfego para os veículos comerciais, conforme a classe do ME-PDG.

Como o ME-PDG analisa os efeitos combinados do tráfego (representado pelos Fatores de Ajuste de Tráfego) e do clima, foi necessário defasjar os fatores de ajuste em 6 meses, de forma a manter a lógica do ME-PDG. Os Fatores, já defasados em 6 meses, são apresentados na Tabela 14.

²A hora indicada é a do início do período.



Tabela 14. Fatores Mensais de Ajuste de Tráfego

Mês	Classe de Veículo									
	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7	Classe 8	Classe 9	Classe 10	Classe 11	Classe 12	Classe 13
Janeiro	1.00	0.92	0.96	0.99	1.00	1.04	0.97	1.00	1.00	1.00
Fevereiro	1.00	0.89	0.96	0.96	1.00	1.03	1.04	1.00	1.00	1.08
Março	1.00	0.96	1.00	1.06	1.00	1.05	1.06	1.00	1.00	1.04
Abril	1.00	1.04	1.12	1.14	1.00	1.09	1.12	1.00	1.00	1.09
Maio	1.00	1.02	1.06	1.13	1.00	1.06	1.13	1.00	1.00	1.13
Junho	1.00	1.29	1.12	1.18	1.00	1.03	1.14	1.00	1.00	1.20
Julho	1.00	1.15	1.07	0.79	1.00	0.87	0.86	1.00	1.00	0.84
Agosto	1.00	1.06	0.96	0.80	1.00	0.83	0.83	1.00	1.00	0.83
Setembro	1.00	0.99	1.00	1.05	1.00	1.02	1.03	1.00	1.00	0.93
Outubro	1.00	0.91	0.93	0.89	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.93
Novembro	1.00	0.90	0.92	1.01	1.00	1.04	0.95	1.00	1.00	0.94
Dezembro	1.00	0.86	0.90	1.00	1.00	0.95	0.88	1.00	1.00	0.98

Finalizando esta seção observa-se que não foram calculados os números equivalentes de eixos padrão para a BR-290/RS, em função da natureza diferenciada da Análise de Tráfego.

4. RODOVIAS CONSIDERADAS NAS ANÁLISES E RESULTADOS DA PESAGEM NAS BALANÇAS DA BR-290/RS

4.1 RODOVIA BR-290/ RS –FREEWAY

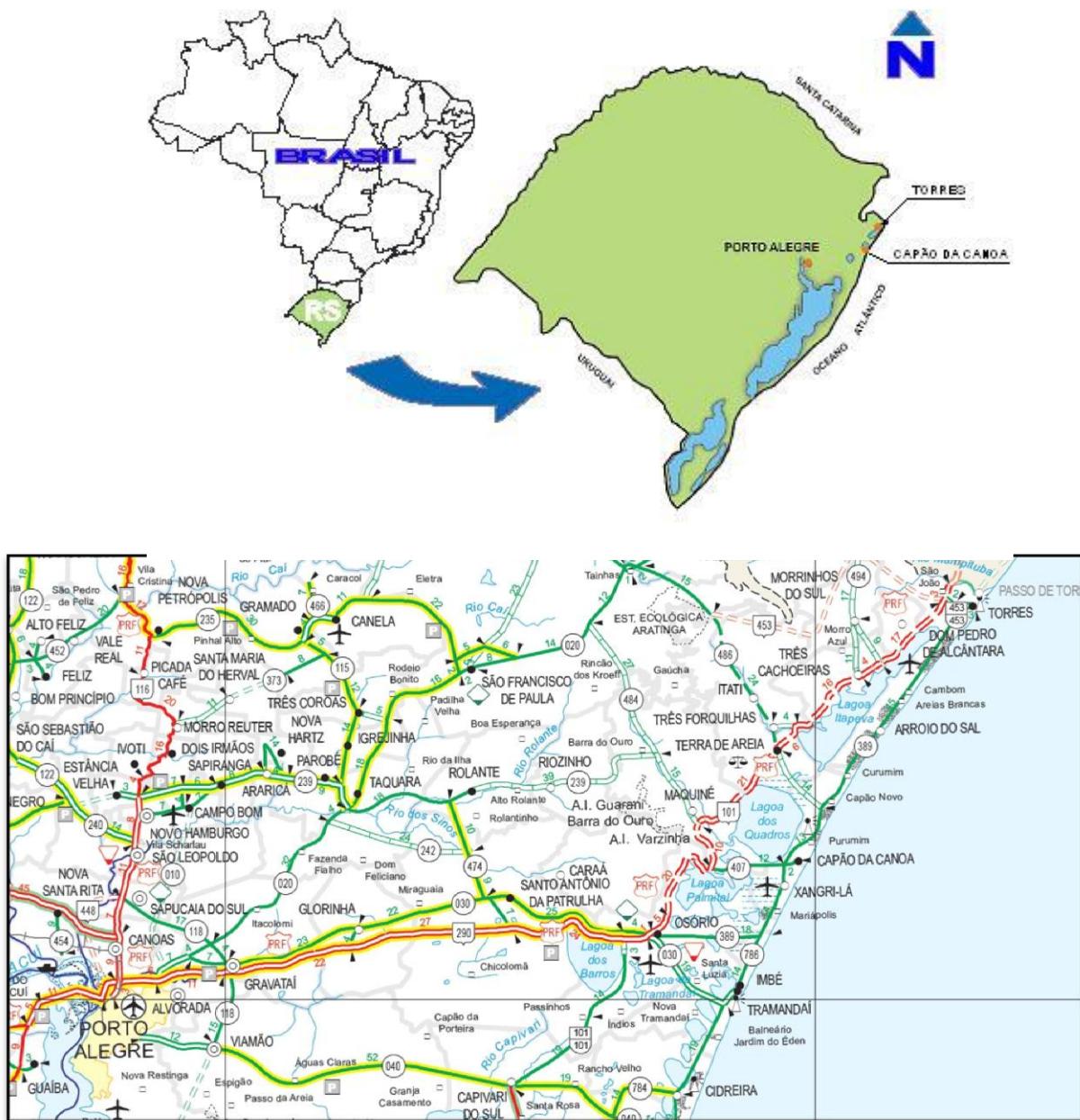


FIGURA 14: Mapa de Situação da Freeway

4.2 RODOVIA BR-101/RS – lotes 1 e 3 da duplicação



LOTE 3

RODOVIA BR-101/RS
km 50 a km 75

Lote 1

RODOVIA BR-101/RS
km 0 a km 25

FIGURA 15: Mapa de Situação dos Lotes 1 e 3 da Obra de Modernização e Ampliação de Capacidade (Duplicação) da BR-101/RS



Neste capítulo apresentam-se os resultados de Pesquisas de Campo, que objetivaram quantificar os excessos de cargas atuantes sobre os pavimentos, tomando-se como estudo de caso o pavimento da BR-290/RS, trecho Osório – Porto Alegre (Freeway), em função da disponibilidade de dados de pesagem em balanças operadas pela ANTT nessa rodovia.

4.3 MÉTODO DE PESQUISA

Nesta etapa de pesquisa obtiveram-se dados de pesagem nas Balanças localizadas nas imediações do km 65 das Pistas Sul e Norte da BR-290/RS. As informações dão conta que as pesagens são realizadas em dias úteis, em horário comercial.

Não se dispõe atualmente de dados de pesagem na BR-101/RS, trecho Torres Osório, mas pode-se estimar que o tráfego comercial que solicita o pavimento dessa rodovia entre Osório e Terra de Areia (Interseção com a Rota do Sol), Lote 3 e parte do Lote 2, é muito parecido ao que trafega na Freeway.

No atual Relatório apresenta-se uma síntese das pesagens, focalizando a ocorrência ou não de sobrecarga, seja no PBT (Preso Bruto Total) ou em qualquer dos eixos do veículo.

4.4 RESULTADOS DAS PESAGENS NAS BALANÇAS DA FREEWAY

As Tabelas 15 e 16, a seguir, apresentam as sínteses de pesagens realizadas nas Balanças localizadas na Freeway, 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 15. Síntese do registro de excesso de carga na Balança Sul

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%			

Tabela 16. Síntese do registro de excesso de carga na Balança Norte

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%			

Lembra-se que os valores limites³ de cargas de eixo são os seguintes:

Carga de eixos simples (com rodado duplo) 10,750 tf

Carga de eixo tandem duplo 18,275 tf

Carga de eixo tandem triplo 27,413 tf

O valor limite do Peso Bruto Total (PBT) do veículo depende da configuração e número de eixos.

Os dados apresentados nas Tabelas 15 e 16 mostram que:

- a) o excesso de carga na Freeway é uma realidade, sendo que 14% e 17% dos veículos pesados nas Balanças Sul e Norte apresentaram PBT superior ao limite;
- b) no geral, os excessos de carga são semelhantes nos dois sentidos da rodovia;
- c) a maior incidência de sobrecarga se dá nos eixos simples: 11% na Balança Sul e 14% na Balança Norte. A máxima carga de eixo simples medida foi de

³ Carga máxima legal acrescida de 7,5%.

17,5 tf, que de acordo com a AASHTO⁴ causa o mesmo dano que 26,9 cargas de eixo padrão⁵;

- d) 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
- e) os excessos de carga podem ser muito elevados⁶, o que torna imperioso o funcionamento de balanças, de forma a coibir os excessos que encurtam de sobremaneira a vida dos pavimentos.

As figuras 16 a 19, a seguir, mostram os percentuais de sobrecarga em forma de diagramas de setores (“pizza”).

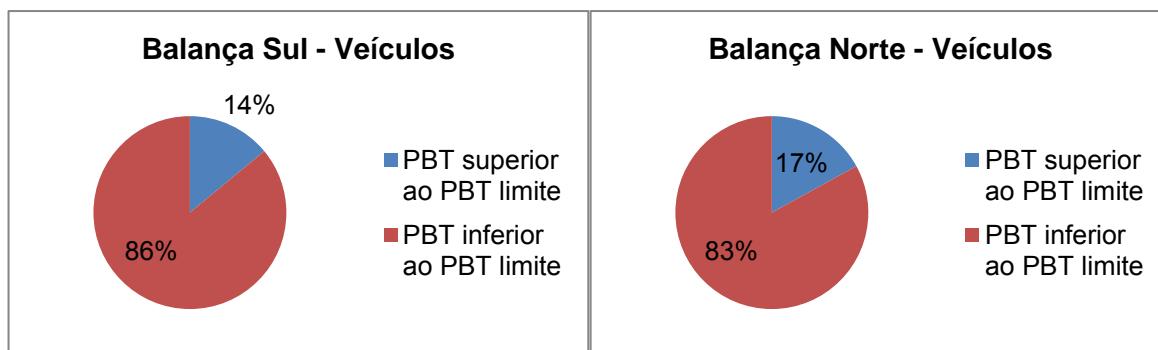
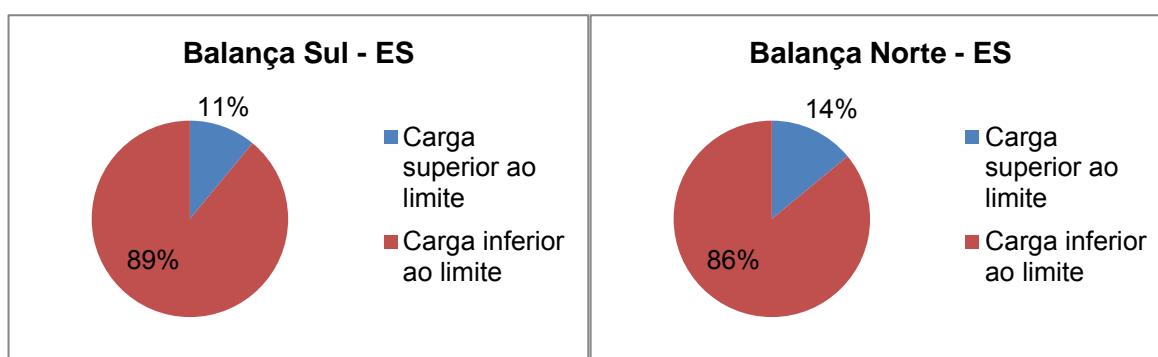


Figura 16: Diagrama de setores de ocorrência de excesso de carga quanto ao PBT



⁴AASHTO é a sigla de *American Association of State Highways and Transportation Officials*.

⁵ A carga de eixo padrão brasileira é a carga de eixo simples com rodado duplo, que transmite ao pavimento 8,2 tf.

⁶Em parte porque os sistemas de suspensão dos veículos de carga têm experimentado significativas melhorias.

Figura 17: Diagrama de setores de ocorrência de excesso nos eixos simples

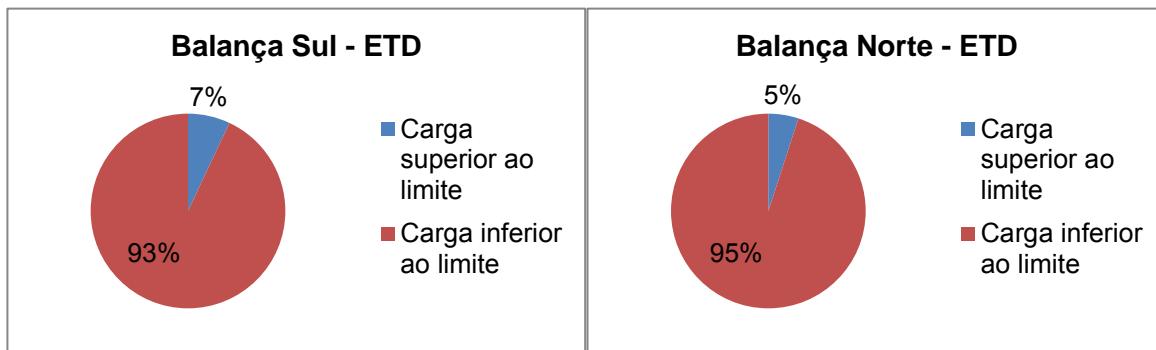


Figura 18: Diagrama de setores de ocorrência de excesso nos eixos tandem duplos

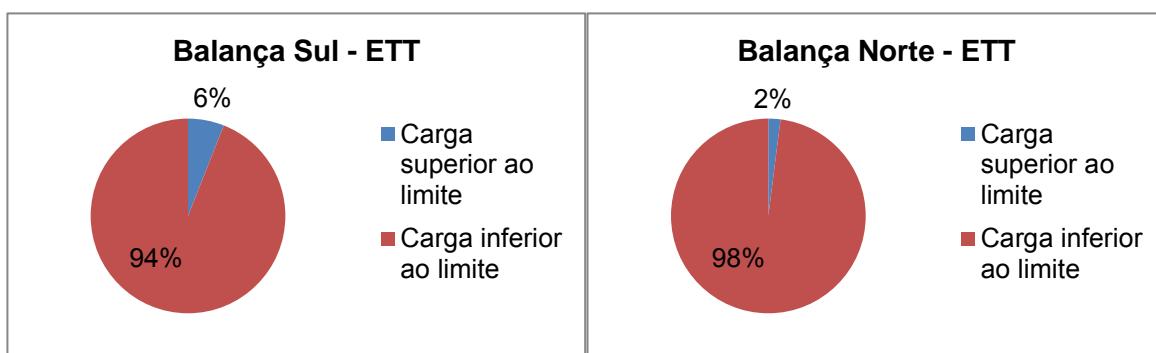


Figura 19: Diagrama de setores de ocorrência de excesso nos eixos tandem triplos

5. ANÁLISE DOS EFEITOS DE SOBRECARGAS NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS TÍPICOS DA REGIÃO SUL DO PAÍS

5.1 RODOVIA: BR-290/RS



FIGURA 20: Mapa de Situação da Freeway

5.1.1 Informações Gerais

As constantes de calibração utilizadas no software ME-PDG, foram as constantes sugeridas pelo próprio Guia – caracterizando uma análise em Nível 3. Contudo incorporaram-se alguns aspectos do Nível 2, especialmente em termos da caracterização do tráfego (classificação de veículos, distribuição das diversas classes ao longo dos 12 meses do ano e distribuição horária ao longo do dia). A confiabilidade do projeto foi fixada em 90%.

Os parâmetros base de análise foram:

- Porcentagem de área com trinca classe 2: $FC-2 \leq 25\%$;
- Afundamento de trilha de roda (F): $F \leq 5\text{mm}$; e
- Irregularidade Longitudinal: $QI \leq 35 \text{ contagens/km}$ (ou $IRI \leq 2,7 \text{ m/km}$).



5.1.2 Dados de Tráfego

Os dados de tráfego rodoviário na BR-290/RS, trecho Osório-Porto Alegre, a seguir apresentados, foram obtidos junto às praças de pedágio localizadas nos km 19 (no município de Santo Antônio da Patrulha) e km 77 (município de Gravataí).

AADTT⁷ ou média anual do tráfego diário de caminhões igual a **4.640**.

A classificação de veículos comerciais foi feita seguindo os padrões empregados pela CONCEPA na cobrança de pedágios. Na Tabela 17, a seguir, apresentam-se os percentuais de veículos comerciais das classes empregadas pela CONCEPA e as classes equivalentes segundo o ME-PDG. Lembra-se que a descrição visual das classes de veículos do ME-PDG foi apresentada na Figura 5.

Tabela 17.Percentuais de veículos comerciais de acordo com as classes empregadas pela CONCEPA e pelo ME-PDG

Classe de veículo segundo a CONCEPA	Classe de veículo equivalente no ME-PDG	% de veículos na classe
2	5	27,22
4	4, 6 e 8	30,89
6	7	5,78
7	9	18,64
8	10	12,91
11, 12, 13, 14 e 15	13	4,56

Considerou-se, também que a distribuição de veículos por sentido é igual; isto é 50% dos veículos trafegando em cada sentido da rodovia (Osório – Porto Alegre e Porto Alegre – Osório). Ainda, seguindo recomendações da AASHTO, considerou-se que a faixa mais trafegada receberá 60% dos veículos comerciais de cada sentido.

Os dados disponibilizados pela CONCEPA também permitiram definir os percentuais de veículos comerciais que trafegam sobre a rodovia, de hora em hora. Esses dados são apresentados na Tabela 18.

⁷ AADTT é a sigla de Average Annual Daily Truck Traffic



Tabela 18.Distribuição horária do tráfego comercial⁸

Meianoite	1,8%	Meiodia	4,6%
1:00 am	1,3%	1:00 pm	4,9%
2:00 am	1,1%	2:00 pm	5,6%
3:00 am	1,0%	3:00 pm	5,7%
4:00 am	1,4%	4:00 pm	6,0%
5:00 am	2,7%	5:00 pm	6,4%
6:00 am	5,0%	6:00 pm	6,4%
7:00 am	6,2%	7:00 pm	5,5%
8:00 am	5,8%	8:00 pm	4,3%
9:00 am	5,6%	9:00 pm	3,4%
10:00 am	5,5%	10:00 pm	2,6%
11:00 am	5,2%	11:00 pm	2,0%

Além disso, a disponibilização dos dados por parte da Concessionária permitiu definir Fatores de Ajuste de Tráfego para os veículos comerciais, conforme a classe do ME-PDG.

Como o ME-PDG analisa os efeitos combinados do tráfego (representado pelos Fatores de Ajuste de Tráfego) e do clima, foi necessário defasjar os fatores de ajuste em 6 meses, de forma a manter a lógica do ME-PDG. Os Fatores, já defasados em 6 meses, são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19.Fatores Mensais de Ajuste de Tráfego

Mês	Classe de Veículo									
	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7	Classe 8	Classe 9	Classe 10	Classe 11	Classe 12	Classe 13
Janeiro	1.00	0.92	0.96	0.99	1.00	1.04	0.97	1.00	1.00	1.00
Fevereiro	1.00	0.89	0.96	0.96	1.00	1.03	1.04	1.00	1.00	1.08
Março	1.00	0.96	1.00	1.06	1.00	1.05	1.06	1.00	1.00	1.04
Abril	1.00	1.04	1.12	1.14	1.00	1.09	1.12	1.00	1.00	1.09
Maio	1.00	1.02	1.06	1.13	1.00	1.06	1.13	1.00	1.00	1.13
Junho	1.00	1.29	1.12	1.18	1.00	1.03	1.14	1.00	1.00	1.20
Julho	1.00	1.15	1.07	0.79	1.00	0.87	0.86	1.00	1.00	0.84
Agosto	1.00	1.06	0.96	0.80	1.00	0.83	0.83	1.00	1.00	0.83
Setembro	1.00	0.99	1.00	1.05	1.00	1.02	1.03	1.00	1.00	0.93
Outubro	1.00	0.91	0.93	0.89	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.93
Novembro	1.00	0.90	0.92	1.01	1.00	1.04	0.95	1.00	1.00	0.94
Dezembro	1.00	0.86	0.90	1.00	1.00	0.95	0.88	1.00	1.00	0.98

⁸A hora indicada é a do início do período.



Fatores de Distribuição de Carga de Eixo (Axle Load Distribution Factors)

Segundo National Cooperative Highway Research Program (2004), os fatores de distribuição de carga de eixo representam a porcentagem de todas as aplicações de eixo dentro de cada intervalo de carregamento, para um específico tipo de eixo e classe de veículo. Esses dados precisam ser preenchidos para cada dia e classe de veículo. Uma definição de intervalos de carregamento para cada tipo de eixo é apresentada a seguir.

- a) eixos simples (3.000 lb⁹ a 41.000 lb em intervalos de 1.000 lb);
- b) eixos tandem (6.000 lb a 82.000 lb em intervalos de 2.000 lb);
- c) tandem triplo (12.000 lb a 102.000 lb em intervalos de 3.000 lb).

A Figura 7 (capítulo 2, página 21), apresentou anteriormente a tela correspondente aos Fatores de Distribuição de Cargas de Eixo. O ME-PDG apresenta arquivos de *default* com Fatores de Distribuição de Cargas de Eixo, que podem ser empregadas em análises de nível 3.

No presente estágio da pesquisa, para a realização das análises do efeito de sobrecarga nos parâmetros de desempenho do pavimento flexível da Freeway, os arquivos de *default* apresentados pelo ME-PDG sofreram as alterações seguintes.

Para considerar uma condição de tráfego sem sobrecarga:

- Todas as cargas de eixo simples superiores a 24.000 lb foram consideradas como sendo iguais a 24.000 lb¹⁰;
- Todas as cargas de eixo tandem duplo superiores a 40.000 lb foram consideradas como sendo iguais a 40.000 lb¹¹;
- Todas as cargas de eixo tandem triplo superiores a 60.000 lb foram consideradas como sendo iguais a 60.000 lb¹².

⁹1 lb (libra ou pound) equivale aproximadamente a 0,454 kgf.

¹⁰24.000 lb \cong 10,75 tf (no Brasil, carga máxima legal com tolerância para os eixos simples)

¹¹40.000 lb \cong 18,28 tf (no Brasil, carga máxima legal com tolerância para os eixos tandem duplos)

¹²60.000 lb \cong 27,41 tf (no Brasil, carga máxima legal com tolerância para os eixos tandem triplos)



Para considerar uma condição de tráfego com sobrecarga:

- Todas as cargas de eixo simples inferiores a 6.000 lb foram consideradas como sendo iguais a 39.000 lb¹³;
- Todas as cargas de eixo tandem duplo inferiores a 10.000 lb foram *consideradas como sendo iguais a 65.000 lb¹⁴;
- Todas as cargas de eixo tandem triplo inferiores a 10.000 lb foram consideradas como sendo iguais a 102.000 lb¹⁵.

5.1.3 Dados de Clima

Importante dado de entrada para o software ME-PDG são as características climáticas. Como a base de dados requerida é de alto nível de complexidade para sua composição e somente disponibilizado até o momento para os estados norte-americanos, foram feitas considerações baseadas no banco disponível. Os dados das estações meteorológicas escolhidos foram aqueles que melhor representaram as condições de temperatura média mensal e total de chuva acumulada no ano das cidades de Porto Alegre e Osório. Savannah, do estado norte-americano da Georgia, foi a cidade escolhida para representação da BR-290/RS.

Também se fixou em 3 m (10 ft) a profundidade do Lençol Freático, contado a partir do topo da Camada Final de Terraplenagem.

5.1.4 Dados da Estrutura do Pavimento

O pavimento da ampliação da BR-290/RS apresenta uma estrutura que, como mostrado na Figura 21, consiste em:

- 60 cm de espessura de areia usada como reforço do subleito,
- 30 cm de espessura de material originado do britador primário aplicado na sub-base,

¹³ 39.000 lb \cong 17,50 tf (maior carga de eixo simples pesada nas balanças localizadas na Freeway)

¹⁴ 65.000 lb \cong 29,57 tf (maior carga de eixo tandem duplo pesada nas balanças da Freeway)

¹⁵ 102.000 lb é a maior carga de eixo tandem triplo considerada nos arquivos de *default*.

- 15 cm de espessura de brita graduada empregada como base e
- Revestimento com CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente).

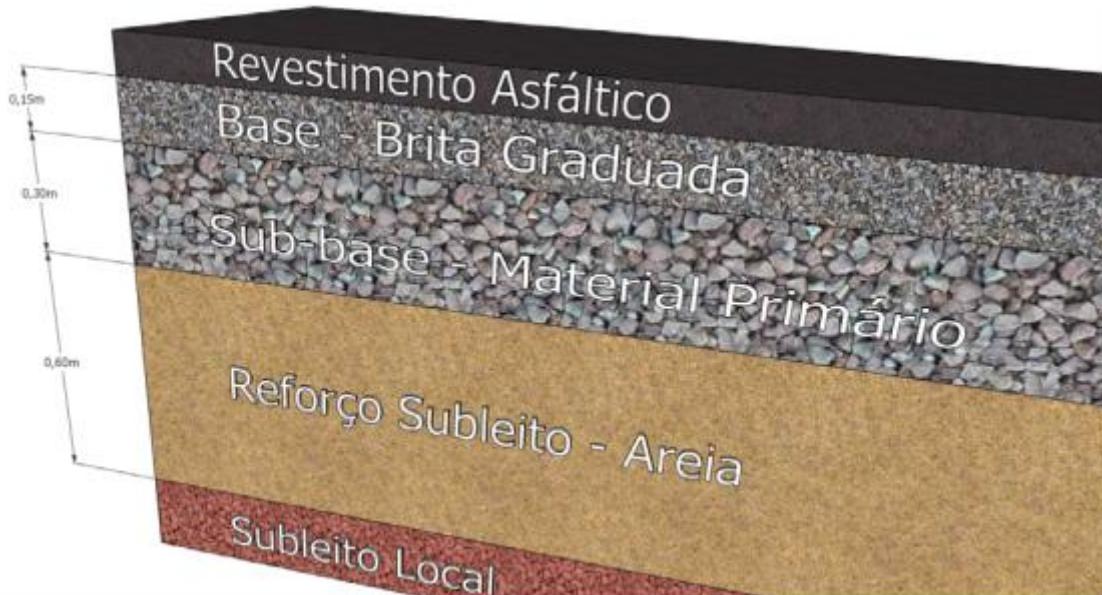


Figura 21:Estrutura do pavimento da BR-290/RS

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

Layer 1 -- Asphalt concrete

Material type:	Asphalt concrete
Layer thickness (in):	3.15

General Properties

<u>General</u>	
Reference temperature (F°):	77

Volumetric Properties as Built

Effective binder content (%):	12.6
Air voids (%):	7
Total unit weight (pcf):	151

<u>Poisson's ratio:</u>	0.35 (user entered)
-------------------------	---------------------

Thermal Properties

Thermal conductivity asphalt (BTU/hr-ft-F°):	0.67
Heat capacity asphalt (BTU/lb-F°):	0.23

Asphalt Mix



Cumulative % Retained 3/4 inch sieve:	0
Cumulative % Retained 3/8 inch sieve:	16.3
Cumulative % Retained #4 sieve:	38.9
% Passing #200 sieve:	7.8

Asphalt Binder

Option:	Conventional penetration grade
Viscosity Grade	Pen 60-70

A seguir apresentam-se as características das demais camadas.

Layer 2 -- Crushed Stone – Brita Graduada

Unbound Material:	Crushed stone
Thickness(in):	5.9

Strength Properties

Input Level:	Level 3
Analysis Type:	ICM inputs (ICM Calculated Modulus)
Poisson's ratio:	0.35
Coefficient of lateral pressure,Ko:	0.5
Modulus (input) (psi):	30000

ICM Inputs

<u>Gradation and Plasticity Index</u>	
Plasticity Index, PI:	1
Liquid Limit (LL)	6
Compacted Layer	No
Passing #200 sieve (%):	8.7
Passing #40	20
Passing #4 sieve (%):	44.7
D10(mm)	0.1035
D20(mm)	0.425
D30(mm)	1.306
D60(mm)	10.82
D90(mm)	46.19

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf):	127.2 (derived)
Specific gravity of solids, Gs:	2.70 (derived)
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr):	0.05054 (derived)
Optimum gravimetric water content (%):	7.4 (derived)
Calculated degree of saturation (%):	61.2 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters:	Default values
---------------------------------------------	----------------

Layer 3 -- Crushed Stone - Macadame

Unbound Material:	Crushed stone
Thickness(in):	11.81

Strength Properties



Input Level:	Level 3
Analysis Type:	ICM inputs (ICM Calculated Modulus)
Poisson's ratio:	0.35
Coefficient of lateral pressure,Ko:	0.5
Modulus (input) (psi):	35000

ICM Inputs

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI:	1
Liquid Limit (LL)	6
Compacted Layer	No
Passing #200 sieve (%):	8.7
Passing #40	20
Passing #4 sieve (%):	44.7
D10(mm)	0.1035
D20(mm)	0.425
D30(mm)	1.306
D60(mm)	10.82
D90(mm)	46.19

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf):	127.2 (derived)
Specific gravity of solids, Gs:	2.70 (derived)
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr):	0.05054 (derived)
Optimum gravimetric water content (%):	7.4 (derived)
Calculated degree of saturation (%):	61.2 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters: Default values

Layer 4 -- A-6 - Subleito

Unbound Material:	A-6
Thickness(in):	Semi-infinite

Strength Properties

Input Level:	Level 3
Analysis Type:	ICM inputs (ICM Calculated Modulus)
Poisson's ratio:	0.45
Coefficient of lateral pressure,Ko:	0.5
Modulus (input) (psi):	14000

ICM Inputs

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI:	16
Liquid Limit (LL)	33
Compacted Layer	No
Passing #200 sieve (%):	63.2
Passing #40	82.4
Passing #4 sieve (%):	93.5



D10(mm)	0.000285
D20(mm)	0.0008125
D30(mm)	0.002316
D60(mm)	0.05364
D90(mm)	1.922

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf):	107.9 (derived)
Specific gravity of solids, Gs:	2.70 (derived)
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr):	1.95e-005 (derived)
Optimum gravimetric water content (%):	17.1 (derived)
Calculated degree of saturation (%):	82.1 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters: Default values

Observa-se que a camada de reforço em areia foi eliminada porque o software alerta para o excesso de camadas, sempre que esse número excede 4. A experiência no emprego do ME-PDG mostra que se forem empregadas mais do que 4 camadas, o sistema pode apresentar falhas. Por essa mesma razão as duas camadas de ligante asfáltico foram unificadas.

5.1.5 Análises Realizadas com o ME-PDG

Com emprego do ME-PDG foram realizadas as seguintes análises:

- a) Comparações entre as evoluções dos parâmetros de desempenho, considerando-se a possibilidade de excesso de carga nos veículos e pressões de inflação dos pneus iguais a 120 e 150 psi;
- b) Influência da pressão de inflação nos pneus nas evoluções dos parâmetros de desempenho; com ou sem sobrecarga¹⁶;
- c) Efeitos combinados de ocorrência (ou não) de sobrecarga e de pressão de inflação dos pneus elevada (120 psi) ou extremamente elevada (150 psi) .

As análises para quantificar a influência da ocorrência de sobrecarga e de pressões muito elevadas de inflação de pneus, nos seguintes parâmetros :

- Irregularidade (IRI, em m/km) ao final do Período de Projeto (10 anos) – IRI₁₀;
- Afundamento nas Trilhas de Roda (mm), ao cabo de 10 anos – ATR₁₀;

¹⁶ Lembra-se que no item 4.1.2 deste Relatório definem-se as condições “com” e “sem” sobrecarga.



- Tempo (em meses) para ocorrer o ATR máximo admissível (5 mm¹⁷) – $t_{p/ATR=5mm}$;
- Tempo (em meses) para ocorrer trincamento de cima para baixo em 1% da extensão do trecho, na superfície e a 0,5" - $t_{p/TDCS} = 1\%$ e $t_{p/TDC0,5"} = 1\%$;
- Trincamento por fadiga (em %) ao final do Período de Projeto – TR₁₀

As Tabelas 20e 21 sintetizam os resultados dessas análises.

Tabela 20. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento da Freeway em função da ocorrência de sobrecarga (pressão nos pneus = 120 psi)

Sobrecarga	IRI ₁₀ (m/km)	ATR ₁₀ (mm)	$t_{p/ATR=5 mm}$ (mês)	$t_{p/TDCS} = 1\%$ e $t_{p/TDC0,5"} = 1\%$	TR ₁₀ (%)
Não	2,43	9,2	30	Na sup- 18 meses a 0,5" - 120 meses	6,1
Sim	3,42	14,3	13	Na sup.-2 meses a 0,5" - 25 meses	56,3

Tabela 21. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento da Freeway em função da ocorrência de sobrecara (pressão nos pneus 150 psi)

Sobrecarga	IRI ₁₀ (m/km)	ATR ₁₀ (mm)	$t_{p/ATR=5 mm}$ (mês)	$t_{p/TDCS}=1\%$	TR ₁₀ (%)
Não	2,49	10,6	26	Na sup- 14 meses a 0,5" - 120 meses	8,3
Sim	3,68	16,5	5	Na sup. - 2 meses a 0,5" - 22 meses	64,1

a) *Efeitos da ocorrência de sobrecarga e da pressão de inflação dos pneus na Irregularidade Longitudinal*

A influência da pressão dos pneus na evolução da Irregularidade Longitudinal não é significativa quando os veículos trafegam sem sobrecarga. Nessa condição, a Irregularidade Longitudinal ao cabo de 10 anos apresenta valores de 2,43 m/km e 2,49 m/km, para pressões de inflação de 120 psi e 150 psi, respectivamente. Contudo, quando os veículos trafegam com sobrecarga, a Irregularidade aumenta

¹⁷ Definido no Plano de Exploração da Rodovia (PER).

mais rapidamente, quanto maior for a pressão de inflação dos pneus. Isto é mostrado graficamente nas Figuras 22 e 23, a seguir.

Mais importante é observar que, se os veículos trafegam sem sobrecarga, o pavimento ao cabo de 10 anos não apresenta Irregularidade acima do limite do PER, qual seja 2,70 m/km. Já quando veículos trafegam com sobrecarga a Irregularidade máxima é atingida em aproximadamente 4 anos (49 e 41 meses para pressões de inflação de pneus de 120 e 150 psi, respectivamente).

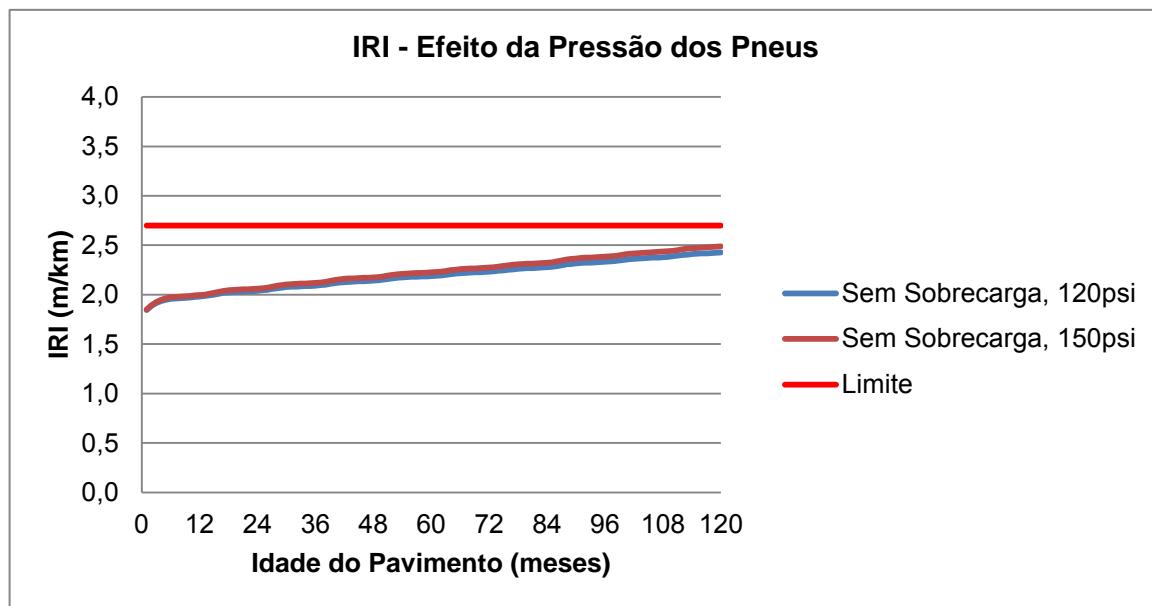


Figura 22: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando sem sobrecarga

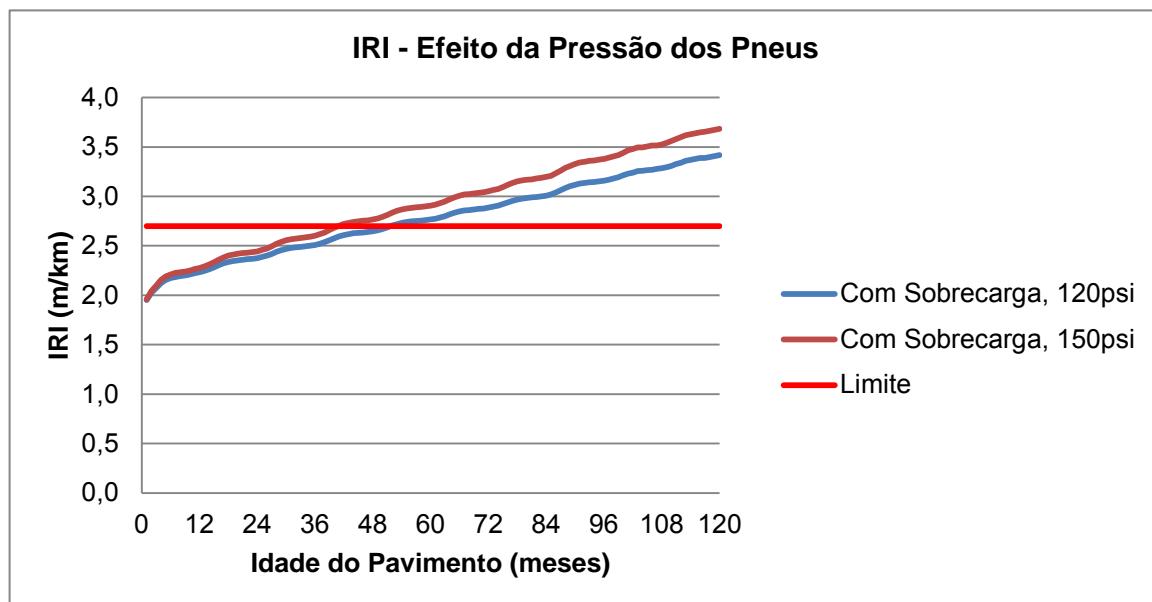


Figura 23: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando com sobrecarga

b) *Efeitos da ocorrência de sobrecarga e da pressão de inflação dos pneus nos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR)*

Observa-se nas Figuras 24 e 25 que o padrão de comportamento observado na evolução da Irregularidade Longitudinal se repete na evolução dos ATR.

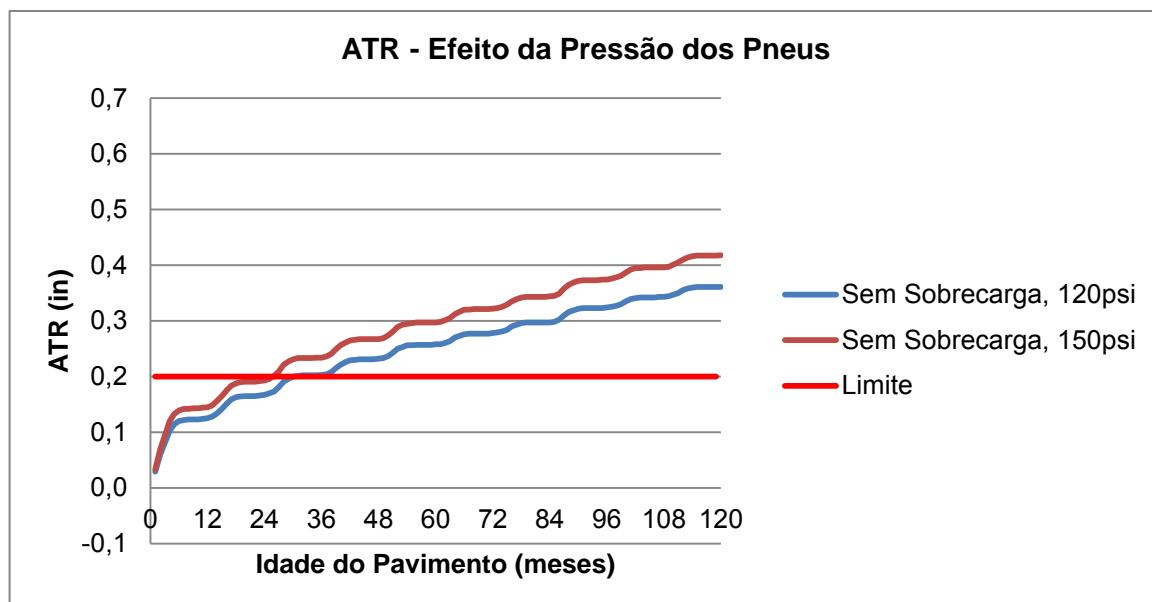


Figura 24: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR) em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando sem sobrecarga

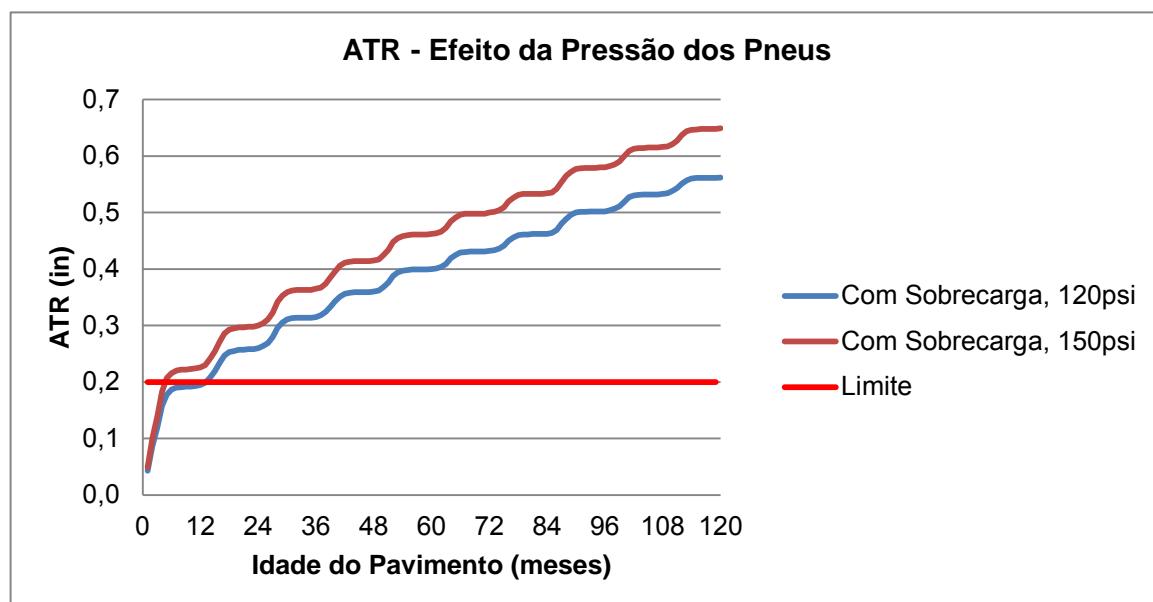


Figura 25: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR) em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando com sobrecarga

A ocorrência de sobrecarga resulta em valores de ATR 55% maiores ao cabo de 10 anos; passando de 9,2 mm para 14,3 mm, quando a pressão de inflação é de 120 psi, e de 10,6 mm para 16,5 mm quando a pressão é de 150 psi.

Os efeitos da pressão de inflação nos pneus são mais modestos, embora não desprezíveis (aproximadamente 15%).

O fato de que o limite de ATR no PER da Freeway seja alcançado muito antes do final Período de Projeto (10 anos) explicita o rigor do mesmo e expõe a suscetibilidade das misturas asfálticas características do sul do País ao acúmulo de deformações permanentes, considerando o tráfego pesado e as condições climáticas adversas (temperaturas elevadíssimas na superfície do pavimento¹⁸).

c) *Efeitos da ocorrência de sobrecarga e da pressão de inflação dos pneus nos Trincamentos de cima para baixo (Top-down cracking)*

¹⁸ Medidas de temperatura no interior do pavimento, realizadas ao longo de 2 anos na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos da UFRGS, mostraram que podem ser atingidos valores da ordem de 57°C, ou seja, muito acima do Ponto de Amolecimento de ligantes asfálticos convencionais produzidos no País.

Nos últimos anos tem-se observado de forma crescente a ocorrência de um tipo de trincas que se propagam de cima para baixo (ao contrário das tradicionais trincas por fadiga que geralmente iniciam na fibra inferior da camada asfáltica).

O trincamento de cima para baixo é um defeito cujas causas não estão plenamente estabelecidas, citando-se entre outras:

- as elevadas tensões cisalhantes causadas por veículos pesados (especialmente se os pneus apresentam elevadas pressões de inflação);
- o envelhecimento do ligante asfáltico da camada superior, resultando em elevadas tensões térmicas nas camadas asfálticas;
- o amolecimento da camada asfáltica superior (comparada com a camada inferior) devido às elevadas temperaturas na superfície do pavimento; e
- a segregação de agregados na mistura asfáltica.

As Figuras 26 e 27 permitem observar os efeitos da pressão de inflação de pneus e da ocorrência de sobrecarga na evolução dos Trincamentos de Cima para Baixo.

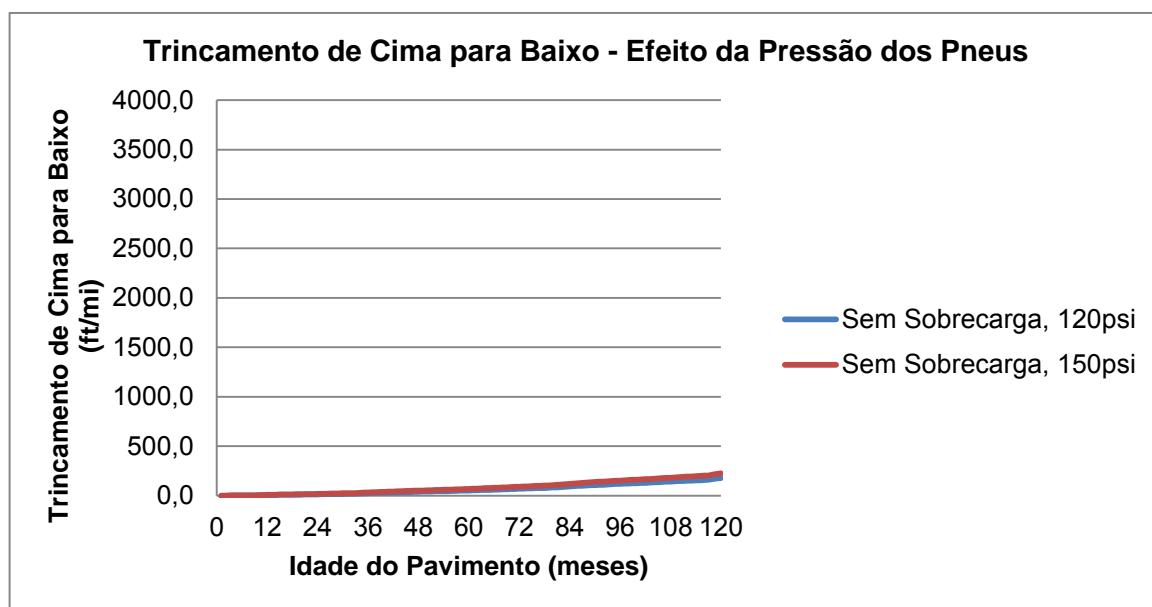


Figura 26: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando sem sobrecarga

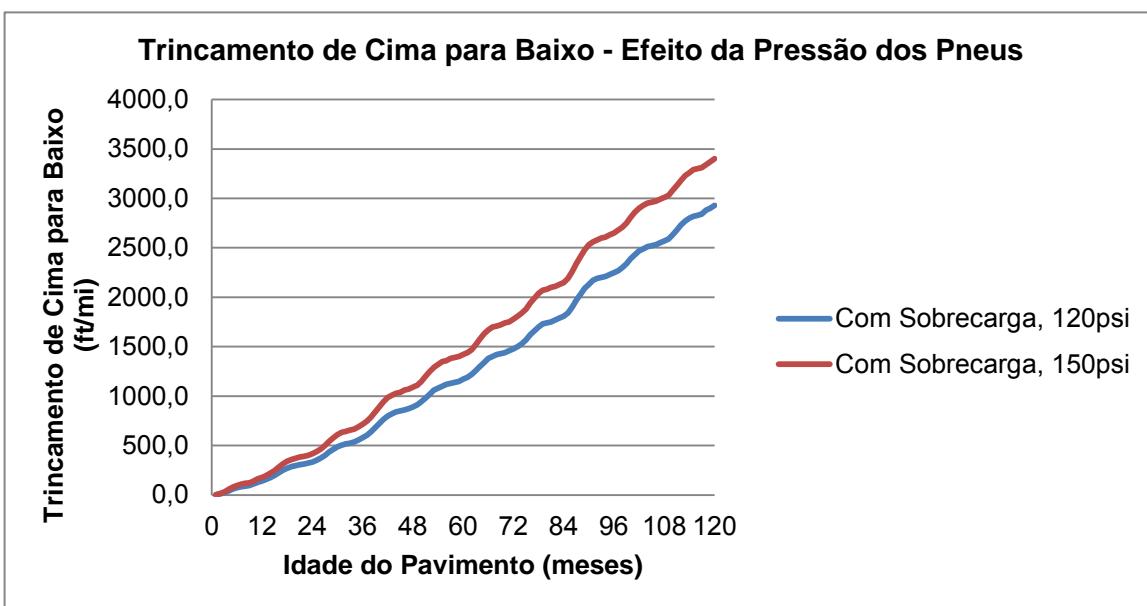


Figura 27: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo em função da pressão de inflação dos pneus, veículos trafegando com sobrecarga

Nos Estados Unidos considera-se aceitável um Trincamento de Cima para Baixo (*Top-Down Cracking – TDC*) de até 1000 ft/mi (189 m/km). Se os veículos trafegarem sem sobrecarga este valor não é atingido ao longo dos 10 anos; mas se houver sobrecarga o TDC alcança o valor limite aos 52 e 44 meses, com pressões de inflação de 120 e 150 psi, respectivamente.

É relevante observar que, se os veículos trafegam com sobrecarga, o TDC começa a manifestar-se tão logo o pavimento é aberto ao tráfego. Isto tem-se observado em pavimentos recentemente construídos na Região Sul do País, evidenciando que as tensões cisalhantes geradas por parte dos veículos comerciais excede a resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica.

d) Efeitos da ocorrência de sobrecarga e da pressão de inflação dos pneus nos Trincamentos por Fadiga (Bottom-Up Cracking)

O efeito da sobrecarga na evolução do Trincamento por Fadiga é dramático, como pode observar-se nas Figuras 28 e 29.

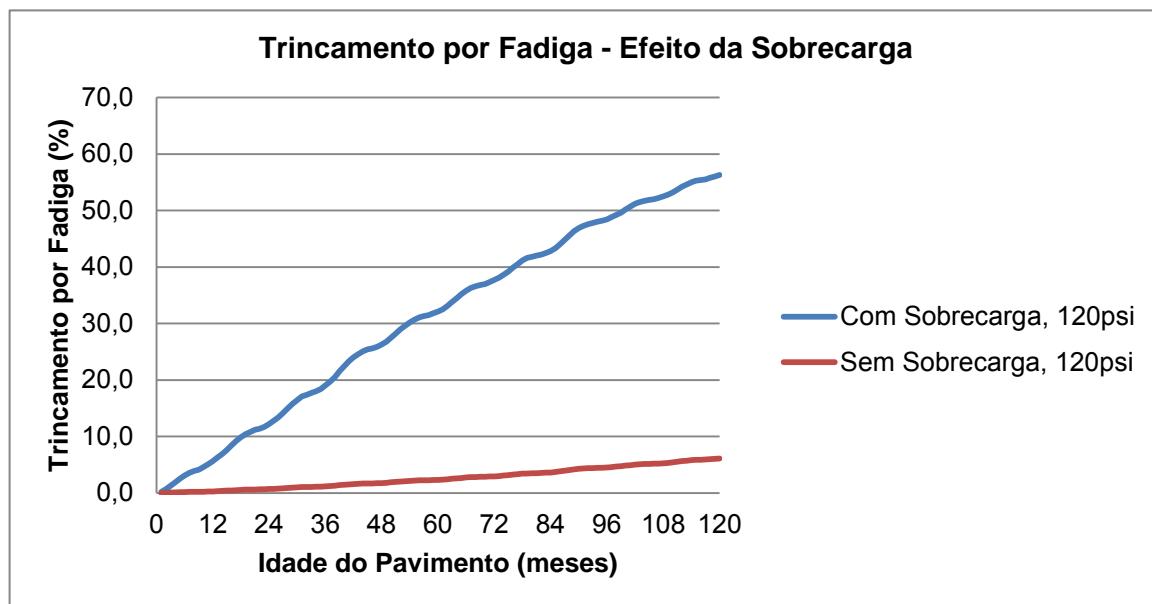


Figura 28: Evolução do Trincamento por Fadiga em função da sobrecarga, com pressão de inflação dos pneus igual a 120 psi

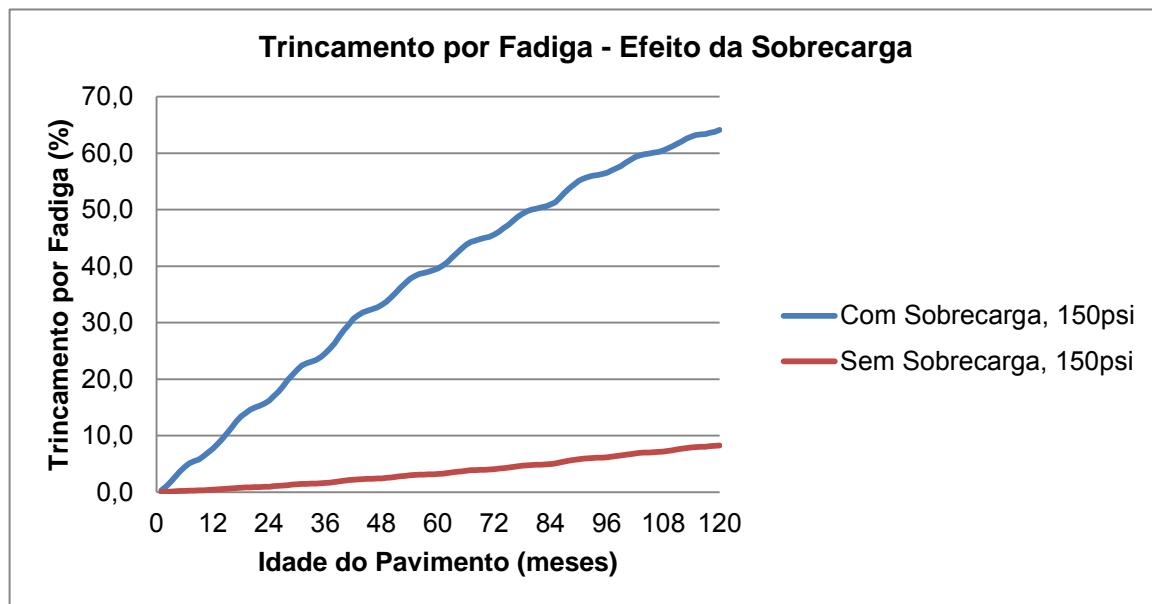


Figura 29: Evolução do Trincamento por Fadiga em função da sobrecarga, com pressão de inflação dos pneus igual a 150 psi

A ocorrência de sobrecarga aumenta o percentual de área trincada em 7,76 vezes quando a pressão de inflação é 150 psi e em 9,23 para a pressão de 120 psi.

Se não houver sobrecarga solicitando o pavimento, o percentual de área trincada, devido à fadiga, ao cabo de 10 anos seria inferior a 10%. Entretanto, se o pavimento



for solicitado por veículos com excesso de carga o valor limite de % de área trincada definido no PER (25%) seria alcançado entre 37 meses (pressão de inflação de 150 psi) e 44 meses (pressão de inflação de 120 psi), após a abertura da rodovia ao tráfego. Ou seja, o pavimento apresentaria forte trincamento por fadiga de 3 a 4 anos após sua entrada em operação.

Finalizando, se observa que o efeito da pressão de inflação dos pneus na Trincamento por Fadiga é mais significativa quando os veículos trafegam sem sobrecarga (35%) do que quando estão com excesso de carga (14%).

5.2BR-101/RS

5.2.1 Informações Gerais

As constantes de calibração utilizadas no software ME-PDG, foram as constantes sugeridas pelo próprio Guia – caracterizando uma análise em Nível 3. Contudo, incorporaram-se alguns aspectos do Nível 2, especialmente em termos da caracterização do tráfego (classificação de veículos, distribuição das diversas classes ao longo dos 12 meses do ano e distribuição horária ao longo do dia). A confiabilidade do projeto foi fixada em 90%.

.Os parâmetros base de análise foram:

- Porcentagem de área com trinca classe 2: $FC-2 \leq 25\%$;
- Afundamento de trilha de roda (F): $F \leq 7\text{mm}$; e
- Irregularidade Longitudinal: $QI \leq 35 \text{ contagens/km}$ (ou $IRI \leq 2,7 \text{ m/km}$).

5.2.2 Dados de Tráfego

Os dados de tráfego rodoviário nos Lotes 1 e 3 da BR-101/RS, a seguir apresentados, foram obtidos no Estudo de Tráfego apresentado no 1º Relatório desta Pesquisa.

Lote 1 - AADTT ou média anual do tráfego diário de caminhões igual a **4.835**.

Lote 3- AADTT igual a **4.467**



Considerou-se, também que a distribuição de veículos por sentido é igual; isto é 50% dos veículos trafegando em cada sentido da rodovia (Osório – Porto Alegre e Porto Alegre – Osório). Ainda, seguindo recomendações da AASHTO, considerou-se que a faixa mais trafegada receberá 60% dos veículos comerciais.

5.2.3 Dados de Clima

Os dados das estações meteorológicas escolhidos foram aqueles que melhor representaram as condições de temperatura média mensal e total de chuva acumulada no ano das cidades de Osório e Torres. Savannah, do estado norte-americano da Georgia, foi a cidade escolhida para representação da BR-290/RS.

Também se fixou em 3 m (10 ft) a profundidade do Lençol Freático, contado a partir do topo da Camada Final de Terraplenagem.

5.2.4 Estruturas dos Pavimentos

As estruturas dos pavimentos dos Lotes 1 e 3 da BR-290/RS, no trecho Torres – Osório diferem fundamentalmente na espessura total de camadas asfálticas. Enquanto no Lote 1 as camadas asfálticas totalizam 15 cm, no Lote 3 são 17 cm.

As demais camadas são semelhantes nos pavimentos dos dois lotes:

- Base de brita graduada de 15 cm de espessura
- Sub-base de macadame seco, com 20 cm de espessura
- CFT¹⁹ constituída por 20 cm de rachão e 40 cm de solo de jazida (A-2-4)

5.2.5 Análises Realizadas com o ME-PDG

Com emprego do ME-PDG foram realizadas as seguintes análises:

- d) Previsão de desempenho dos pavimentos dos Lotes 1 e 3, considerando-se uma taxa de crescimento anual do tráfego de 3% e 5%;
- e) Comparações entre as evoluções dos parâmetros de desempenho, considerando-se pressões de pneus de 120 psi e 150 psi.

¹⁹ CFT é a sigla de Camada Final de Terraplenagem.



As análises realizada para os pavimentos dos Lotes 1 e 3 objetivaram quantificar a evolução dos seguintes parâmetros, em função da taxa de crescimento do tráfego:

- Irregularidade (IRI, em m/km) ao final do Período de Projeto (10 anos) – IRI₁₀;
- Afundamento nas Trilhas de Roda (mm), ao final desse Período – ATR₁₀;
- Tempo para ocorrer o ATR máximo admissível (7 mm) – t_{p/ATR=7mm};
- Tempo (em meses) para ocorrer trincamento de cima para baixo em 1% da extensão do trecho, na superfície e a 0,5" - t_{p/TDCS = 1%} e t_{p/TDC0,5" = 1%};
- Trincamento por fadiga (em %) ao final dos 10 anos – TR₁₀

As Tabelas 22 e 23 sintetizam os resultados das análises para os pavimentos dos Lotes 1 e 3, respectivamente.

Tabela 22. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 1 em função da taxa de crescimento anual do tráfego comercial

t (%)	IRI ₁₀ (m/km)	ATR ₁₀ (mm)	t _{p/ATR=7mm} (mês)	t _{p/TDCS = 1%} e t _{p/TDC0,5" = 1%}	TR ₁₀ (%)
3	2,44	13,0	33	Na sup.- 5 meses A 0,5" - 9 meses	21,0
5	2,46	13,5	33	Na sup.- 5 meses A 0,5" - 9 meses	21,5

Tabela 23. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 3 em função da taxa de crescimento anual do tráfego comercial

t (%)	IRI ₁₀ (m/km)	ATR ₁₀ (mm)	t _{p/ATR=7mm} (mês)	t _{p/TDCS=1%}	TR ₁₀ (%)
3	2,32	9,8	67	Na sup. - 8 meses A 0,5" - 20 meses	2,2
5	2,37	10,2	60	Na sup. - 8 meses A 0,5" - 20 meses	2,3

As Figuras 30 a 33 apresentam as evoluções dos parâmetros de desempenho do pavimento do Lote 1, considerando-se taxas de crescimento do tráfego de 3 e 5%.

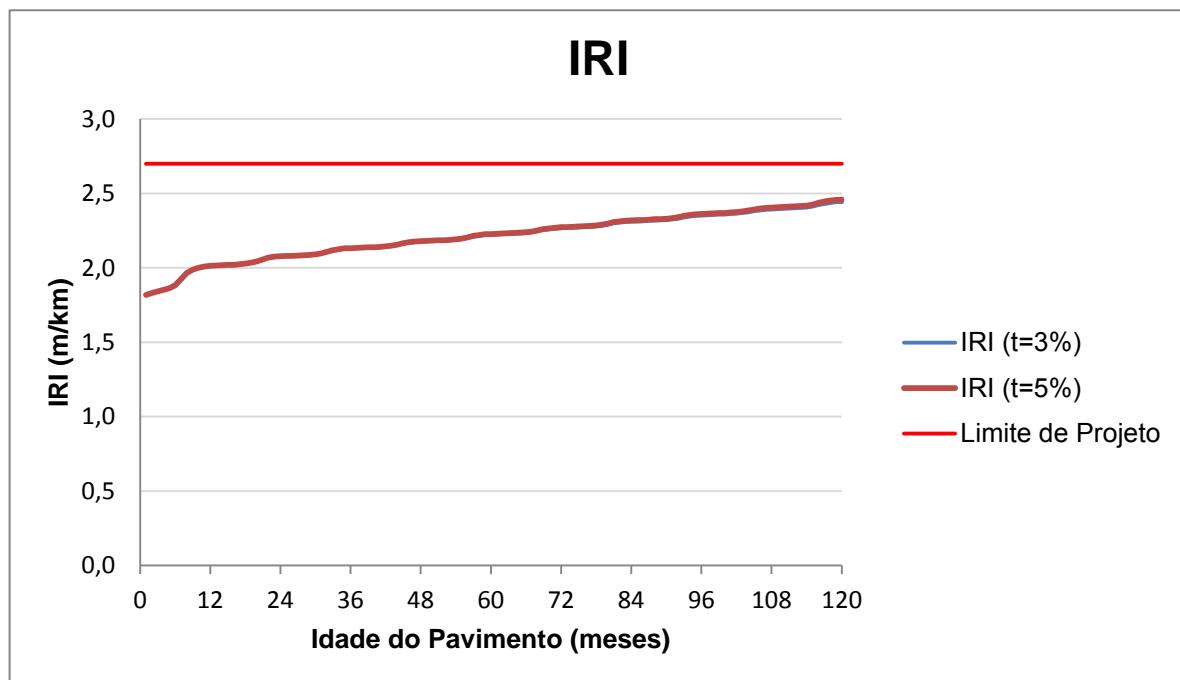


Figura 30: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) no pavimento do Lote 1

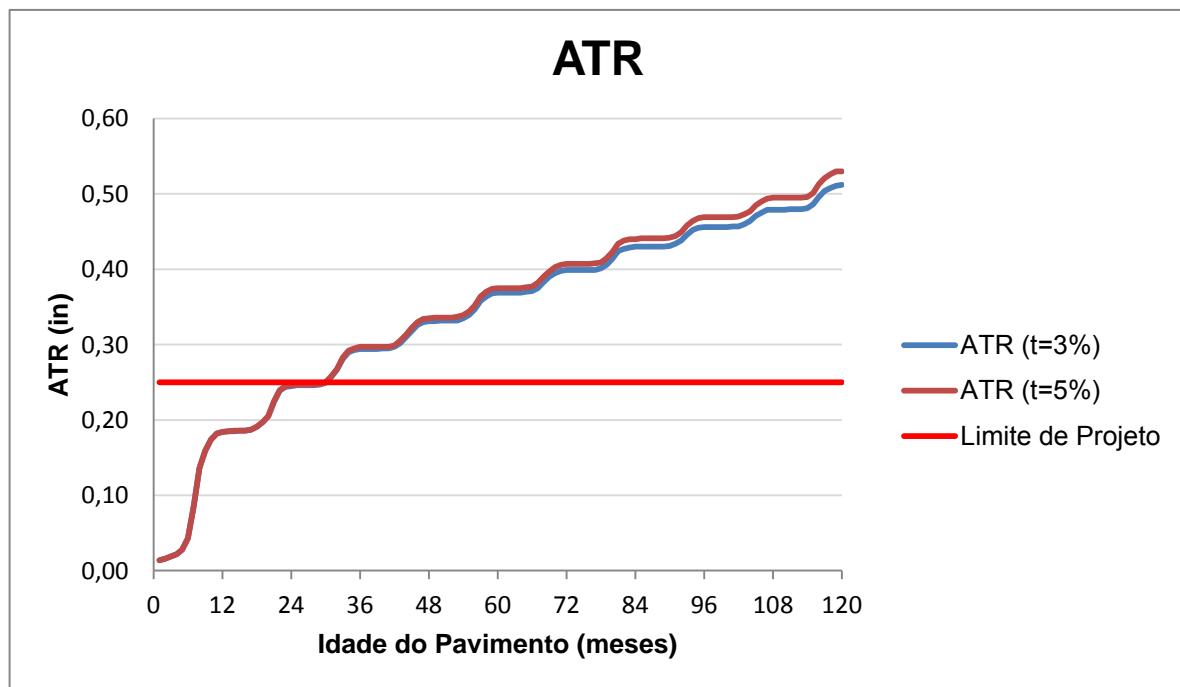


Figura 31: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 1

Trincamento por Fadiga

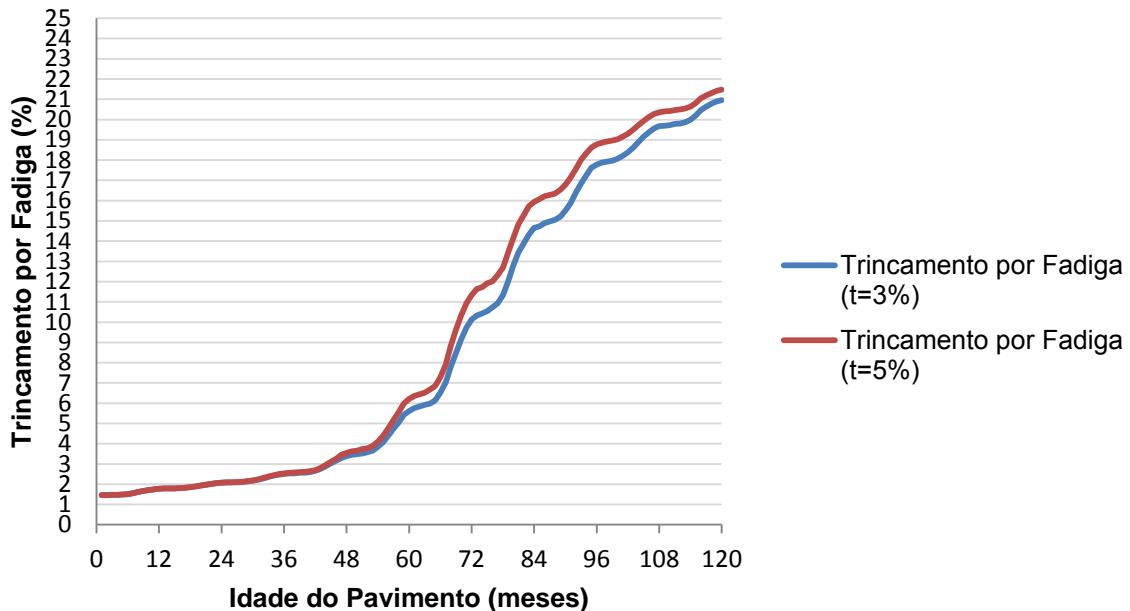


Figura 32: Evolução do Trincamento por Fadiga (TR em %) do pavimento do Lote 1

Trincamento de Cima para Baixo

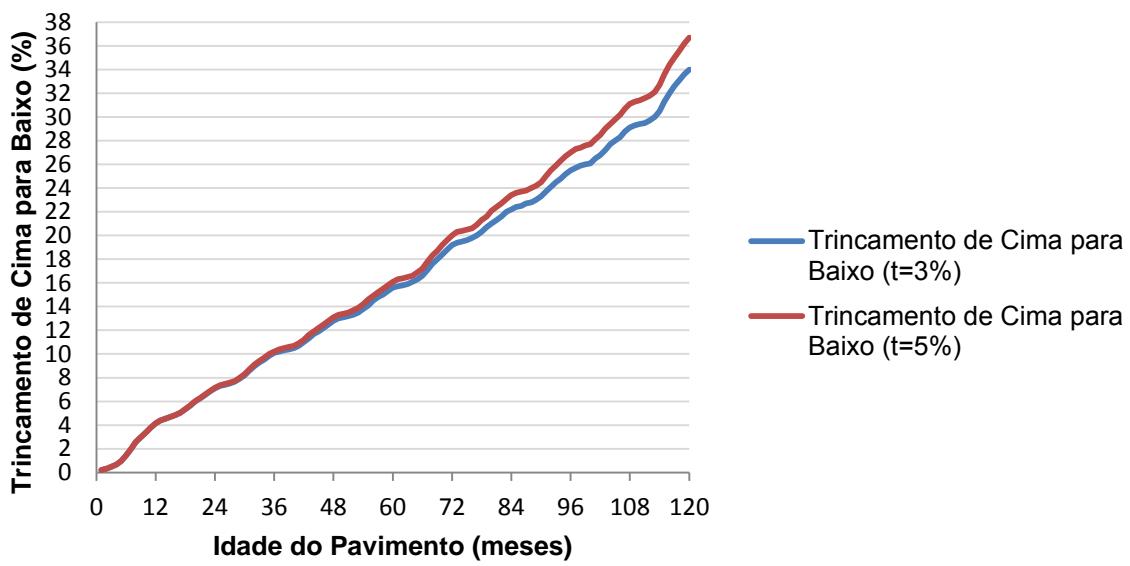


Figura 33: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (TDC em %) do pavimento do Lote 1

As Figuras 34 a 37 apresentam as evoluções dos parâmetros de desempenho do pavimento do Lote 3, considerando-se taxas de crescimento do tráfego de 3 e 5%.

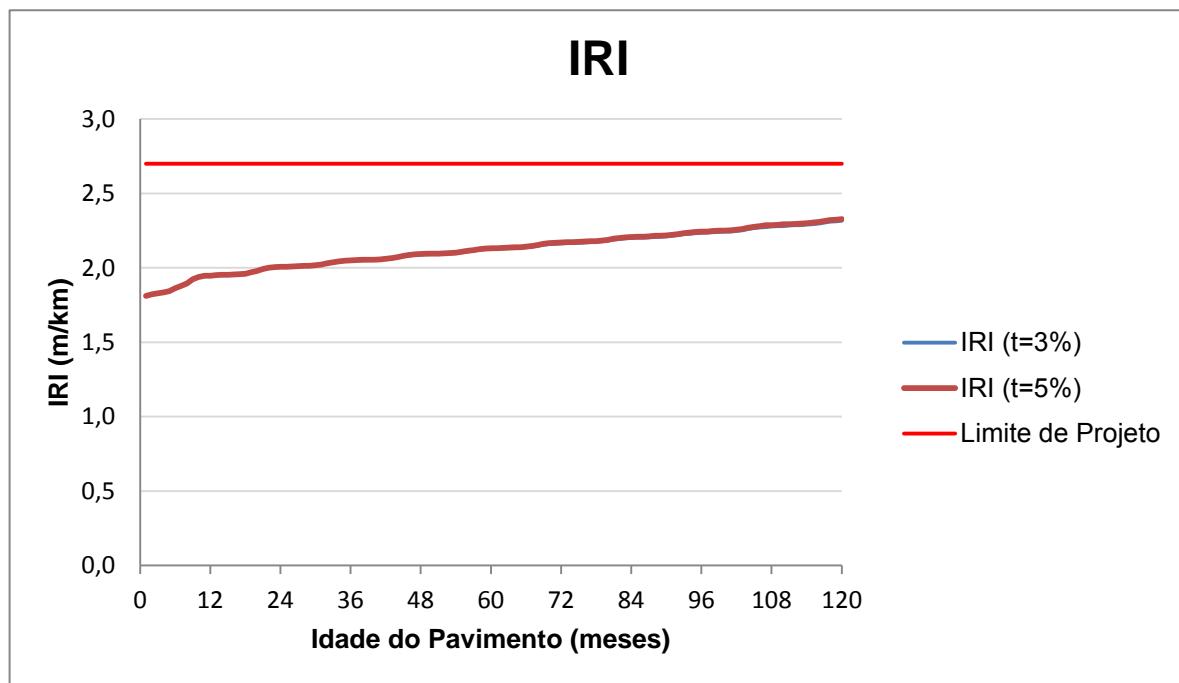


Figura 34: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) no pavimento do Lote 3

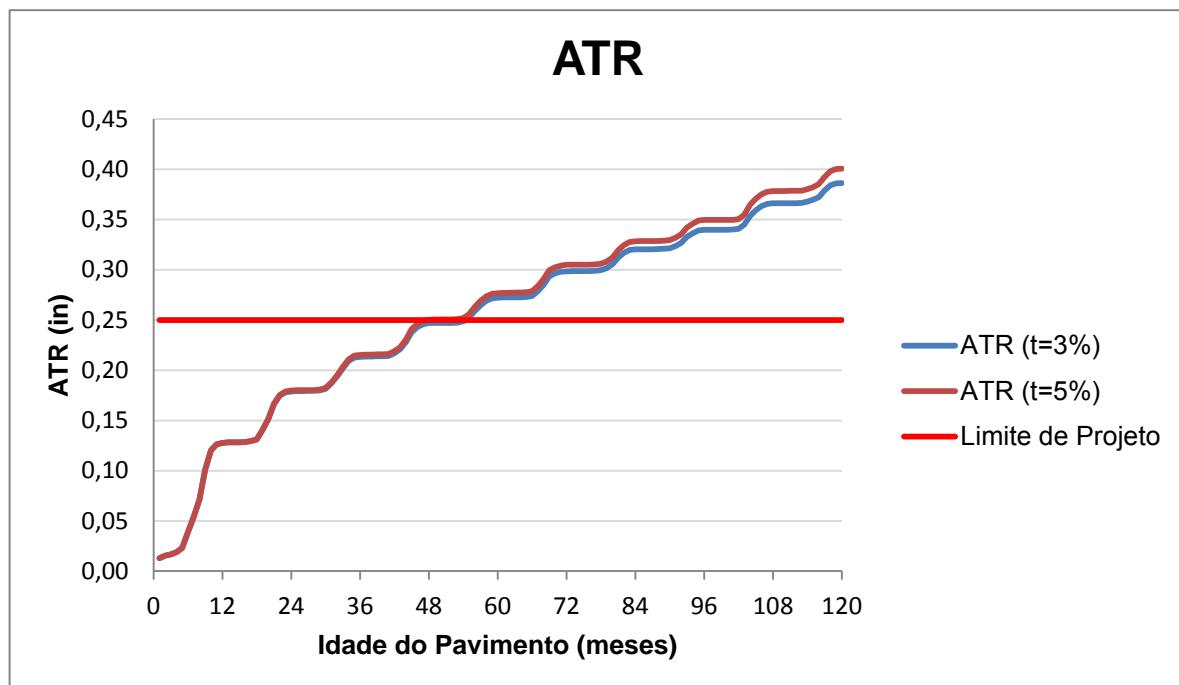


Figura 35: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 3

Trincamento por Fadiga

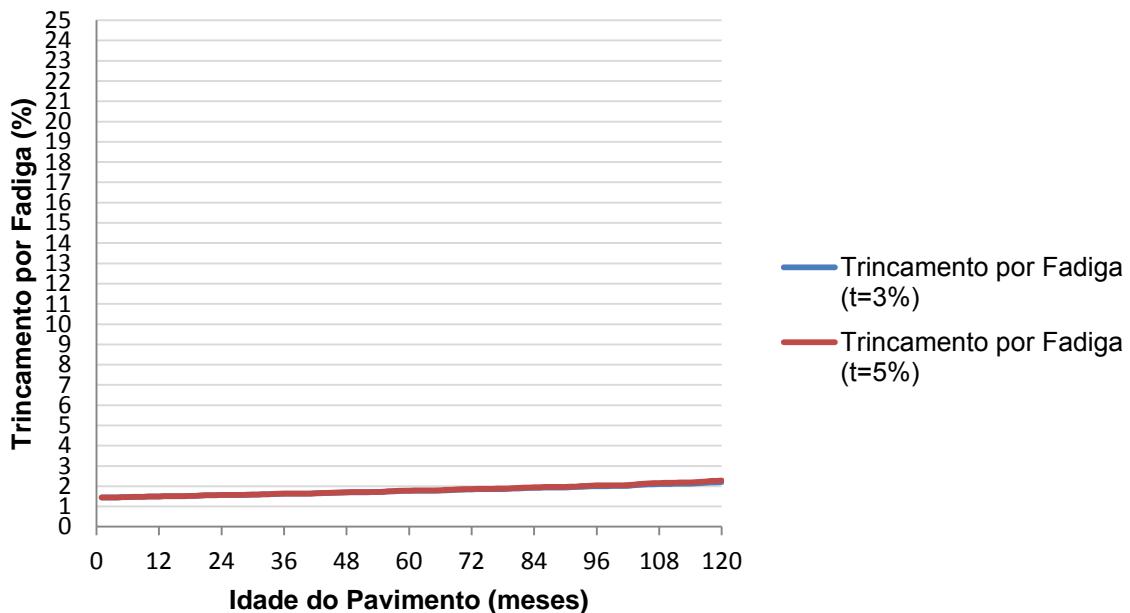


Figura 36: Evolução do Trincamento por Fadiga (TR em %) do pavimento do Lote 3

Trincamento de Cima para Baixo

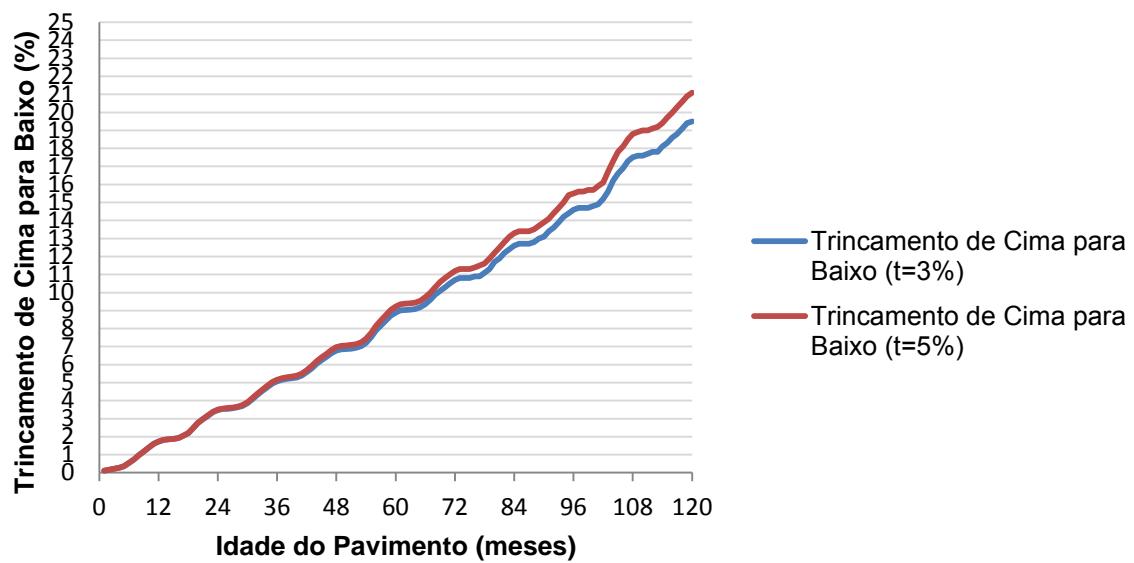


Figura 37: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (TDC em %) do pavimento do Lote 3

Comentários: Os resultados das análises apresentados nas Tabelas 22 e 23 bem como nas Figuras 30 a 37, mostram que:



- a) As degradações (Irregularidade Longitudinal, ATR, Trincamento por Fadiga e Trincamento de Cima para Baixo) se processarão mais rapidamente no pavimento do Lote 1 do que no pavimento do Lote 3. O pavimento do Lote 1 sofrerá trincamento por fadiga e ATR em magnitudes muito superiores às que experimentará o pavimento do Lote 3. Isso tem respaldo lógico, pois o volume de tráfego previsto para o Lote 1 é maior e também porque a espessura total de camadas asfálticas é menor (15 cm no Lote 1; 17 cm no Lote 3).
- b) Nos dois pavimentos, o Trincamento de cima para baixo (top-down cracking - TDC) se manifestará já nos primeiros meses de abertura ao tráfego, tanto na superfície quanto à profundidade de 12,7 mm (0,5");
- c) A taxa de crescimento anual do tráfego comercial (3 ou 5%) não parece afetar de forma significativa a evolução dos parâmetros de desempenho. Os efeitos são mais claros quando se analisam os ATR e o TDC, mas são imperceptíveis quando se analisa a Irregularidade Longitudinal e o Trincamento por Fadiga.

Conforme já exposto, ainda não há balanças em operação na BR-101/RS. Entretanto, é grande a suspeita de que muitos veículos trafegam com excesso de carga. De fato, tem-se observado que um percentual elevado (cerca de 40%) dos veículos que trafegam pela Freeway (BR-290/RS), o fazem depois das 18 horas²⁰ para evitar a multa na balança instalada no km 65 dessa Rodovia.

Não sendo possível, ainda, avaliar os efeitos dessa provável sobrecarga no desempenho dos pavimentos dos Lotes 1 e 3, optou-se por aumentar a pressão de inflação dos pneus (dado de entrada do ME-PDG) em 25%. Os resultados das análises com o ME-PDG são apresentados nas Tabelas 24 e 25. Como a taxa de crescimento do tráfego não afetou significativamente o desempenho dos pavimentos, os resultados referem-se apenas à taxa de 5%.

²⁰ O horário de funcionamento da balança é das 8 às 18 horas.



Tabela 24.Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 1em função da pressão de inflação nos pneus

Pressão nos pneus (psi)	IRI ₁₀ (m/km)	ATR ₁₀ (mm)	t _{p/ATR=7mm} (mês)	t _{p/TDCS} = 1% t _{p/TDC0,5"} = 1%;	TR ₁₀ (%)
120	2,46	13,5	33	Na sup.- 5 meses A 0,5" - 9 meses	21,5
150 ²¹	2,54	16,5	21	Na sup.- 5 meses A 0,5" - 9 meses	22,2

Tabela 25.Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 3em função da pressão de inflação nos pneus

Pressão nos pneus (psi)	IRI ₁₀ (m/km)	ATR ₁₀ (mm)	t _{p/ATR=7mm} (mês)	t _{p/TDCS=1%} t _{p/TDC0,5"} = 1%;	TR ₁₀ (%)
120	2,37	10,2	60	Na sup. - 8 meses A 0,5" - 20 meses	2,3
150	2,39	12,8	44	Na sup. - 7 meses A 0,5" - 19 meses	2,4

As Figuras 38 a 41, a seguir, apresentam as evoluções dos parâmetros de desempenho do pavimento do Lote 1, considerando-se as duas pressões de inflação dos pneus. Nessas figuras o termo “sobrecarga” significa apenas pressão de inflação de pneus de 150 psi e “carga nominal” pressão de inflação de 120 psi.

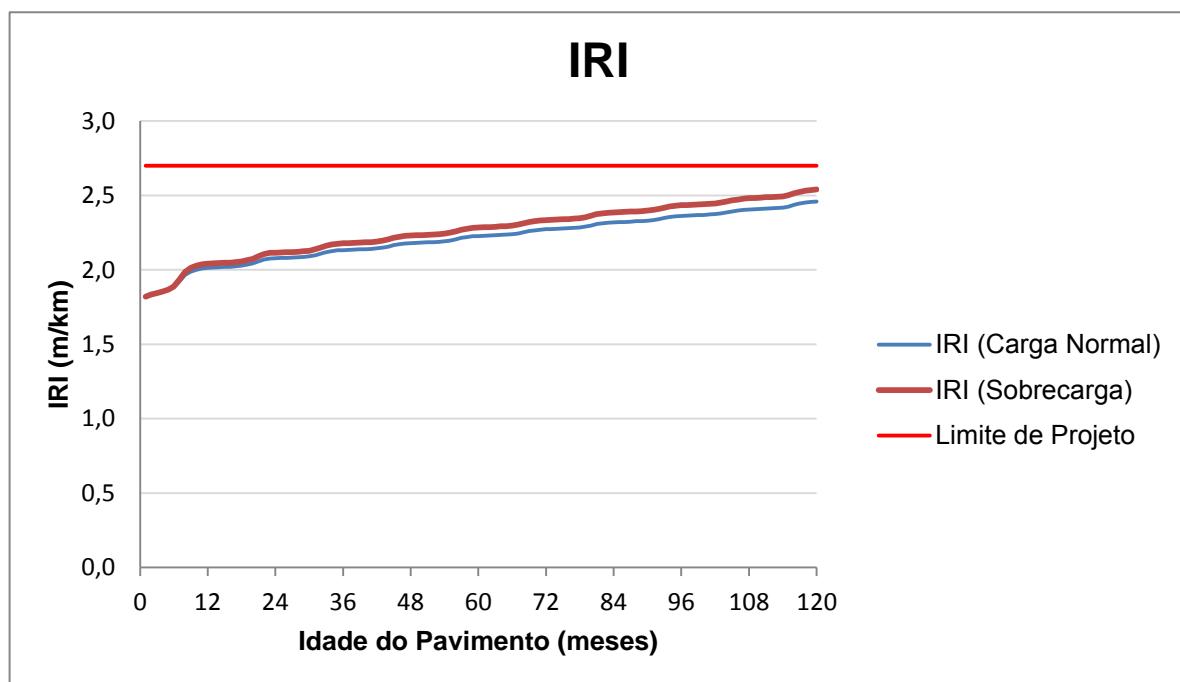


Figura 38: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) no pavimento do Lote 1em função da pressão de inflação nos pneus

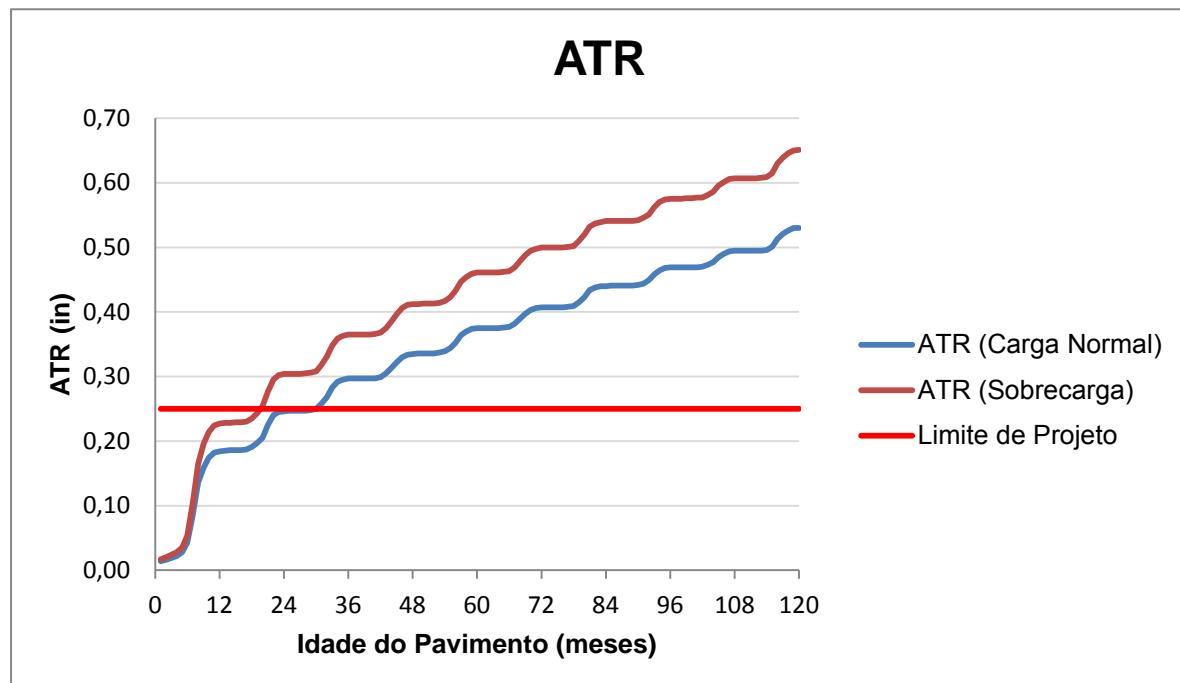


Figura 39: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 1em função da pressão de inflação nos pneus

Trincamento por Fadiga

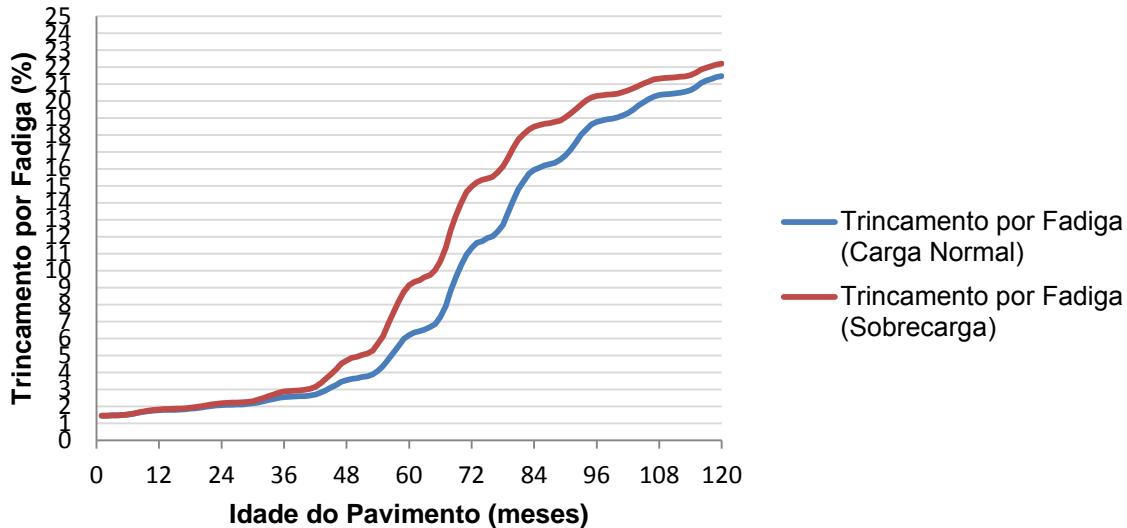


Figura 40: Evolução do Trincamento por Fadiga (%) no pavimento do Lote 1 em função da pressão de inflação nos pneus

Trincamento de Cima para Baixo

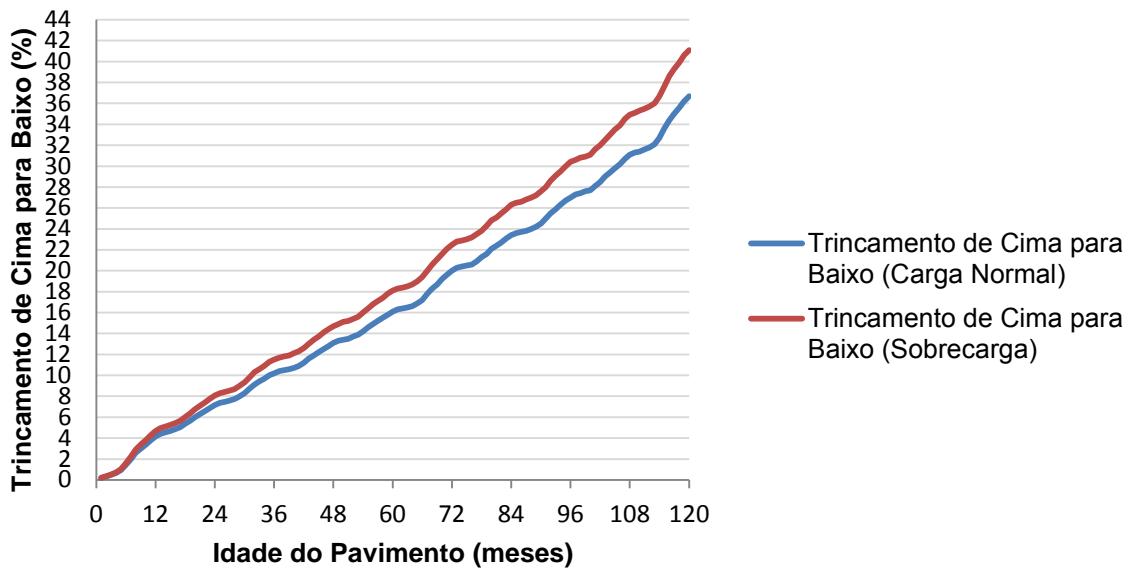


Figura 41: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo no pavimento do Lote 1 em função da pressão de inflação nos pneus

As Figuras 42 a 45, a seguir, apresentam as evoluções dos parâmetros de desempenho do pavimento do Lote 3, em função da pressão de inflação dos pneus.

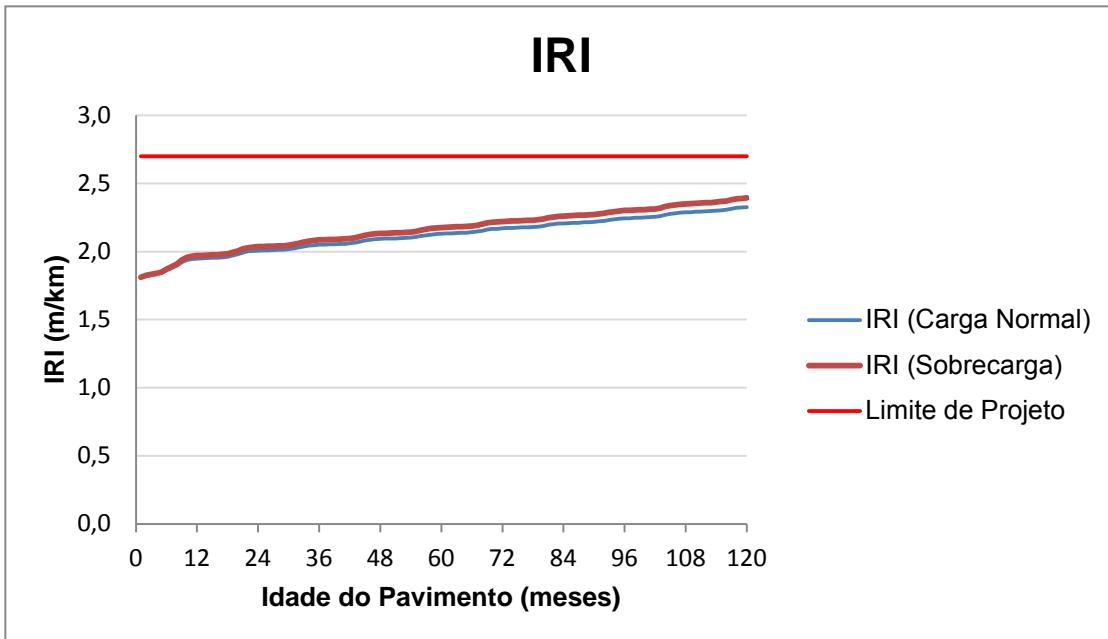


Figura 42: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI em m/km) no pavimento do Lote 3 em função da pressão de inflação nos pneus

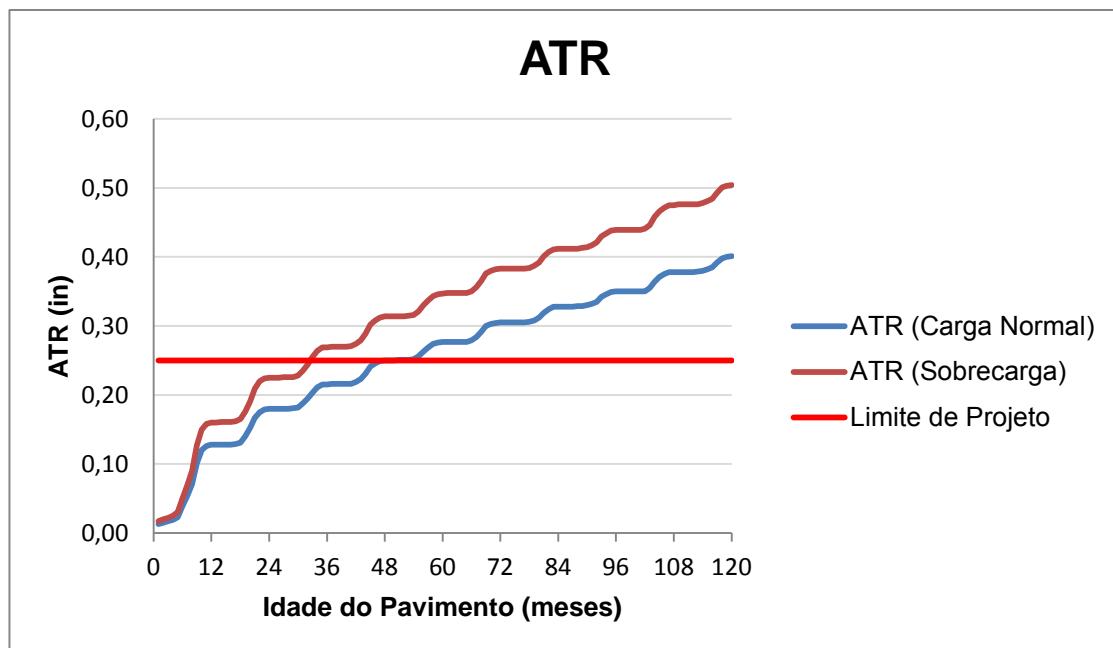


Figura 43: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 3 em função da pressão de inflação nos pneus

Trincamento por Fadiga

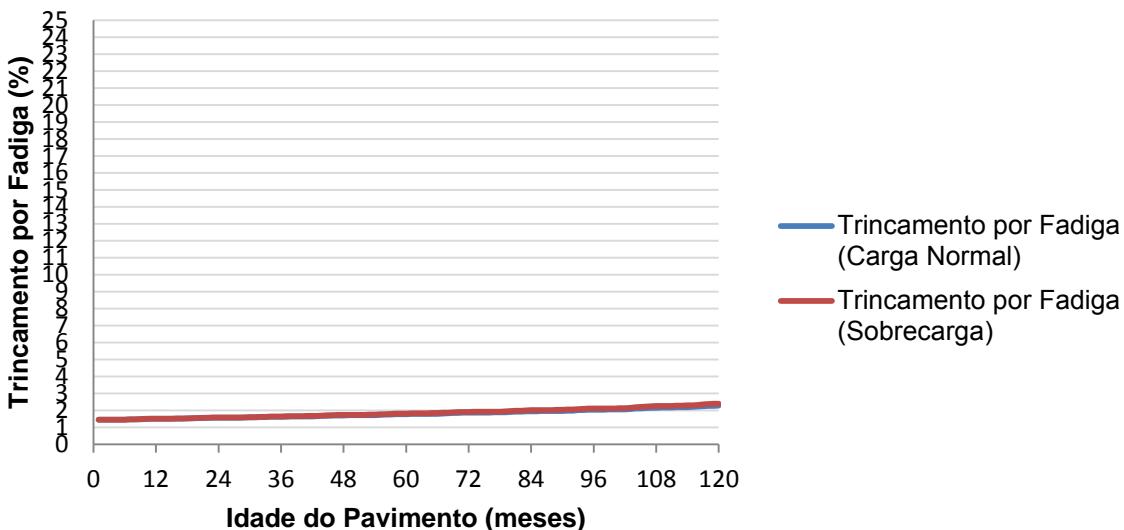


Figura 44: Evolução do Trincamento por Fadiga (%) no pavimento do Lote 3em função da pressão de inflação nos pneus

Trincamento de Cima para Baixo

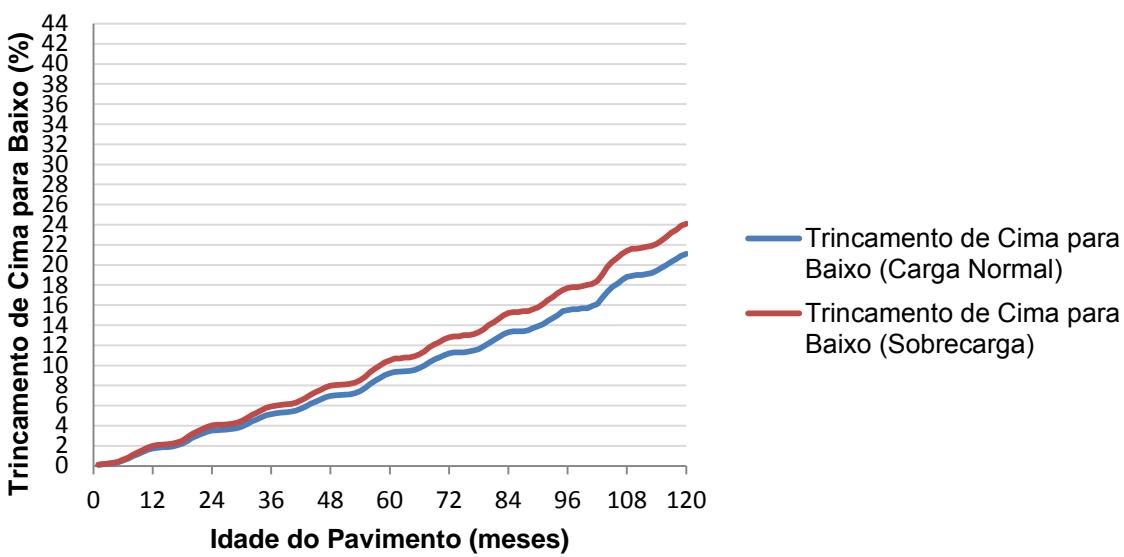


Figura 45: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (%) no pavimento do Lote 3em função da pressão de inflação nos pneus

Comentários: Os resultados das análises apresentados nas Tabelas 22 a 25, bem como nas Figuras 38 a 45 mostram que:



- a) Os efeitos da pressão de inflação nos parâmetros de desempenho analisados não são desprezíveis no pavimento do Lote 3 e são muito significativos nos parâmetros de desempenho do pavimento do Lote 1.
- b) As elevadas pressões de inflação são mais nocivas quando se analisa a evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda, os quais sofrem incrementos da ordem de 25% e aceleram o processo de degradação dos pavimentos.
- c) Em função do mais elevado volume de carga e da estrutura mais delgada do pavimento do Lote 1, comparado com o do Lote 3, os efeitos da pressão de inflação nos pneus são mais notáveis no primeiro.



6. ANÁLISE DOS EFEITOS DE SOBRECARGAS NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS DA OBRA DE DUPLICAÇÃO DA BR-101/RS

6.1 INFORMAÇÕES GERAIS

Os dados de tráfego rodoviário nos Lotes 1 e 3 da BR-101/RS, a seguir apresentados, foram obtidos no Estudo de Tráfego apresentado no capítulo III deste Relatório.

Os parâmetros base de análise foram:

- Porcentagem de área com trinca classe 2: $FC-2 \leq 25\%$;
- Afundamento de trilha de roda (F): $F \leq 7 \text{ mm}$; e
- Irregularidade Longitudinal: $IRI \leq 2,7 \text{ m/km}$ (ou $QI \leq 35 \text{ contagens/km}$).

A confiabilidade do projeto foi fixada em 90%.

Os sistemas de classificação utilizados pelo software para identificação do tipo de tráfego (veículos 1 a 13) são do FHWA (*Federal Highway Administration*) e do LTPP (*Long Term Pavement Performance*).

Como valores das Médias Diárias Anuais de Tráfego Comercial (AADTT - Annual Average Daily Truck Traffick) foram considerados: 4.835 veículos comerciais por dia para o Lote 1 e 4.467 para o Lote 3; dados resultantes do Estudo de Tráfego.

A classificação de veículos comerciais foi feita seguindo os padrões empregados pela Concessionária da Freeway (CONCEPA) na cobrança de pedágios. Na Tabela 26, a seguir, apresentam-se os percentuais de veículos comerciais das classes empregadas pela CONCEPA e as classes equivalentes segundo o ME-PDG. Lembra-se que a descrição visual das classes de veículos do ME-PDG foi apresentada na Figura 5.



Tabela 26.Percentuais de veículos comerciais de acordo com as classes empregadas pela CONCEPA e pelo ME-PDG

Classe de veículo segundo a CONCEPA	Classe de veículo equivalente no ME-PDG	% de veículos na classe
2	5	27,22
4	4, 6 e 8	30,89
6	7	5,78
7	9	18,64
8	10	12,91
11, 12, 13, 14 e 15	13	4,56

Os dados disponibilizados pela CONCEPA também permitiram definir os percentuais de veículos comerciais que trafegam sobre a rodovia, de hora em hora. Esses dados são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27.Distribuição horária do tráfego comercial²²

Meia-noite	1,8%	Meio-dia	4,6%
1:00 am	1,3%	1:00 pm	4,9%
2:00 am	1,1%	2:00 pm	5,6%
3:00 am	1,0%	3:00 pm	5,7%
4:00 am	1,4%	4:00 pm	6,0%
5:00 am	2,7%	5:00 pm	6,4%
6:00 am	5,0%	6:00 pm	6,4%
7:00 am	6,2%	7:00 pm	5,5%
8:00 am	5,8%	8:00 pm	4,3%
9:00 am	5,6%	9:00 pm	3,4%
10:00 am	5,5%	10:00 pm	2,6%
11:00 am	5,2%	11:00 pm	2,0%

²² A hora indicada é a do início do período.



Além disso, a disponibilização dos dados por parte da Concessionária permitiu definir Fatores de Ajuste de Tráfego para os veículos comerciais, conforme a classe do ME-PDG.

Como o ME-PDG analisa os efeitos combinados do tráfego (representado pelos Fatores de Ajuste de Tráfego) e do clima, foi necessário defasjar os fatores de ajuste em 6 meses, de forma a manter a lógica do ME-PDG. Os Fatores, já defasados em 6 meses, são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28.Fatores Mensais de Ajuste de Tráfego

Mês	Classe de Veículo									
	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7	Classe 8	Classe 9	Classe 10	Classe 11	Classe 12	Classe 13
Janeiro	1,00	0,92	0,96	0,99	1,00	1,04	0,97	1,00	1,00	1,00
Fevereiro	1,00	0,89	0,96	0,96	1,00	1,03	1,04	1,00	1,00	1,08
Março	1,00	0,96	1,00	1,06	1,00	1,05	1,06	1,00	1,00	1,04
Abril	1,00	1,04	1,12	1,14	1,00	1,09	1,12	1,00	1,00	1,09
Maio	1,00	1,02	1,06	1,13	1,00	1,06	1,13	1,00	1,00	1,13
Junho	1,00	1,29	1,12	1,18	1,00	1,03	1,14	1,00	1,00	1,20
Julho	1,00	1,15	1,07	0,79	1,00	0,87	0,86	1,00	1,00	0,84
Agosto	1,00	1,06	0,96	0,80	1,00	0,83	0,83	1,00	1,00	0,83
Setembro	1,00	0,99	1,00	1,05	1,00	1,02	1,03	1,00	1,00	0,93
Outubro	1,00	0,91	0,93	0,89	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	0,93
Novembro	1,00	0,90	0,92	1,01	1,00	1,04	0,95	1,00	1,00	0,94
Dezembro	1,00	0,86	0,90	1,00	1,00	0,95	0,88	1,00	1,00	0,98

Considerou-se, também que a distribuição de veículos por sentido é igual; isto é, 50% dos veículos trafegando em cada sentido da rodovia. Ainda, seguindo recomendações da AASHTO, considerou-se que a faixa mais trafegada receberá 90% dos veículos comerciais de cada sentido.

Para a previsão de desempenho, os modelos da AASHTO devem ser alimentados com o valor inicial de Irregularidade, a qual foi considerada igual a 1,8 m/km.

Os dados das estações meteorológicas escolhidos foram aqueles que melhor representaram as condições de temperatura média mensal e total de chuva acumulada no ano das cidades de Osório e Torres. Miami, do estado norte-americano da Florida, foi a cidade escolhida para representação da BR-101/RS.

Também se fixou em 3 m (10 ft) a profundidade do Lençol Freático, contado a partir do topo da Camada Final de Terraplenagem.



As estruturas dos pavimentos dos Lotes 1 e 3 da BR-101/RS, no trecho Torres – Osório diferem fundamentalmente na espessura total de camadas asfálticas. Enquanto no Lote 1 as camadas asfálticas totalizam 15 cm, no Lote 3 são 17 cm.

As demais camadas são semelhantes nos pavimentos dos dois lotes:

- Base de brita graduada de 15 cm de espessura
- Sub-base de macadame seco, com 20 cm de espessura
- CFT²³ constituída por 20 cm de rachão e 40 cm de solo de jazida (A-2-4)

Em relação às camadas analisadas, as características das camadas asfálticas foram as definidas nos projetos de misturas realizados no CENPES/PETROBRÁS.

Para caracterizar as propriedades mecânicas das camadas subjacentes (base, sub-base e subleito) foram considerados os módulos de resiliência retroanalisados²⁴ e demais características sugeridas, como *default*, pelo software. Todos os valores foram verificados quanto à sua representatividade, e havendo divergência entre os valores de *default* e aqueles considerados pelos projetistas como sendo adequados, foram estes últimos os empregados.

6.2 ANÁLISES REALIZADAS COM O ME-PDG

Apresentam-se nesta seção previsões de desempenho dos pavimentos dos Lotes 1 e 3. Especial importância é dada à comparação entre os desempenhos esperados:

- a) à luz do tráfego previsto nos Projetos elaborados nos anos 1990, sem sobrecarga, e
- b) considerando o tráfego atual real (em termos não apenas de veículos, mas principalmente em termos de magnitudes de cargas de eixo), medido em balanças instaladas nas proximidades da BR-101/RS, com sobrecarga.

As análises realizadas para os pavimentos dos Lotes 1 e 3 objetivaram quantificar a evolução dos seguintes parâmetros :

²³ CFT é a sigla de Camada Final de Terraplenagem.

²⁴ Como durante o processo construtivo a empreiteira realizou controle de compactação através de medidas de deflexões no topo de cada camada do pavimento foi possível estimar-se os módulos *in situ*.



- Irregularidade Longitudinal (na escala IRI, em m/km) ao final do Período de Projeto (10 anos) – IRI_{10} ;
- Afundamento nas Trilhas de Roda (em mm), ao final do Período de Projeto – ATR_{10} ;
- Tempo (em meses) para ocorrer o ATR máximo admissível (7 mm) – $t_{p/ATR=7mm}$;
- Tempo (em meses) para ocorrer trincamento de cima para baixo em 1% da extensão do trecho, na superfície e a 1,27 cm (0,5") de profundidade - $t_{p/TDCS} = 1\%$ e $t_{p/TDC0,5"} = 1\%$;
- Trincamento por fadiga (em %) ao final do Período de Projeto – TR_{10}

As Tabelas 29 e 30 sintetizam os resultados das análises para os pavimentos dos Lotes 1 e 3, respectivamente.

Tabela 29. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 1 considerando tráfegos sem e com sobrecarga

Tráfego	IRI_{10} (m/km)	ATR_{10} (mm)	$t_{p/ATR=7mm}$ (mês)	$t_{p/TDCS} = 1\%$ e $t_{p/TDC0,5"} = 1\%$;	TR_{10} (%)
Sem sobrecarga	2,27	9,30	70	Na superfície: 5,5 meses A 0,5": 17 meses	2,2
Com sobrecarga	2,70	16,38	21	Na superfície: 2 meses A 0,5": 5 meses	20,0

Tabela 30. Evolução dos Parâmetros de Desempenho do Pavimento do Lote 3 considerando tráfegos sem e com sobrecarga

Tráfego	IRI_{10} (m/km)	ATR_{10} (mm)	$t_{p/ATR=7mm}$ (mês)	$t_{p/TDCS} = 1\%$ e $t_{p/TDC0,5"} = 1\%$;	TR_{10} (%)
Sem sobrecarga	2,19	7,30	116	Na superfície: 9 meses A 0,5": 25 meses	0,6
Com sobrecarga	2,50	13,55	33	Na superfície: 3 meses A 0,5": 7 meses	6

As Figuras 46 a 49, a seguir, apresentam as evoluções dos parâmetros de desempenho do pavimento do Lote 1, considerando tráfegos “previsto” no Projeto, ou sem excesso de carga, e “real” determinado em balanças, com sobrecarga.

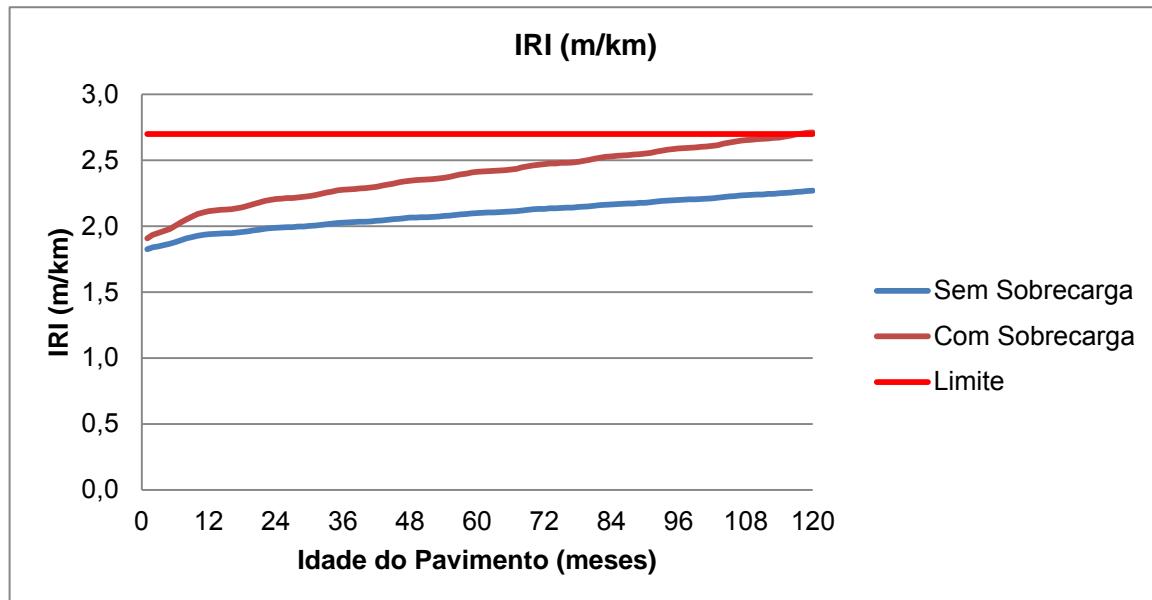


Figura 46: Evolução da Irregularidade (IRI em m/km) no pavimento do Lote 1

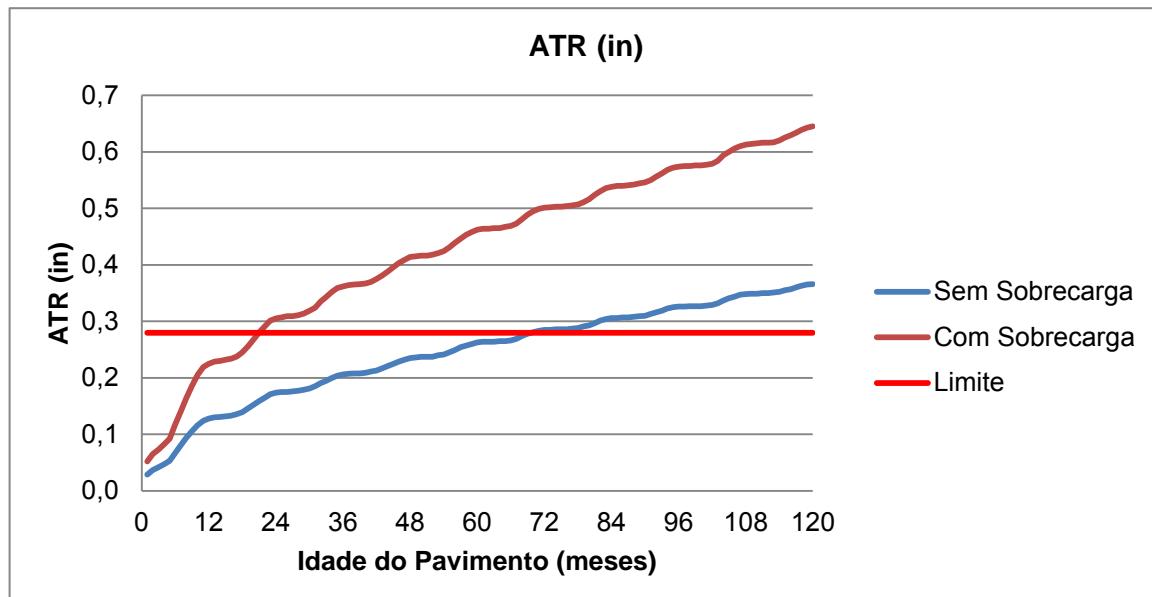


Figura 47: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 1

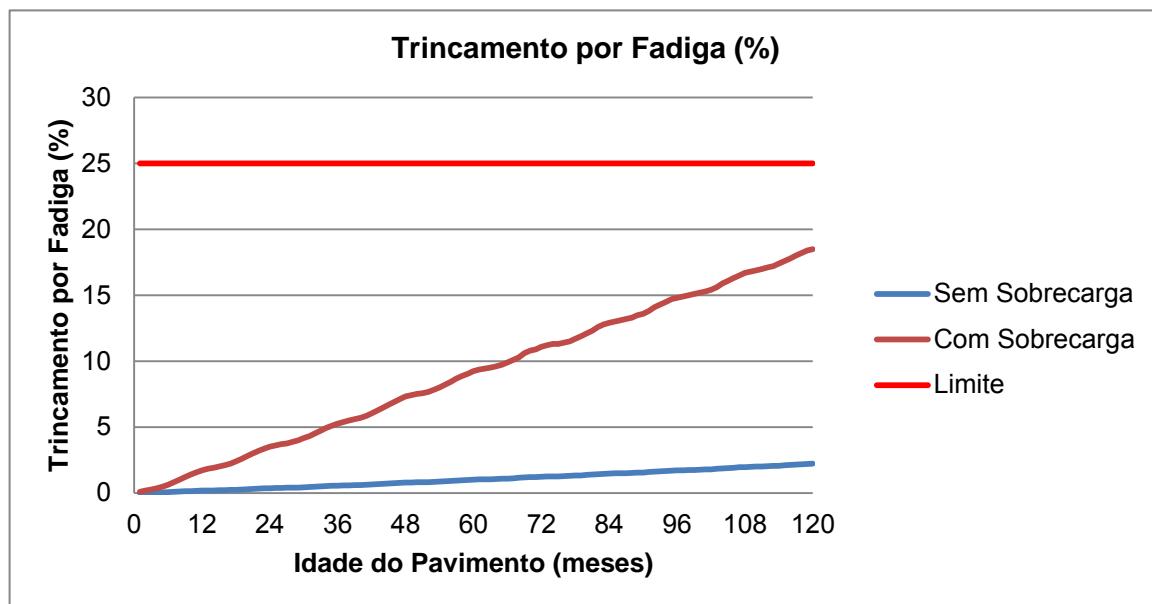


Figura 48: Evolução do Trincamento por Fadiga (TR em %) do pavimento do Lote 1

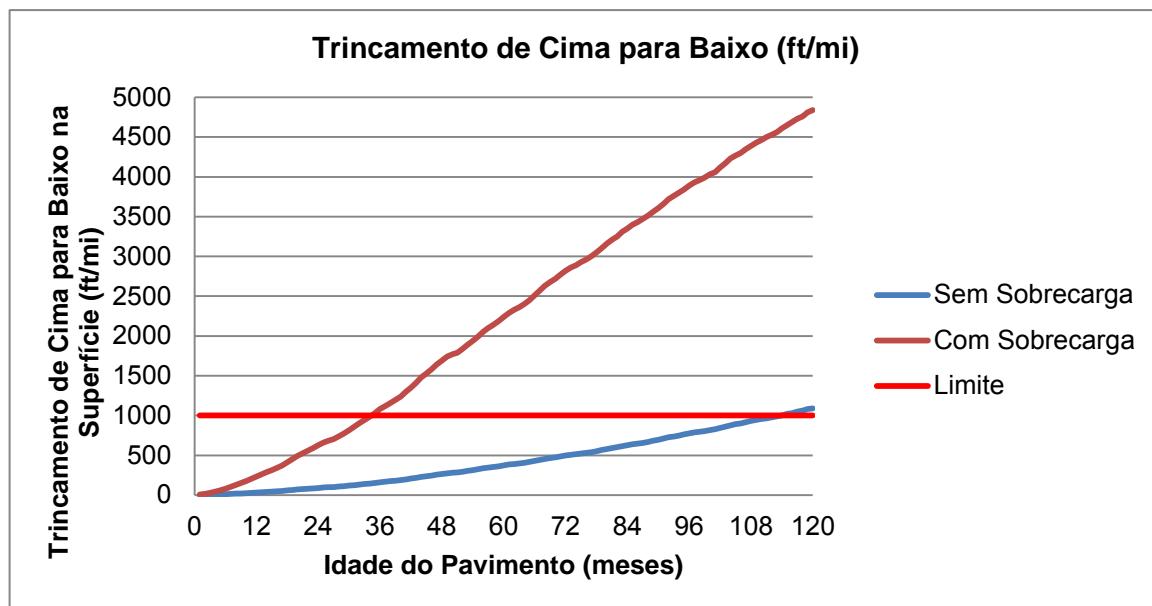


Figura 49: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (TDC em ft/mi²⁵) na superfície do pavimento do Lote 1

²⁵ft/mi (foot per mile). 1 ft/mi = 0,19 m/km

As Figuras 50 a 53, a seguir, apresentam as evoluções dos parâmetros de desempenho do pavimento do Lote 3, considerando tráfegos “previsto” no Projeto, sem sobrecarga, e “real”, com sobrecarga, determinado em balanças.

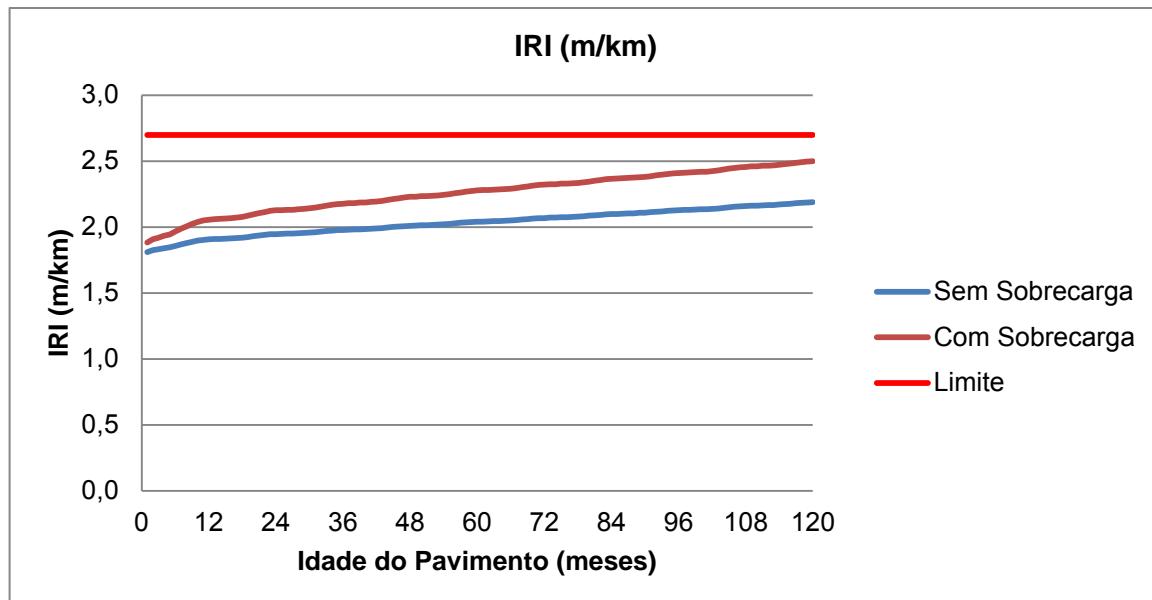


Figura 50: Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI em m/km) no pavimento do Lote 3

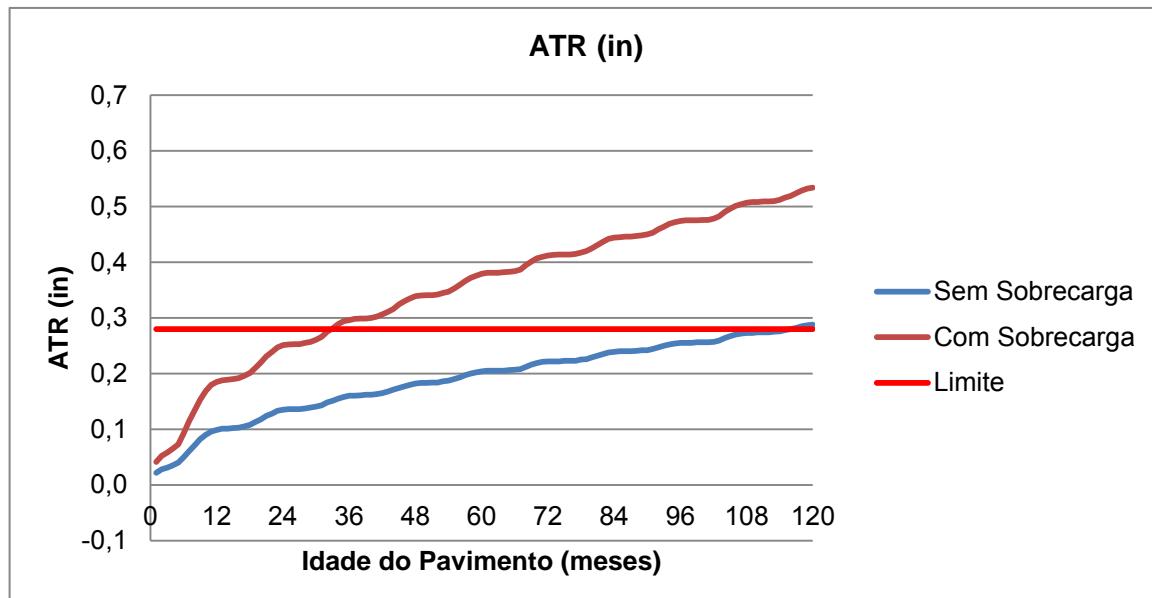


Figura 51: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento do Lote 3

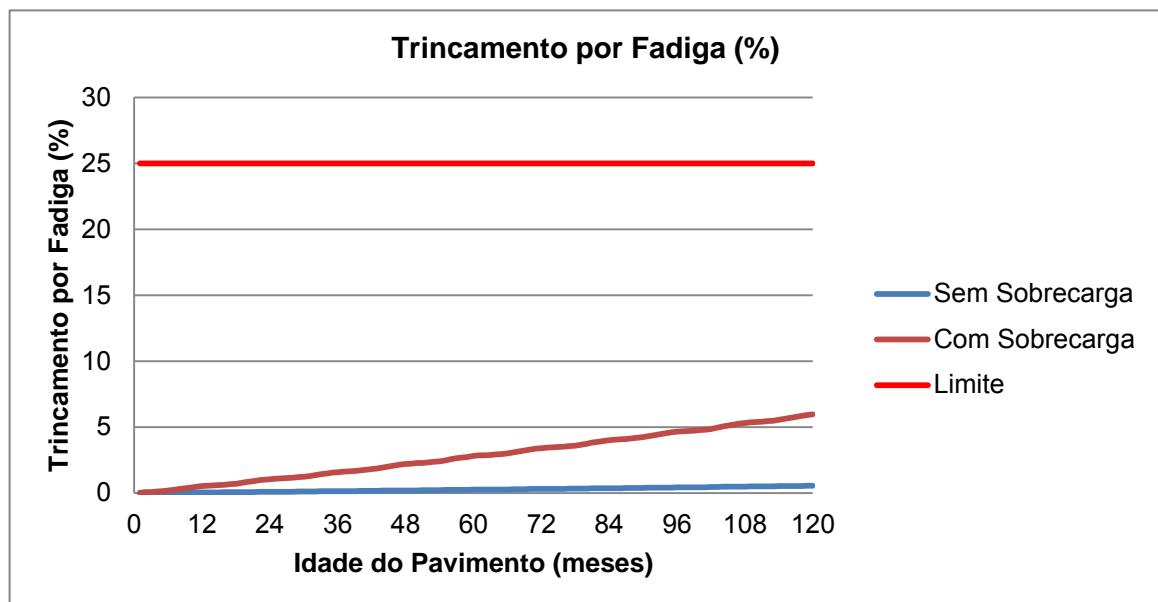


Figura 52: Evolução do Trincamento por Fadiga (TR em %) do pavimento do Lote 3

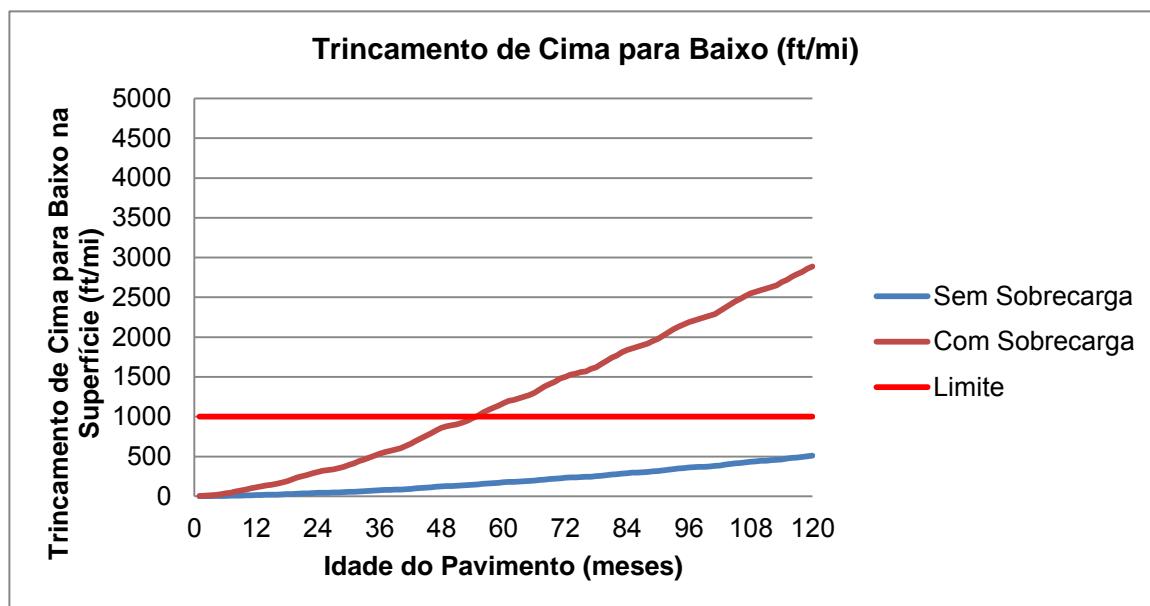


Figura 53: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (TDC em ft/mi) na superfície do pavimento do Lote 3

Comentários: Quanto ao Desempenho dos Pavimentos dos Lotes 1 e 3, **considerando-se apenas os tráfegos dos Projetos, sem sobrecarga:** Os resultados das análises apresentados nas Tabelas 29 e 30, bem como nas Figuras 46 a 53, mostram que:



- a) As degradações (Irregularidade Longitudinal, ATR, Trincamento por Fadiga e Trincamento de Cima para Baixo) se processariam mais rapidamente no pavimento do Lote 1 do que no pavimento do Lote 3. O pavimento do Lote 1 sofreria trincamento por fadiga e de cima para baixo (TDC) e acumularia ATR em magnitudes muito superiores às que experimentaria o pavimento do Lote 3. Isso tem respaldo lógico, pois o volume de tráfego previsto para o Lote 1 é maior e porque a espessura total de camadas asfálticas é menor (15 cm no Lote 1; 17 cm no Lote 3).
- b) Em termos de afundamentos nas trilhas de roda (ATR), constata-se que o ATR limite (7 mm) seria atingido em 70 meses (aproximadamente 6 anos) no pavimento do Lote 1 e em 116 (quase 10 anos) no pavimento do Lote 3.
- c) O trincamento por fadiga ao final do período de projeto (TR_{10}) seria muito pouco expressivo nos pavimentos: 2,2% no pavimento do Lote 1 e 0,6% no pavimento do Lote 3. Observa-se, contudo, que se for considerado um nível de confiabilidade de 90%, esse valores são iguais a 14,3% e 2%, respectivamente.
- d) Nos dois pavimentos, o Trincamento de cima para baixo (top-down cracking - TDC) se manifestaria já nos primeiros meses abertura ao tráfego. 1% da superfície do pavimento seria afetada por esse tipo de degradação com apenas 5,5 meses no Lote 1 e após 9 meses no Lote 3.
- e) A Irregularidade Longitudinal também evoluiria mais rapidamente no pavimento do Lote 1 do que no Lote 3, sem, entretanto, atingir o valor limite ($IRI = 2,70 \text{ m/km ou } 171 \text{ in/mi}$).

Comentários Quanto ao Desempenho dos Pavimentos dos Lotes 1 e 3, **considerando-se apenas o tráfego real determinado em balanças, com sobrecarga:**

Conforme já exposto, ainda não há balanças em operação na BR-101/RS. Entretanto, os dados levantados junto às balanças instaladas na Freeway indicam claramente que **muitos veículos trafegam com excesso de carga**. Mais ainda, tem-se observado que um percentual elevado (cerca de 40%) dos veículos que



trafegam pela Freeway (BR-290/RS), o faz depois das 18 horas²⁶ para evitar a multa.

Os resultados das análises apresentados nas Tabelas 29 e 30, bem como nas Figuras 46 a 53, mostram que:

- a) Os efeitos do excesso de carga nos parâmetros de desempenho analisados são extremamente significativos, tanto para o Lote 1 quanto para o Lote 3.
- b) O **excesso de carga é extremamente nocivo** quando se analisa a evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda. **No pavimento do Lote 1, os ATR acumulados ao longo do período de projeto (10 anos) considerando-se o tráfego real (com sobrecarga) serão 76,1% superiores aos correspondentes ao tráfego previsto no Projeto (sem sobrecarga).** Em números absolutos 16,4 mm (tráfego com sobrecarga) contra 9,3 mm (tráfego sem sobrecarga). **O tempo para que o pavimento acumule 7 mm de ATR** (considerado limite) **é reduzido em 70%**: de 70 meses considerando-se o tráfego (**Projetado**) passa a apenas 21 meses ao considerar-se o tráfego real (**Real**).
- c) **Tendência semelhante se observa no desempenho estimado para o pavimento do Lote 3.** Os ATR causados ao longo de 10 anos pelo tráfego real serão 85,6% superiores aos correspondentes ao tráfego do Projeto; 13,55 mm ao invés de 7,30 mm. Se de acordo com o tráfego do Projeto (**sem sobrecarga**), o pavimento do Lote 3 apresentaria ATR superior ao limite quase ao final do período de projeto (na realidade aos 116 meses), estima-se agora que, ao considerar-se o tráfego real (**com sobrecarga**) tal condição será alcançado antes dos 3 anos de operação do rodovia (de fato, 33 meses)
- d) Ao analisar-se a evolução do trincamento por fadiga constata-se igualmente os efeitos danosos do excesso de carga do tráfego real. **No pavimento do Lote 1, o trincamento ao cabo de 10 anos (TR₁₀) gerado pelo tráfego real será 9 vezes superior ao que seria gerado pelo tráfego do Projeto.**

²⁶ O horário de funcionamento da balança é das 8 às 18 horas.



- e) **No pavimento do Lote 3 essa tendência é confirmada;** o TR₁₀ correspondente ao tráfego real (**com sobrecarga**) é 10 vezes superior ao que corresponderia o tráfego do Projeto (**sem sobrecarga**).
- f) Também **o Trincamento de Cima para Baixo (TDC) se processará muito mais rapidamente** (3 vezes mais) **devido ao excesso de carga embutido no tráfego real.** No pavimento do Lote 1, o tempo para a ocorrência de TDC em 1% do trecho cai de 6 meses (tráfego **Projetado**) para 2 meses (tráfego **Real**). Tendência semelhante se observa no pavimento do Lote 3, com redução no $t_{p/TDC}$ = 1% de 9 meses (tráfego **Projetado**) para 3 meses (tráfego **Real**). É muito importante observar que este tipo de trincamento começa tão logo o pavimento é aberto ao tráfego, pois não constitui um trincamento clássico por fadiga; sendo, ao contrário, um trincamento gerado por tensões horizontais cisalhantes excessivamente elevadas.
- g) Os efeitos do excesso de carga do tráfego são menos significativos na evolução da Irregularidade. Mesmo que com o tráfego real (**com sobrecarga**) o IRI alcance valores 18,9% superiores ao correspondente ao tráfego do Projeto (**sem sobrecarga**) no pavimento do Lote 1 e 14,1% no do Lote 3, o valor limite (IRI = 2,70 m/km) de Irregularidade Longitudinal não será atingido antes do final do período de projeto.

6.3 COMENTÁRIOS A RESPEITO DO TRINCAMENTO DE CIMA PARA BAIXO

Além dos trincamentos por fadiga (de baixo para cima ou *bottom-up cracking*) e afundamentos nas trilhas de roda, comentou-se neste capítulo a possível a ocorrência de um tipo de trinca ainda pouco conhecida. Trata-se das trincas que se propagam de cima para baixo (ao contrário das tradicionais trincas por fadiga que geralmente iniciam na fibra inferior da camada asfáltica).

O trincamento de cima para baixo (*top-down cracking*) é um defeito descoberto recentemente²⁷, que ocorre principalmente em pavimentos com espessas camadas asfálticas e que tem como causa principal as elevadas

²⁷ De fato, as referências a esse tipo de trincamento na literatura científica remontam-se ao início desta década (anos 2000) e suas causa, mecanismos e formas de prevenção recém começam a ser apresentados com clareza.

tensões horizontais cisalhantes, causadas pelas rodas de veículos comerciais, especialmente quando estes trafegam com sobrecarga.

Também concorrem para a ocorrência do trincamento de cima para baixo os seguintes fatores:

- o envelhecimento do ligante asfáltico da camada superior, resultando em elevadas tensões térmicas nas camadas asfálticas;
- o amolecimento da camada asfáltica superior (comparada com a camada inferior) devido às elevadas temperaturas na superfície do pavimento; e
- a segregação de agregados na mistura asfáltica.

Embora não representem (ao menos na fase inicial) comprometimento estrutural, as trincas de cima para baixo, como as mostradas na Figura 54, propiciam a penetração d'água nas camadas asfálticas. A passagem de cargas pesadas poderá provocar a geração de excesso de poro-pressão (pressão neutra), causando bombeamento de finos e a progressiva desintegração das camadas asfálticas. Em um estágio posterior há um agravamento nos ATR e a formação de panelas.



Figura 54: Trincamentos de cima para baixo em amostras extraídas na BR-116/RS, trecho Camaquã-Pelotas, Observa-se segregação de agregados na mistura



7. ESTUDO DOS EFEITOS DA COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

7.1 INFORMAÇÕES GERAIS

Para analisar os efeitos da composição de misturas asfálticas (especificamente, da composição granulométrica dos agregados e do tipo e teor de ligante) nesta pesquisa, que será complementado no Relatório Final, consideraram-se 4 misturas asfálticas dosadas para a obra de ampliação e restaurações realizadas na rodovia BR-290/RS, trecho Osório - Porto Alegre (Freeway).

Assim, as características de tráfego e clima são as mesmas consideradas no capítulo 4 deste Relatório; enquanto que a estrutura do pavimento e o AADTT são aqueles apresentados no Relatório II.

Os parâmetros base de análise foram:

- Porcentagem de área com trinca classe 2: $FC-2 \leq 25\%$;
- Afundamento de trilha de roda (F): $F \leq 7 \text{ mm}^{28}$; e
- Irregularidade Longitudinal: $IRI \leq 2,7 \text{ m/km}$ (ou $QI \leq 35 \text{ contagens/km}$).

A confiabilidade do projeto foi fixada em 90%.

7.2 AS MISTURAS ASFÁLTICAS CONSIDERADAS

Neste estudo consideraram-se 4 misturas, cujas características são apresentadas na Tabela 31, a seguir. Observa-se que o ligante usado na Mistura 1 é um ligante modificado classificado como PG 76-22, enquanto que as outras misturas foram confeccionadas com ligante convencional CAP-50-70.

²⁸ Embora o Plano de Exploração (PER) da Rodovia BR-209/RS, trecho Osório - Porto Alegre (Freeway), limite o ATR em 5 mm, adotou-se como valor terminal 7 mm, em consonância com o estudo realizado nos pavimentos da BR-101/RS.

Tabela 31. Composição das Misturas Asfálticas Consideradas

Mistura	Porcentagem (em peso) acumulada de agregados passante na peneira								% de ligante em volume	Massa específica aparente da mistura (g/cm ³)
	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 80	Nº 200		
1	100	86,6	76,8	47,0	28,2	13,1	9,2	6,8	11,3	2,42
2	100	89,0	81,8	59,3	38,0	16,0	9,9	6,3	10,9	2,43
3	100	89,8	84,4	71,1	46,8	20,0	12,5	8,1	13,8	2,32
4	100	92,6	84,1	62,8	47,0 ²⁹	15,6 ³⁰	10,0 ³¹	7,1	13,2	2,43

Os dados apresentados na Tabela 31 mostram que:

- a) As misturas 3 e 4 apresentam maiores teores de ligante, enquanto que as misturas 1 e 2 são mais “secas”.
- b) As misturas 3 e 4, que apresentam teores de ligante próximos (respectivamente, 13,8% e 13,2%, em volume) apresentam massas específicas (mal chamadas de densidade) aparentes bastante diferentes, o que se justifica pelas diferentes composições granulométricas. De fato, a Mistura 4 apresenta maior proporção de agregados graúdos (37,2% retido na peneira Nº 4) do que a Mistura 3.
- c) Com exceção da Mistura 2, as misturas têm granulometria “fina”, com “fração areia” (diferença entre as percentagens passantes nas peneiras Nº 4 e Nº 200) superior a 50%. No caso da Mistura 3, a “fração areia” representa 63% da composição granulométrica dos agregados minerais.

As Figuras 55 a 58, a seguir, apresentam as evoluções dos parâmetros de desempenho do pavimento analisado, em função das composições das misturas.

²⁹Nesta mistura ao invés da peneira Nº 10, foi usada a peneira Nº 8.

³⁰Nesta mistura ao invés da peneira Nº 40, foi usada a peneira Nº 50. Na peneira Nº 30 a porcentagem acumulada retida foi de 22%.

³¹Nesta mistura ao invés da peneira Nº 80, foi usada a peneira Nº 100.

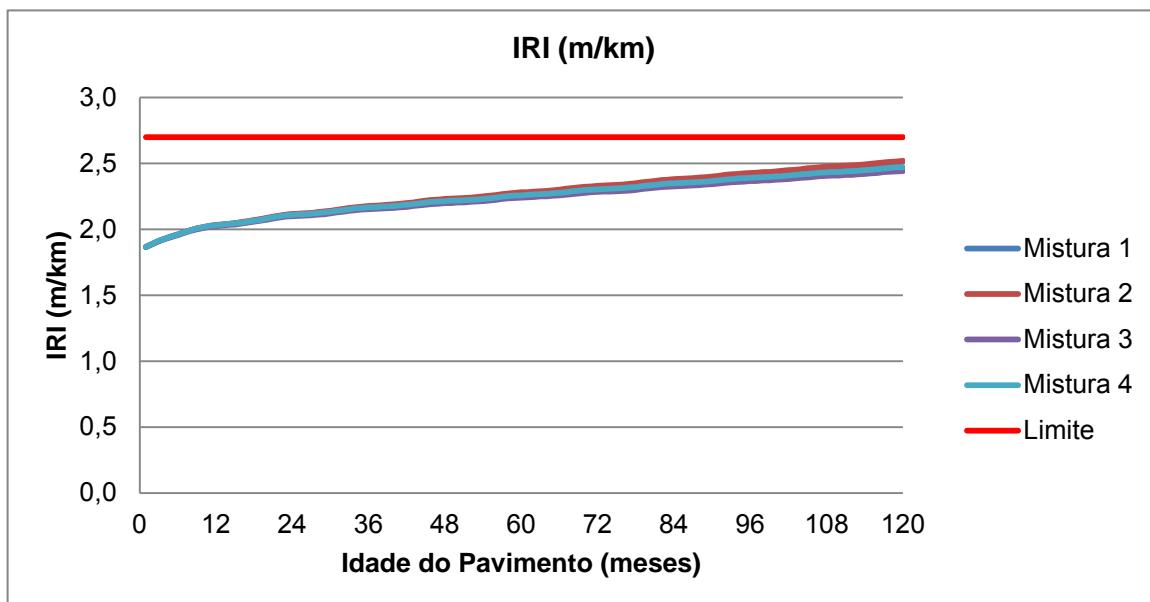


Figura 55: Evolução da Irregularidade (IRI em m/km) no pavimento analisado, em função da composição das misturas asfálticas

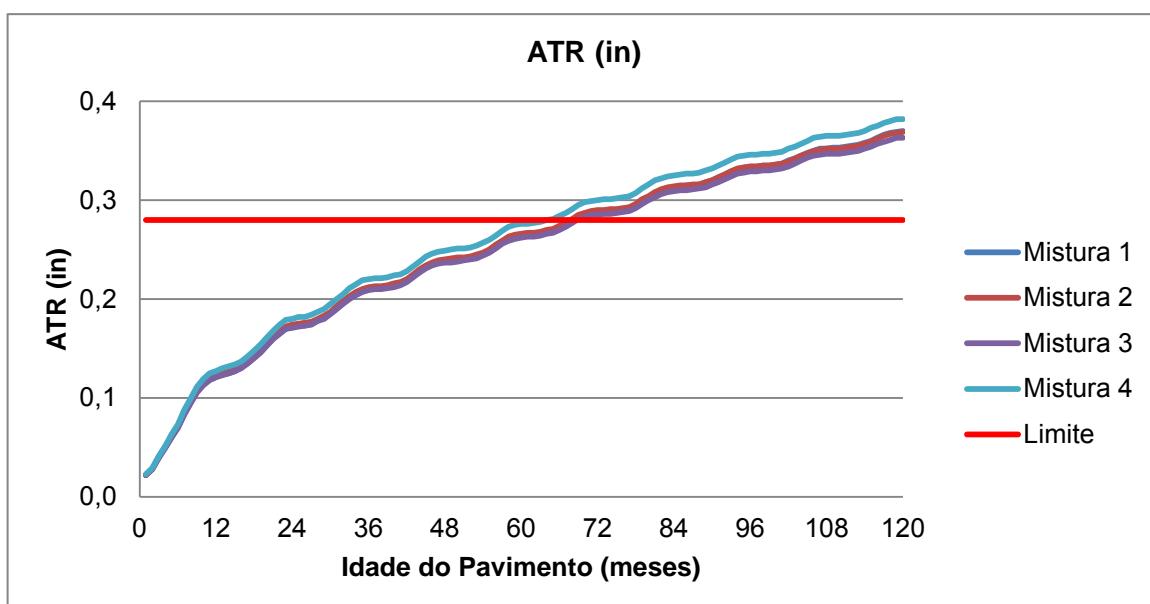


Figura 56: Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR em polegadas) no pavimento analisado, em função da composição das misturas asfálticas

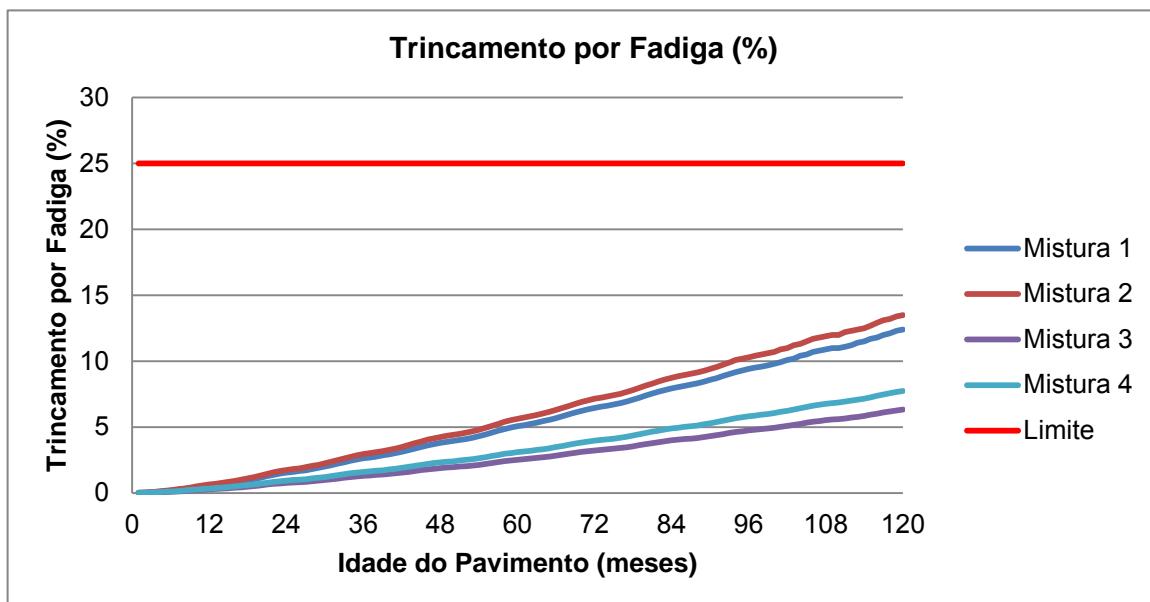


Figura 57: Evolução do Trincamento por Fadiga (TR em %) no pavimento analisado, em função da composição das misturas asfálticas

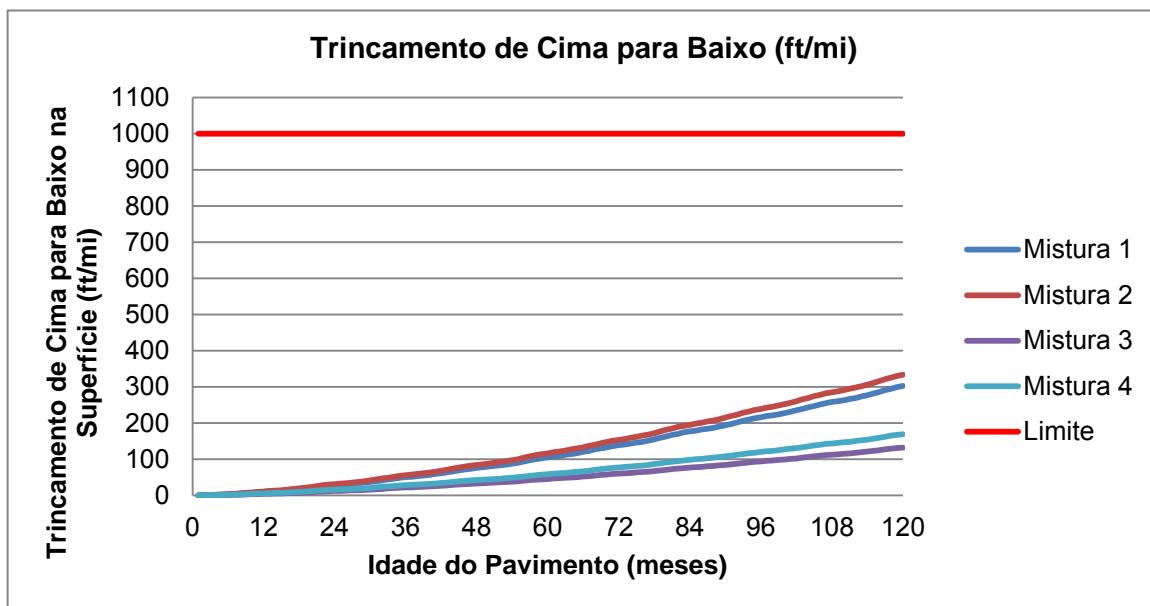


Figura 58: Evolução do Trincamento de Cima para Baixo (TDC em ft/mi³²) na superfície do pavimento, em função da composição das misturas asfálticas

Os resultados das análises apresentados nas Figuras 55 a 58, mostram que:

- a) **As evoluções da Irregularidade Longitudinal e dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR) não são significativamente afetadas pelas**

³²ft/mi (foot per mile). 1 ft/mi = 0,19 m/km

composições das misturas asfálticas consideradas, para o pavimento analisado. Quanto à Irregularidade, o melhor desempenho do pavimento se deu com a mistura asfáltica 3 no revestimento e o pior com a mistura asfáltica 2. Quanto aos ATR, o melhor desempenho também corresponde à mistura asfáltica 3, porém o pior corresponde à mistura asfáltica 4.

- b) A evolução do trincamento por fadiga parece ser afetado de forma mais significativa pela composição das misturas asfálticas. É possível diferenciar dois grupos de comportamento: as misturas asfálticas 2 e 1 apresentam maior suscetibilidade ao trincamento por fadiga que as misturas 4 e 3. Este fato pode ser atribuído aos diferentes teores de ligantes. Como observado, as misturas asfálticas “1” e “2” são mais secas (teores de ligantes em volume da ordem de 11%) do que as misturas “3” e “4” (teores superiores a 13%). O desempenho do pavimento, de pior para melhor (ou de maior para menor porcentagem de área trincada) segue a sequência: mistura 2 (pior) – mistura 1 – mistura 4 - mistura 3 (melhor).
- c) A mesma tendência é observada ao analisar-se a evolução do trincamento de cima para baixo (Top-down cracking – TDC). Também se diferenciam os comportamentos das misturas com menor teor de ligante (1 e 2) das mais ricas em asfalto (4 e 3). A sequência é a mesma mistura 2 (pior) – mistura 1 – mistura 4 - mistura 3 (melhor).
- d) No geral, observa-se que revestimentos empregando as misturas asfálticas consideradas apresentariam elevados Afundamentos nas Trilhas de Roda e alcançariam o valor limite de 7 mm após 70 meses de operação da rodovia. Como observado anteriormente, essas misturas são bastante “finas”, com elevado percentual da “fração areia” (material que passa na peneira N° 4 e fica retido na peneira N° 200) e baixo percentual de agregado graúdo (material retido na peneira de N° 4).
- e) Comparando-se as evoluções dos trincamentos nos pavimentos da rodovia BR-101/RS (Figuras 17, 18, 21 e 22) com as correspondentes ao pavimento da BR-290/RS (figuras 26 e 27), pode-se concluir que **nos pavimentos com**



camadas asfálticas espessas da BR-101/RS (15 a 17 cm) o trincamento mais significativo é o que ocorre de cima para baixo (TDC – Top Down Cracking); enquanto que no pavimento da BR-290/RS, com espessura média (8 cm) de camada asfáltica, predomina o trincamento por fadiga.



8. COMPARAÇÃO ENTRE OS DESEMPENHOS PREVISTOS COMO ME-PDG E RESULTADOS DE MONITORAMENTO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS EM RODOVIAS DA REGIÃO SUL

Em sua Dissertação de Mestrado defendida em 2008, o engenheiro Thiago Vitorello apresentou Modelos de Previsão de Desempenho de pavimentos flexíveis da BR-290/RS, trecho Osório – Porto Alegre, conhecida como Freeway.

Como os valores de Irregularidade Longitudinal (IRI) e Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR) previstos com os modelos da AASHTO, incluídos no ME-PDG³³ serão, neste Relatório Final, comparados com os obtidos através da aplicação dos modelos propostos por Vitorello (2008), considera-se oportuno apresentar neste Relatório uma resenha dessa pesquisa, destacando a metodologia empregada e os resultados obtidos.

8.1 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DA BR-290/RS OBTIDOS POR VITORELLO (2008)

8.1.1 Histórico da Rodovia

O trecho da rodovia BR-290/RS entre as cidades de Osório e Porto Alegre foi inaugurado em 1973 com o projeto de ser a primeira auto-estrada brasileira. Construída para ligar o litoral gaúcho a Porto Alegre, a rodovia nasceu em uma época em que o Governo Federal estava investindo em grandes obras rodoviárias.

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

Logo após a sua inauguração, foi iniciada a cobrança de pedágios na rodovia. No entanto, os problemas no pavimento começaram a aparecer e a verba

³³As evoluções de valores de IRI e ATR previstos para o pavimento da ampliação da Freeway pelos modelos da AASHTO foram apresentadas e analisadas no 2º Relatório desta Pesquisa e serão reproduzidos graficamente neste Relatório Final.



financeira arrecadada não conseguia suprir a carência. Em 1989, sem a necessária organização operacional, a cobrança de pedágio foi paralisada.

Em 1997 um Consórcio entre a empresa TRIUNFO e SBS Engenharia e Construções formaram a Concessionária da Rodovia Osório – Porto Alegre S/A – Concepa com o objetivo exclusivo de administrar a rodovia BR-290, no trecho entre Osório, no km 0, e Eldorado do Sul, no km 112. A entrada da cidade de Porto Alegre, capital do Estado, situa-se nesse trecho, no km 96,5 da rodovia. Anos após também foi incorporado um trecho da BR-116/RS compreendido entre os km 291 e 301.

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

O pavimento do trecho concedido encontrava-se, em 1997, com numerosos defeitos estruturais e funcionais, percebendo-se, desde então, que uma série de reparos e restaurações se faziam necessárias. A largura de sua plataforma de rolamento também estava inadequada para a capacidade de tráfego ao qual a rodovia era submetida, principalmente no verão gaúcho. Antes da concessão, a rodovia entre as cidades de Osório e Porto Alegre possuía uma plataforma com 12 m de largura. A segurança de tráfego também era comprometida pela inexistência de acostamento interno (à esquerda) e pela péssima condição que o pavimento se encontrava. Como melhoria em relação à segurança e conforto ao rolamento, a Concepa está ampliando a plataforma de tráfego das pistas, aumentando em 4,25 m a sua largura. Em sua configuração final, a plataforma de tráfego terá 16,25m de largura, distribuída em três faixas com 3,75 m, com acostamento externo de 3 m e acostamento interno – que não havia antes da concessão – de 2 m, conforme Figura 59, sendo essa uma das principais obras a serem realizadas pela Concessionária ao longo de seu período de concessão.

O alargamento da pista em 4,25 m pode ser melhor visualizado em uma seção transversal esquemática da obra de ampliação, Figura 60, na qual também é apresentada a redistribuição das faixas de tráfego.

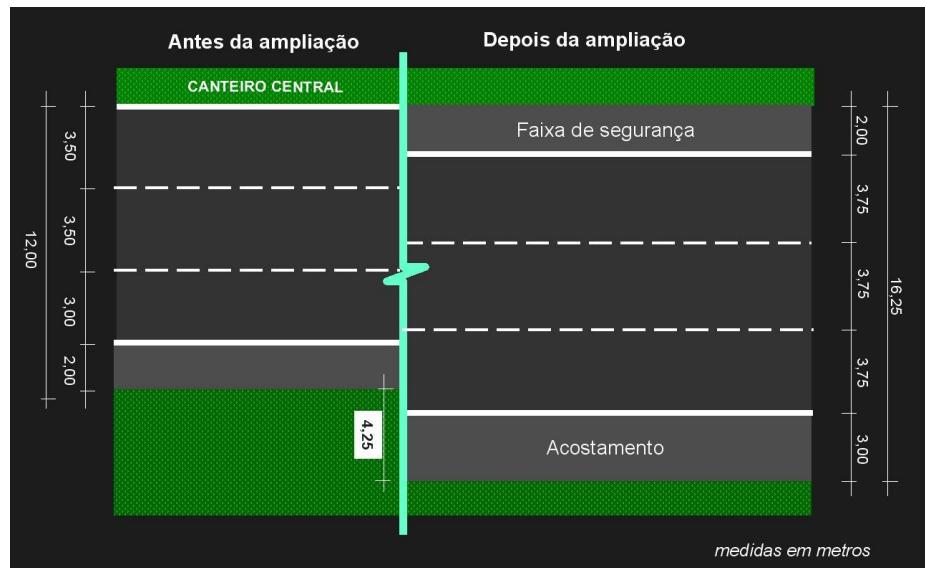


Figura 59: Configuração da pista da rodovia BR-290/RS antes e após a obra de ampliação que a Concessionária está realizando

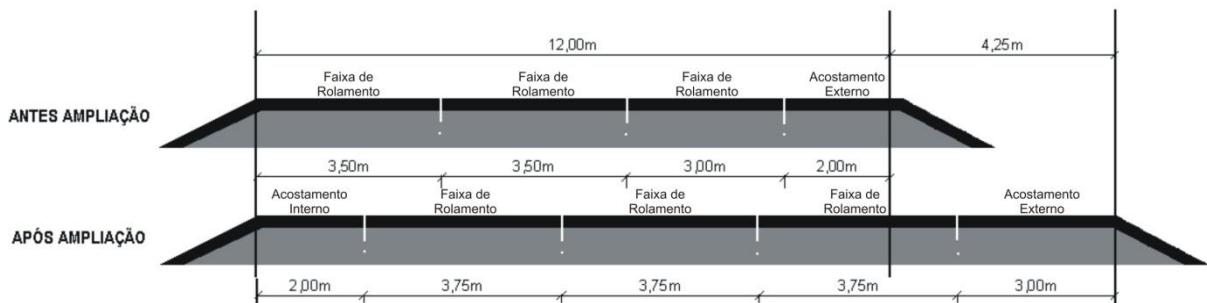


Figura 60: Seção transversal da pista apresentando a configuração da pista antes e após a ampliação

Até o início do ano de 2008, a rodovia já estava com a ampliação concluída em toda a pista sentido Osório – Porto Alegre (denominada pela Concessionária como sendo Pista Norte) e em parte da pista no sentido Porto Alegre – Osório (denominada pela Concessionária como sendo Pista Sul), conforme esquema ilustrativo apresentado na Figura 61.

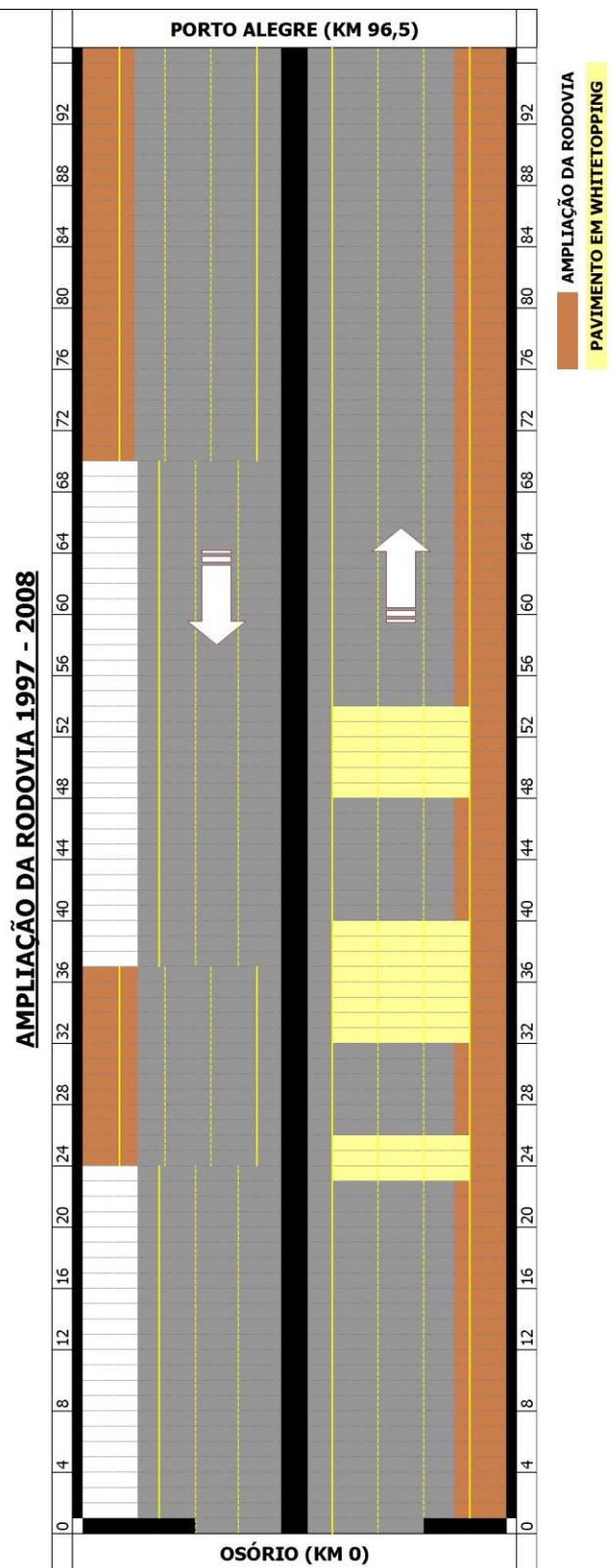


Figura 61: Esquema dos trechos em que as obras de ampliação da rodovia já estão concluídas

8.1.2 Estrutura avaliada

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

Em análises das condições estruturais, funcionais e comportamentais de pavimentos de rodovias com mais de uma faixa de tráfego em cada sentido, normalmente considera-se a faixa mais solicitada pelo tráfego como sendo a representativa da rodovia. No caso da Free Way, que possui três faixas de tráfego em cada sentido, a faixa mais solicitada, destinada a veículos de tráfego pesado, é a externa. Essa pesquisa, assim, focalizou as análises na faixa externa da rodovia.

Como somente entre os km 0 e 72 da rodovia a ampliação ocorreu pelo lado externo, a pesquisa foi desenvolvida nos segmentos já ampliados da rodovia neste trecho. É neste trecho que também se situam os segmentos em *whitetopping*, que não serão considerados na análise. A Tabela 32 apresenta os segmentos da rodovia a serem considerados na análise desenvolvida neste estudo.

Tabela 32: Segmentos da rodovia a serem considerados neste estudo

Pista (sentido)	Estaca [km]		
Osório - Porto Alegre (Pista Norte)	1+000,00	a	23+000,00
	30+000,00	a	32+000,00
	40+000,00	a	48+000,00
	55+000,00	a	70+000,00
Porto Alegre – Osório (Pista Sul)	24+000,00	a	37+000,00

Foram desconsiderados os segmentos de transição (início e término) e o segmento entre os km 25 e 30 da pista sentido Osório – Porto Alegre, por nele ter sido executado um recapeamento em toda a plataforma em um período posterior à ampliação, além dos três segmentos que contemplam pavimento em *whitetopping*.

A estrutura de ampliação típica adotada na rodovia é mostrada na Figura 62.



Figura 62: Estrutura típica considerada nesta pesquisa

Os materiais pétreos empregados nas camadas de revestimento, de base e de sub-base são rochas basálticas básicas, extraídas de jazida localizada no município de Santo Antônio da Patrulha, RS, próxima do km 30 da rodovia BR-290/RS. Esses materiais foram estudados anteriormente em outras pesquisas (Casagrande, 2003; Rohde, 2007).

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

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

A camada de base da estrutura, com 15 cm de espessura, é constituída de base de brita graduada, estando a granulometria próxima ao centro da Faixa A do DNER (1997). Casagrande (2003) estudou a brita graduada utilizada nesta pesquisa,



obtendo a variação do módulo de resiliência do material em função da soma das tensões principais.

O concreto asfáltico utilizado era de características variáveis, com alguns segmentos sendo executados com asfalto convencional, outros com asfalto borracha e outros, mais recentes, com asfalto modificado com polímero.

8.1.3 LEVANTAMENTOS REALIZADOS

Para a elaboração das tendências de desempenho da estrutura de pavimento analisada, reuniu-se um conjunto de levantamentos existentes para o trecho e estrutura em estudo.

8.1.3.1 Irregularidade Longitudinal

A irregularidade de um pavimento é conceituada como o desvio da superfície da rodovia com relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via (DNER-PRO 182/94).

A Irregularidade é considerada como o melhor indicador de serventia de pavimentos, a qual indica as condições de rolamento, sendo influenciada por vários componentes, tais como: trincamento, desgaste, deformações e manutenções realizadas.

Existem diferentes equipamentos para mensurar este parâmetro.

Os perfilômetros a laser, a partir dos quais obteve-se os dados utilizados na pesquisa, são equipamentos de uso mais recente, que alia alta tecnologia com a maior precisão nos levantamentos de dados. Este equipamento é composto por uma unidade de transdutores (em uma barra), equipada com sensores a laser (com pelo menos dois, sendo um em cada trilha de roda), dois acelerômetros e um sensor de movimento inercial, e um computador PC com “slots” para expansão de capacidade. Todos esses equipamentos são instalados a um veículo. A Figura 63 apresenta o equipamento perfilômetro a laser acoplado a um veículo de passeio em levantamento ocorrido na rodovia BR-290/RS. Foram levantadas as irregularidades em ambas as trilhas da faixa externa da rodovia.



Figura 63: Perfilômetro a laser em levantamento ocorrido na rodovia BR-290/RS

8.1.3.2 Afundamento de trilha de roda

Os afundamentos de trilha 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.

O afundamento de trilha de roda pode ser levantado por dois procedimentos diferentes. O primeiro é o referente à norma DNIT 006/2003-PRO, que determina a utilização de uma treliça de alumínio padronizada, que permite medir, em milímetros, as flechas de trilha de roda.

O segundo procedimento utiliza o perfilômetro a laser. Neste procedimento os sensores devem ter o posicionamento na barra de forma que simule uma treliça (conforme o que se faz na norma DNIT 006/2003-PRO quando se utiliza a treliça de alumínio). Para tanto, é necessário o uso de pelo menos três sensores a laser, sendo dois deles posicionados sobre as trilhas de roda e o terceiro posicionado no meio, entre os anteriores.



É importante salientar que essa não é a maneira exata de se medir o ATR, pois o número de pontos de medição (sensores) é limitado, geralmente 3 ou 5 pontos. Sendo assim, se a posição de tais pontos em relação ao perfil transversal não for perfeita, ou seja, se dois desses pontos não estiverem bem no ponto de afundamento máximo, e o outro ou os outros estiverem fora da zona de afundamento, a medida pode não representar a verdade em termos de ATR (Barella, 2008).

Por outro lado, apesar do alerta, não se pode deixar de reconhecer que o método de medida do ATR normalizado no Brasil pela norma DNIT 006/2003-PRO, que faz uso de uma treliça, é muito rudimentar, pouco preciso, pouco produtivo e perigoso para o técnico de campo, que muitas vezes se vê obrigado a realizar as medições com a treliça sem o fechamento do tráfego. Por todos esses problemas, quando esta medida com a treliça é realizada, ela é feita com intervalos muito grandes de espaço, 40 m, 100 m, às vezes até 200 m.

8.1.4 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

8.1.4.1 Fatores determinantes na análise

No processo de análise deste estudo, algumas considerações foram realizadas no intuito de estimar com maior confiabilidade e precisão as tendências de desempenho para os parâmetros considerados.

Intervenções nos pavimentos

A Concessionária tem realizado continuamente serviços de conservação do pavimento ao longo de todo o trecho. Entre os principais serviços de conservação realizados, destacam-se o recapemaento asfáltico, o micro-revestimento asfáltico e remendos profundos.



O micro-revestimento asfáltico tem sua aplicação principal na conservação de pavimentos agindo como elemento de impermeabilização e rejuvenescimento da condição funcional do pavimento em revestimentos com desgaste superficial e pequeno grau de trincamento. Também é utilizado para repor a condição de atrito superficial e resistência à aquaplanagem. No entanto, não corrige irregularidades e deformações plásticas e nem aumentam a capacidade estrutural do pavimento, embora a impermeabilização do revestimento possa reduzir as deflexões pelo fato de evitar a penetração de água às camadas subjacentes (Bernucci *et al.*, 2006).

O recapeamento asfáltico consiste primeiramente no serviço de fresagem e recomposição da camada asfáltica, logo após concluído este serviço executa-se mais uma camada de massa asfáltica em toda a plataforma da rodovia.

Desse modo, na análise desenvolvida por Vitorello (2008), não foi considerada a variação de irregularidade e ATR por aplicação de micro-revestimento asfáltico.

Os remendos profundos são intervenções mais pesadas, que contemplam a fresagem da capa asfáltica existente e execução de nova camada asfáltica. As espessuras de fresagem variam, de acordo com Concessionária entre 5 e 10 cm.

Os remendos, diferentemente do micro-revestimento asfáltico, podem alterar as condições estruturais e funcionais do pavimento. Assim, na análise, foi avaliada a possibilidade de consideração das intervenções realizadas no trecho. Para tanto, foram levantados todos os segmentos que, após a construção da ampliação, já sofreram intervenções de remendos profundos na faixa externa da rodovia, faixa que se está analisando no estudo.

Na elaboração das tendências de desempenho, as intervenções com remendos profundos foram inseridas nas equações que regem as curvas de tendências através de uma variável dummy (variável dicotômica). Ou seja, nas variáveis independentes, para cada parâmetro considerado, além do tráfego, representado pelo número estrutural Nacum, há um parâmetro variável de acordo com a ocorrência ou não de intervenções no segmento. As funções estabelecidas considerando as intervenções com remendos profundos no pavimento seguem os modelos da Figura 64.

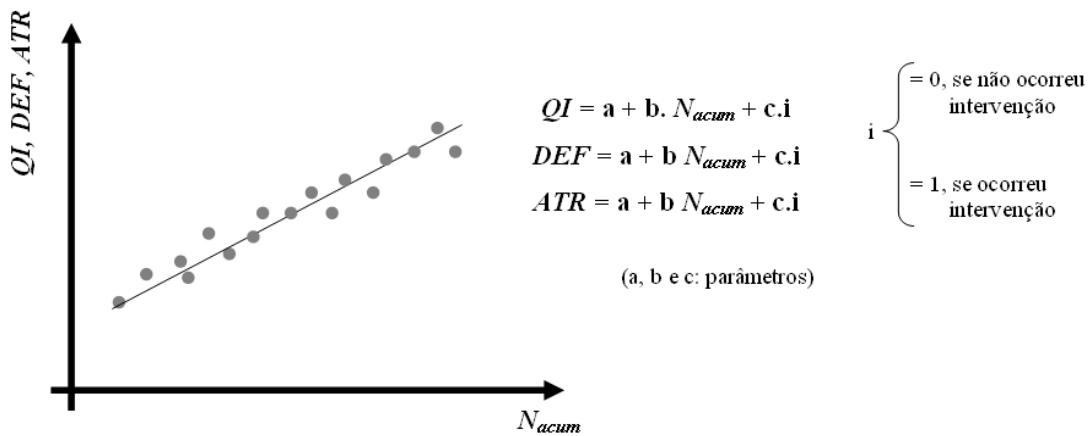


Figura 64: Exemplo de modelos obtidos na proposta de tendências de desempenho de pavimentos considerando as intervenções com remendos profundos realizadas

As configurações dos remendos executados também são importantes na análise dos resultados obtidos, uma vez que a variação dos parâmetros pode estar relacionada à forma dimensional dos remendos. Os remendos profundos realizados, pela Concessionária, em particular, podem ser divididos basicamente em 3 tipos: remendos localizados, remendos nas trilhas de roda e remendos em toda a faixa de tráfego. Os remendos localizados são aqueles executados pontualmente, com dimensão máxima próxima de 1 m, corrigindo pequenos defeitos na camada de revestimento. Os remendos nas trilhas de roda são os executados em grandes extensões, mas com pequena largura (próxima a 1 metro), realizados apenas nas trilhas de rodas, corrigindo trincas existentes nas trilhas e, principalmente, afundamentos de trilha de roda. Os remendos em toda a faixa de tráfego, por sua vez, são os executados em grandes extensões e em toda a largura da faixa. A Figura 65 apresenta esquematicamente e com registros fotográficos exemplos dos 3 tipos básicos de remendos profundos executados.

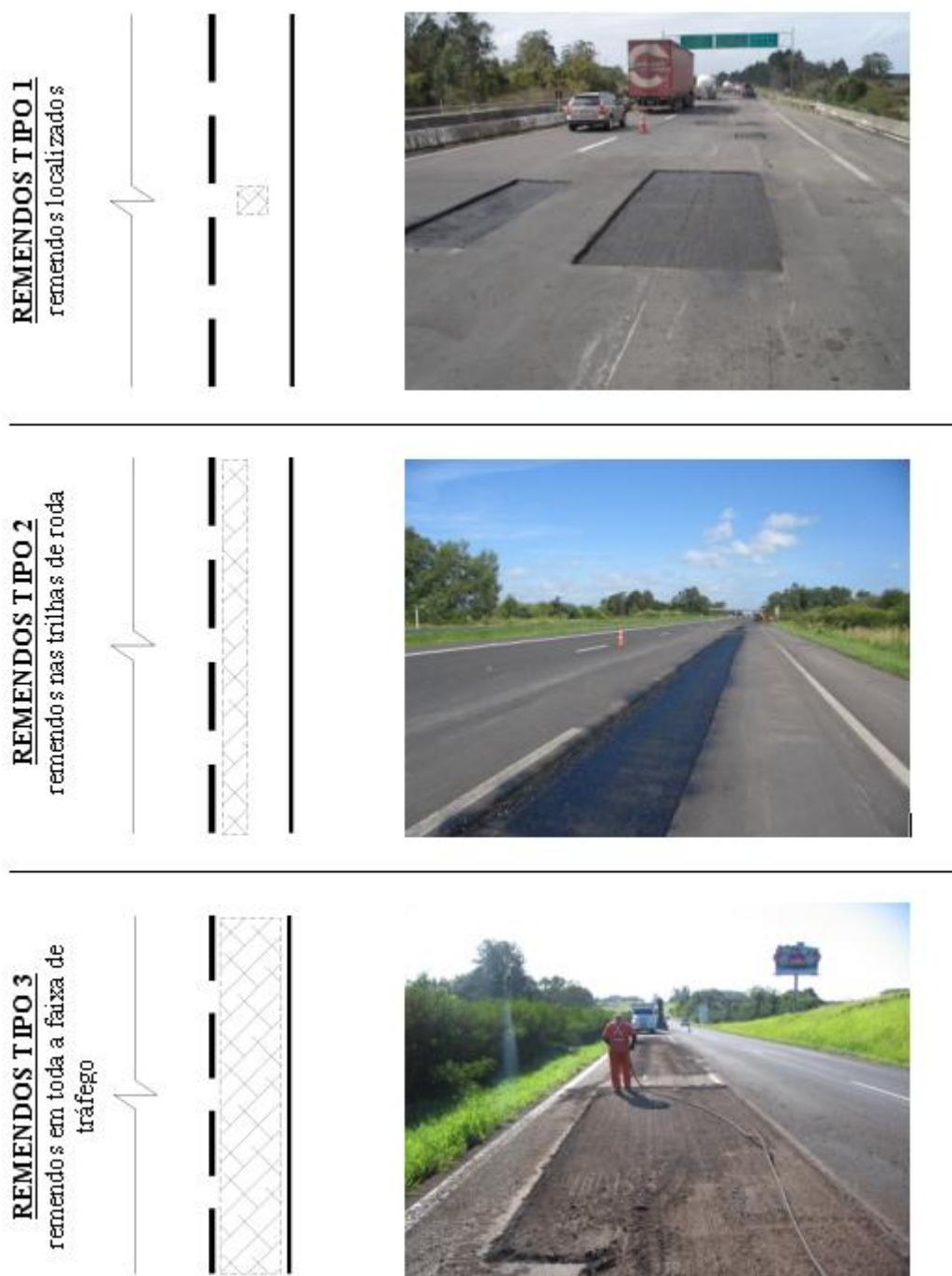


Figura 65: Representação esquemática dos 3 tipos de remendos profundos usualmente executados na rodovia BR-290/RS



8.1.5 Metodologia dos levantamentos

Mantendo a metodologia dos levantamentos evita-se o aumento da variabilidade dos dados ocasionada por fatores externos, não representativos das condições do pavimento.

Para medidas de Irregularidade Longitudinal e de ATR há diferentes equipamentos disponíveis. Mas até mesmo quando utilizado o mesmo equipamento tem que haver o cuidado para ser seguido o mesmo procedimento e, quando não seguido, esse fato deve ser considerado na análise. No caso da barra laser utilizada na pesquisa para medir a irregularidade e o afundamento de trilha de roda, há opções de número de laser a serem utilizados na medição, geralmente 3 ou 5, e essa definição tem que ser considerada na análise de estudo.

8.1.6 Análise estatística

Vitorello (2008) considerou regressões de tendências de desempenho com boa correlação aquelas que apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,5. Calculou também a Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual (REMQP), que é o desvio padrão da estimativa. O REMQP mede o erro típico da previsão do modelo (Spiegel, 1994), sendo estabelecido um patamar de 8% para as análises das tendências propostas neste estudo, e é calculado pela Equação 4.

$$REMQP = 100\% \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{yi_{observado} - yi_{previsto}}{yi_{observado}} \right)^2} \quad (4)$$

Também foi calculado o valor estatístico F, utilizado para determinar se a relação observada entre as variáveis dependentes e independentes ocorre por acaso. O valor F é calculado pela relação da soma dos quadrados da regressão com a soma dos quadrados dos resíduos. Quanto mais o valor F calculado (F_c) for superior ao valor F Tabelado (F_{tab}), obtido a partir da probabilidade da análise estatística e dos graus de liberdade da regressão e do resíduo, maior a significância da regressão. Para esta pesquisa, será considerada uma boa regressão a que



apresentar o valor F calculado superior a cinco vezes o valor F Tabelado ($F_c > 5 \times F_{tab}$).

Com o fim de elucidar a tendência de desempenho, realizaram-se complementarmente dois Testes de Hipóteses. A primeira foi o Teste da Estatística F (Teste da Razão de Variâncias), que foi utilizado para confirmar se dois conjuntos de dados (real e estimado pelo modelo) podem vir de uma mesma população quanto às variabilidades dos dados. A segunda foi o Teste t (Teste de Hipótese de Igualdade de Duas Médias), utilizado para confirmar se dois conjuntos de dados podem vir de uma mesma população quanto às médias dos dados.

A aceitação dos modelos de previsão de desempenho ajustados seguiram a necessidade de passar em pelo menos um dos testes de hipótese aplicados.

No caso do Teste da Estatística F, a aceitação ocorre se:

$$\frac{1}{F_{\alpha/2;[n_1-1];[n_2-1]}} < F < F_{\alpha/2;[n_1-1];[n_2-1]} \rightarrow \text{tabelado}$$

Para o Teste da t, por sua vez, a aceitação deve ser dada respeitando a seguinte condição:

a) σ_1^2 e σ_2^2 desconhecidas, mas $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ (Estatística F aceita):

$$t < t_{\alpha/2;[n_c+n_a-2]} \rightarrow \text{tabelado}$$

b) σ_1^2 e σ_2^2 desconhecidas $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ (Estatística F rejeitada):

$$t < t_{\alpha/2;[f']} \rightarrow \text{tabelado}$$

Na última expressão, o parâmetro estatístico f' é obtido a partir das variâncias e dos graus de liberdade das variáveis.

Assim, foram realizadas, na análise estatística, cinco verificações: R^2 ($\geq 0,50$); REMQP ($\geq 8\%$); valor estatístico F ($F_c > 5 \times F_{tab}$); Teste da Estatística F; e Teste t. Foi considerada uma boa linha de tendência de desempenho a relação que satisfizesse ao menos em quatro avaliações.



Na análise, foram excluídos da regressão de tendência de desempenho os valores que estavam com as diferenças entre os valores estimados e os reais superiores a dois desvios padrões.

Para os ajustes que melhor representaram a tendência de desempenho do pavimento, ainda apresentou-se o *Scatterplot*, que consiste em um gráfico de dispersão utilizado para analisar a simetria da curva ajustada entre valores observados e previstos pelos modelos.

Para auxiliar as análises estatísticas realizadas neste estudo utilizou-se os programas computacionais Microsoft Office Excel e STATISTICA.

8.1.7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

8.1.7.1 BANCO DE DADOS

Partindo-se da reunião do conjunto de informações disponibilizadas pela Concessionária, organizaram-se os dados de levantamentos existentes para a estrutura em análise. Todos esses dados foram obtidos diretamente pela Concessionária que administra a rodovia.

8.1.8 Levantamentos Realizados

8.1.8.1 Irregularidade Longitudinal

Os dados de Irregularidade Longitudinal utilizados nesta pesquisa foram obtidos através de perfilômetros a laser. Os levantamentos ocorreram em abril de 2005, junho de 2006 e junho de 2007, sendo todos os levantamentos realizados com o mesmo equipamento. No entanto, nos levantamentos ocorridos em 2005 e 2006, utilizou-se 5 sensores na medição da irregularidade, enquanto no ensaio de 2007, utilizou-se 3 sensores, seguindo a configuração já descrita no capítulo 3. A utilização de 3 sensores, ao invés de 5, foi uma definição de menor custo e melhor operação do equipamento na via, visto que, por trabalhar com a barra mais curta, dispensa o uso de veículos de apoio (“batedores”).

Os dados dos três levantamentos para o trecho do estudo são apresentados na Figura 66. Para o estudo, executou-se a média dos valores obtidos para cada quilômetro da rodovia.

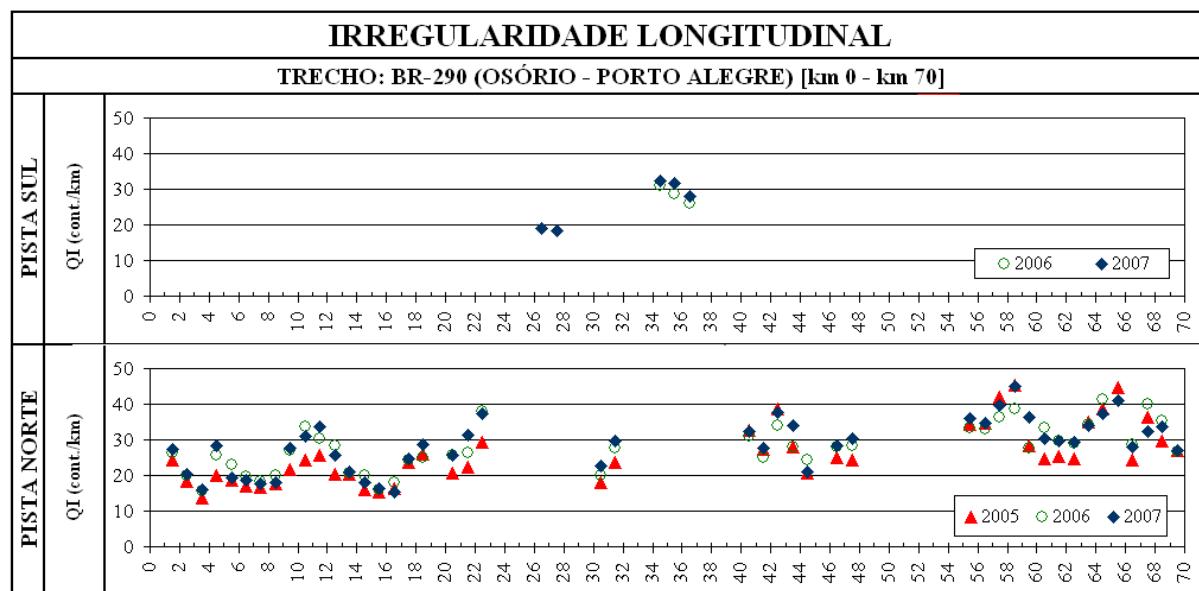


Figura 66: Dados de Irregularidade Longitudinal considerados na pesquisa

8.1.8.2 Afundamento de trilha de roda

Os dados de afundamento de trilha de roda foram também medidos com o perfilômetro a laser, simultaneamente ao levantamento da Irregularidade Longitudinal. Também para esse parâmetro calculou-se a média dos dados para cada quilômetro de rodovia, sendo esses apresentados na Figura 67.

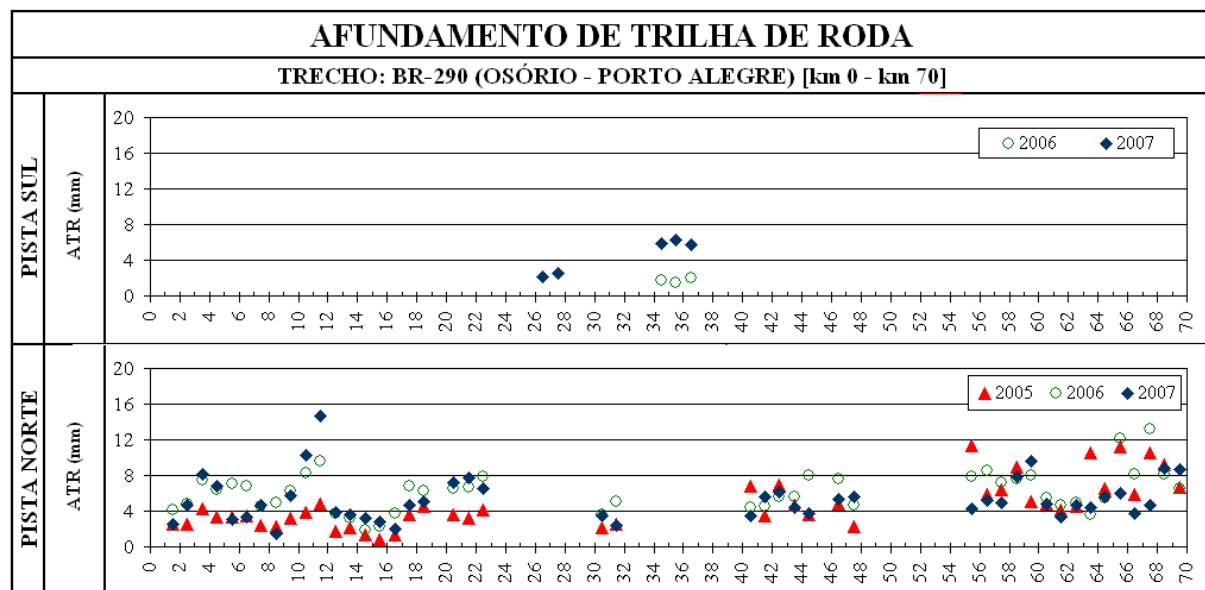


Figura 67: Dados de afundamento de trilha de roda considerados na pesquisa

8.1.8.3 Idade dos Pavimentos e Histórico do Tráfego

Para estimar o número de solicitações exercidas sobre o pavimento desde a sua construção até o momento do levantamento em consideração, foi preciso buscar os períodos de construção da estrutura de ampliação em cada segmento em análise da rodovia. A partir da determinação do período em que foi executada a estrutura e das informações de contagem de tráfego da rodovia, obteve-se o número equivalente de solicitações (N_{acum}) submetidas em cada segmento, conforme apresentado na Tabela 33.

Tabela 33: Período da construção da estrutura de pavimento nos segmentos do trecho em análise com a definição do número equivalente de operações

pista	estacas [km]	período da construção	número equivalente de operações (N_{acum}) [$\times 10^6$]
-------	--------------	-----------------------	------------------------------------------------------------------



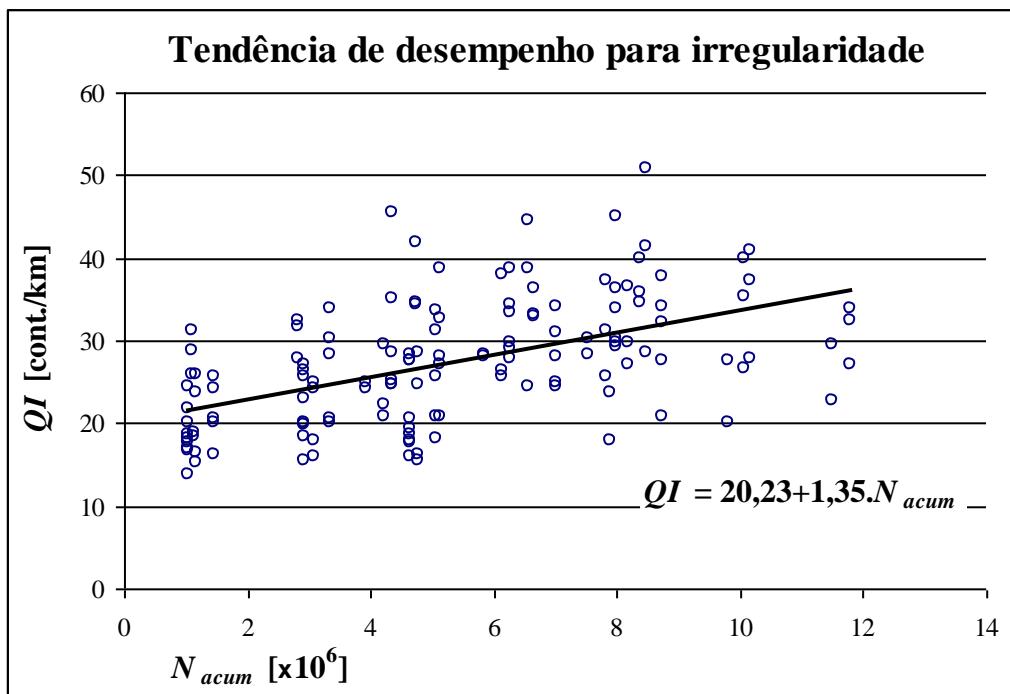
	sentido	Osório - Porto Alegre	1+000,00	a	10+000,00	out/04	barra laser		FWD	
							2005	2006	2007	
			10+000,00	a	15+000,00	jul/04	1,45	3,36	5,07	5,68
			15+000,00	a	19+000,00	set/04	1,17	3,07	4,78	5,40
			20+000,00	a	23+000,00	nov/02	4,22	6,12	7,83	8,45
			30+000,00	a	32+000,00	set/00	7,90	9,80	11,51	12,13
			40+000,00	a	45+000,00	abr/02	5,12	7,03	8,74	9,35
			46+000,00	a	48+000,00	jan/03	3,93	5,83	7,54	8,16
			55+000,00	a	58+000,00	jul/02	4,76	6,66	8,37	8,99
			58+000,00	a	64+000,00	out/02	4,37	6,27	7,98	8,59
			64+000,00	a	67+000,00	jun/01	6,56	8,47	10,18	10,79
			67+000,00	a	70+000,00	jul/00	8,17	10,08	11,79	12,40
			24+000,00	a	25+000,00	set/07	-	-	-	0,32
			26+000,00	a	28+000,00	nov/06	-	-	1,15	1,93
			29+000,00	a	31+000,00	dez/07	-	-	-	0,00
			31+000,00	a	33+000,00	nov/07	-	-	-	0,17
			34+000,00	a	37+000,00	nov/05	-	1,12	2,83	3,44

8.1.9 Intervenções nos pavimentos

Para definir os locais em que haviam sido realizadas intervenções com remendos profundos, buscou-se, no histórico da Concessionária, os serviços de conservação dos pavimentos executados desde o ano de 2000, quando iniciou, no trecho em análise, a construção das obras de ampliação.

8.1.10 LINHAS DE TENDÊNCIAS DE DESEMPENHO DESENVOLVIDA PARA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

Reunindo os dados (média por km) de Irregularidade Longitudinal obtidos para a estrutura em análise, nos levantamentos realizados em 2005, 2006 e 2007, em conjunto com as solicitações equivalentes de tráfego, obteve-se a regressão de tendência de desempenho para irregularidade apresenta na Figura 68 com os dados estatísticos descritos na Tabela 34.



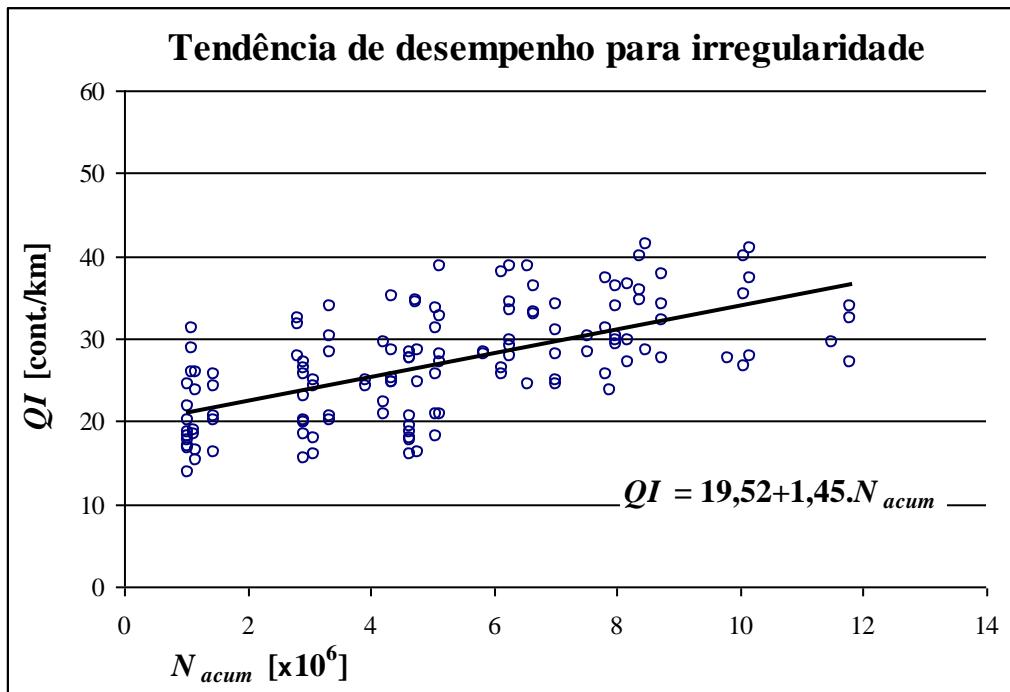


Figura 69: Evolução da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios

Tabela 35: Resultados estatísticos da relação da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios

		condição			condição
R^2 :	0,38	rejeitado	F :	2,61	
REMQP [%]:	5,25	aceito	F crítico:	1,33	teste rejeitado
F calculado:	81,48	teste aceito	T :	0,00	
F Tabelado:	3,91		t crítico:	1,65	teste aceito

Considerou-se, então, a influência das intervenções na Irregularidade Longitudinal dos pavimentos. Já excluindo os dados considerados espúrios (14 dados), obteve-se a regressão apresentada na Figura 70, com dados da análise descritos na Tabela 36.

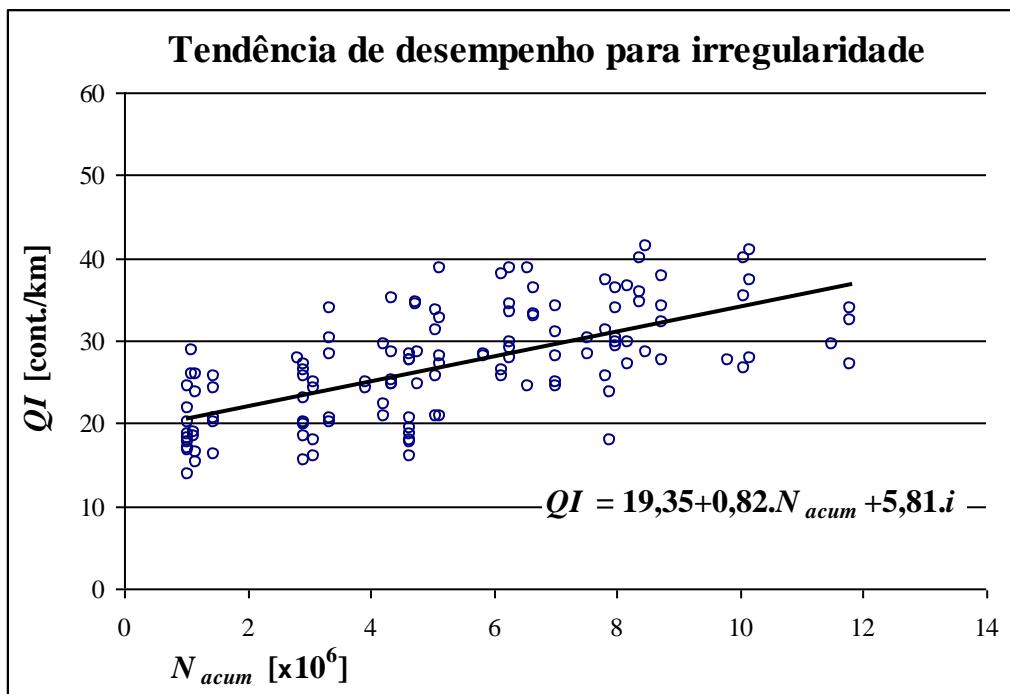


Figura 70: Evolução da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios e considerando as intervenções

Tabela 36: Resultados estatísticos da relação da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios e considerando as intervenções nos pavimentos

		<i>condição</i>	<i>Condição</i>	
R ² :	0,51	aceito	F:	1,94
REMQP [%]:	4,67	aceito	F crítico:	1,34
		teste rejeitado		
F calculado:	66,84	teste aceito	t:	0,00
F Tabelado:	3,07		t crítico:	1,65
		teste aceito		

Como se percebe, a regressão melhorou significativamente, atingindo parâmetros desejáveis na análise. A relação dos dados reais com os previstos (*Scatterplot*) pelo modelo de tendência de desempenho para Irregularidade Longitudinal é apresentada na Figura 71.

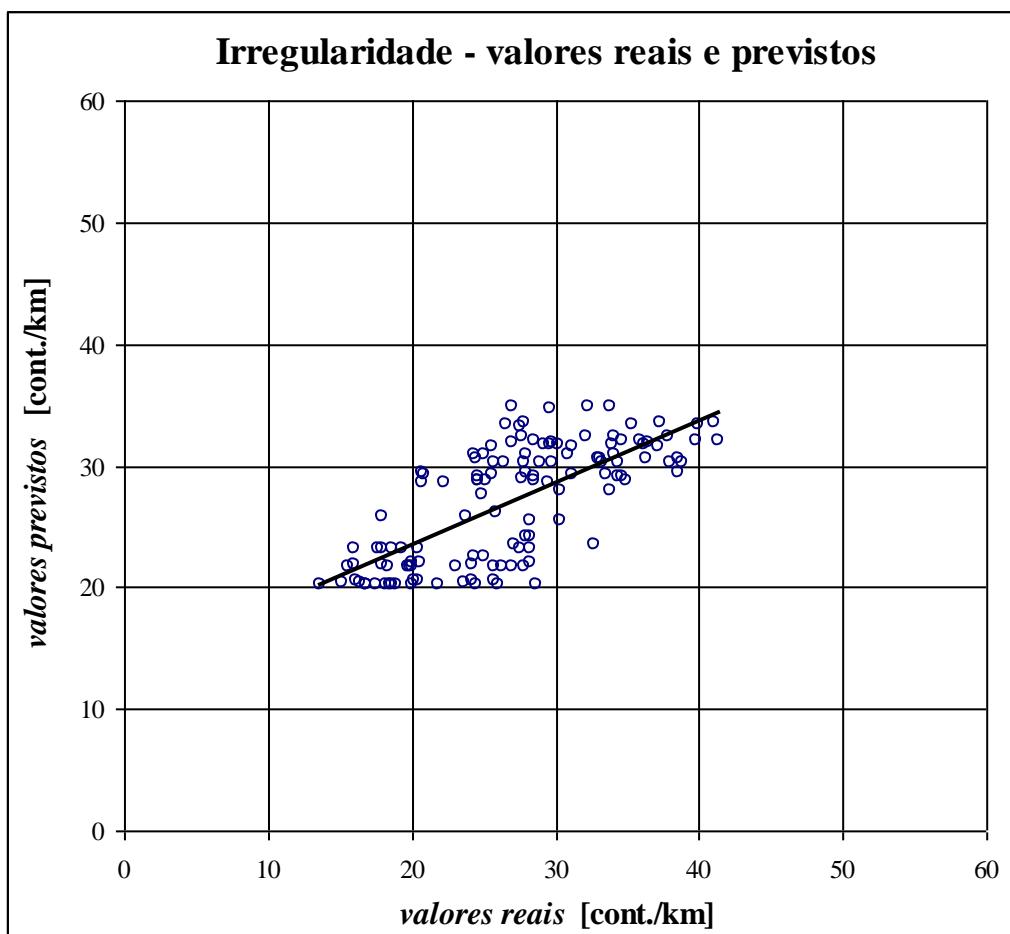


Figura 71: Scatterplot para a linha de tendência da Irregularidade Longitudinal

No entanto, o levantamento do ano de 2007 foi realizado com um procedimento diferente dos demais, eliminando dois sensores laser. Assim, realizou-se a verificação da influência dessa variação no procedimento de ensaio. Não houve, entretanto, melhora na regressão, como pode ser observado na Figura 72 e Tabela 37, nos quais os dados espúrios já foram desconsiderados (6 dados).

Assim verifica-se que, para a irregularidade, a redução dos sensores laser externos na barra do perfilômetro a laser não é influente nos resultados dos levantamentos, que é coerente, uma vez que a irregularidade é determinada pelos sensores laser das trilhas de roda.

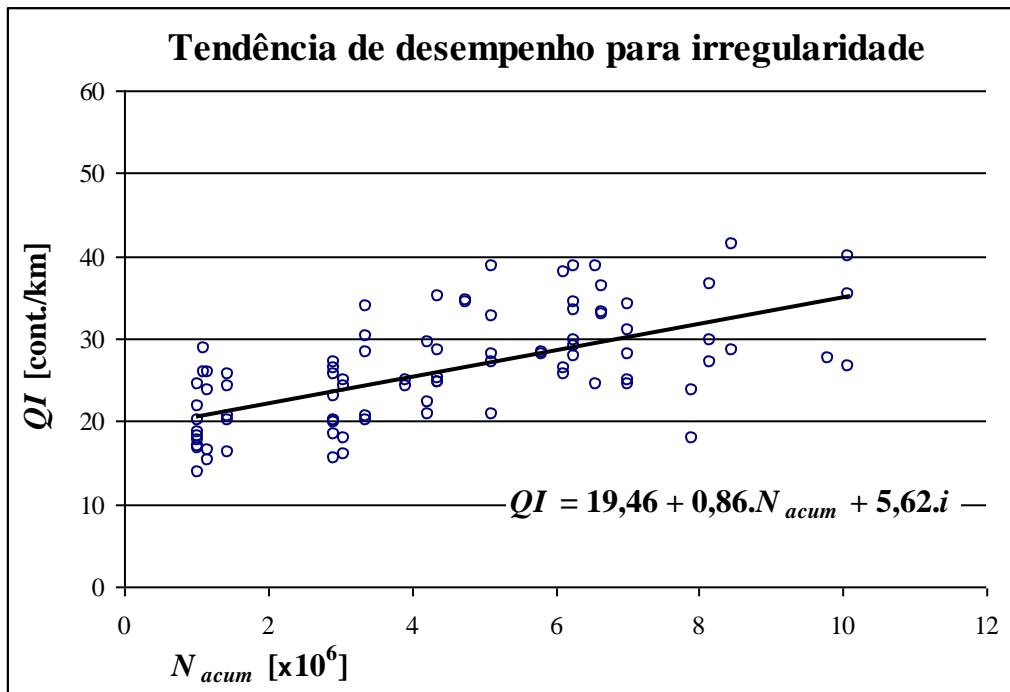


Figura 72: Evolução da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios, considerando as intervenções nos pavimentos e excluindo levantamento ocorrido em 2007

Tabela 37: Resultados estatísticos da relação da Irregularidade Longitudinal com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios, considerando as intervenções nos pavimentos e excluindo levantamento ocorrido em 2007

		<i>condição</i>	<i>Condição</i>	
R^2 :	0,49	rejeitado	F : 2,05	
REMQP [%]:	4,77	aceito	F crítico: 1,43	teste rejeitado
F calculado:	40,06		t: 0,00	
F Tabelado:	3,11	teste aceito	t crítico: 1,65	teste aceito

8.1.11 LINHAS DE TENDÊNCIAS DE DESEMPENHO DESENVOLVIDAS PARA AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA

Para o afundamento de trilha de roda, elaborou-se inicialmente, em conjunto com o número equivalente de solicitações, o modelo de tendência de desempenho com todos os dados dos levantamentos de 2005, 2006 e 2007. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 73 e Tabela 38.

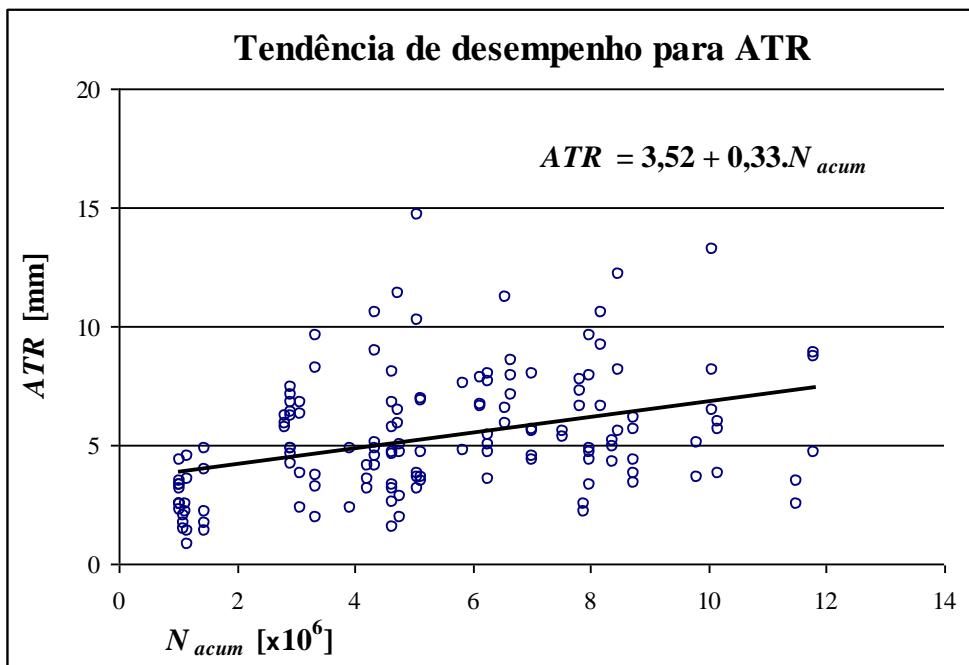


Figura 73: Evolução do afundamento de trilha de roda com o número de solicitações, considerando-se todos os dados

Tabela 38: Resultados estatísticos da relação do afundamento de trilha de roda com o número de solicitações, considerando-se todos os dados

		<i>condição</i>			<i>condição</i>
R ² :	0,14	rejeitado	F:	7,31	
REMQP [%]:	2,39	aceito	F crítico:	1,32	teste rejeitado
F calculado: 22,33		<i>teste aceito</i>	t:	0,00	
F Tabelado: 3,91			t crítico:	1,65	<i>teste aceito</i>

Através da exclusão estatística dos dados espúrios da análise, mesmo eliminando 19 dados, os resultados permaneceram bastante insatisfatórios, conforme ilustrado pela Figura 74 e Tabela 39.

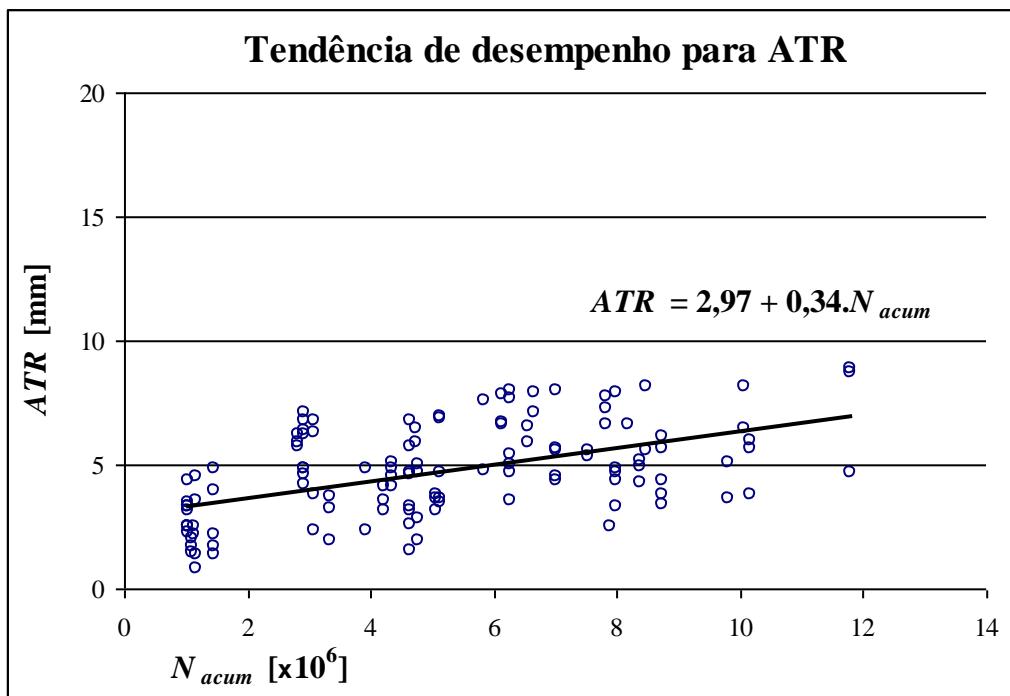
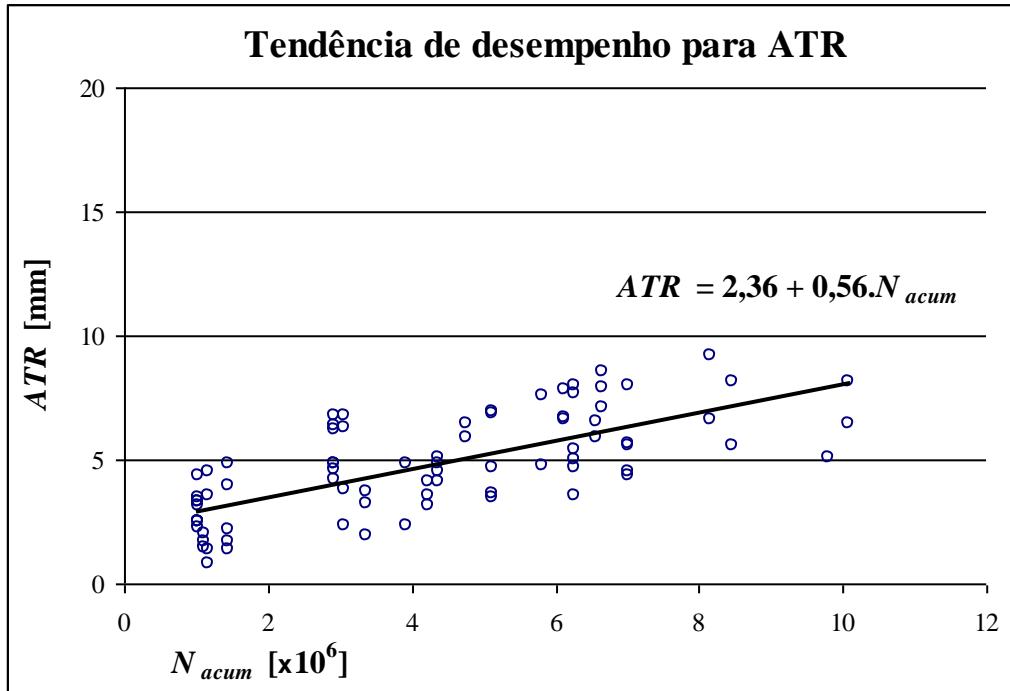


Figura 74: Evolução do afundamento de trilha de roda com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios

Tabela 39: Resultados estatísticos da relação do afundamento de trilha de roda com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios

		condição			condição
R ² :	0,27	rejeitado	F:	3,69	teste rejeitado
REMQP [%]:	1,60	aceito	F crítico:	1,35	
F calculado:	45,4	teste aceito	t:	0,00	teste aceito
F Tabelado:	3,9		t crítico:	1,65	

Como já destacado, no levantamento com o perfilômetro a laser realizado em 2007 eliminaram-se os sensores externos, com a medição ocorrendo somente com 3 sensores, diferentemente dos realizados anteriormente, em 2005 e 2006, nos quais fez-se uso de 5 sensores. Assim, realizando-se a análise somente com os dados de 2005 e 2006, já excluindo estatisticamente os dados espúrios (14 dados), chegou-se aos parâmetros estatísticos desejados, apresentados na Figura 75 e Tabela 40.



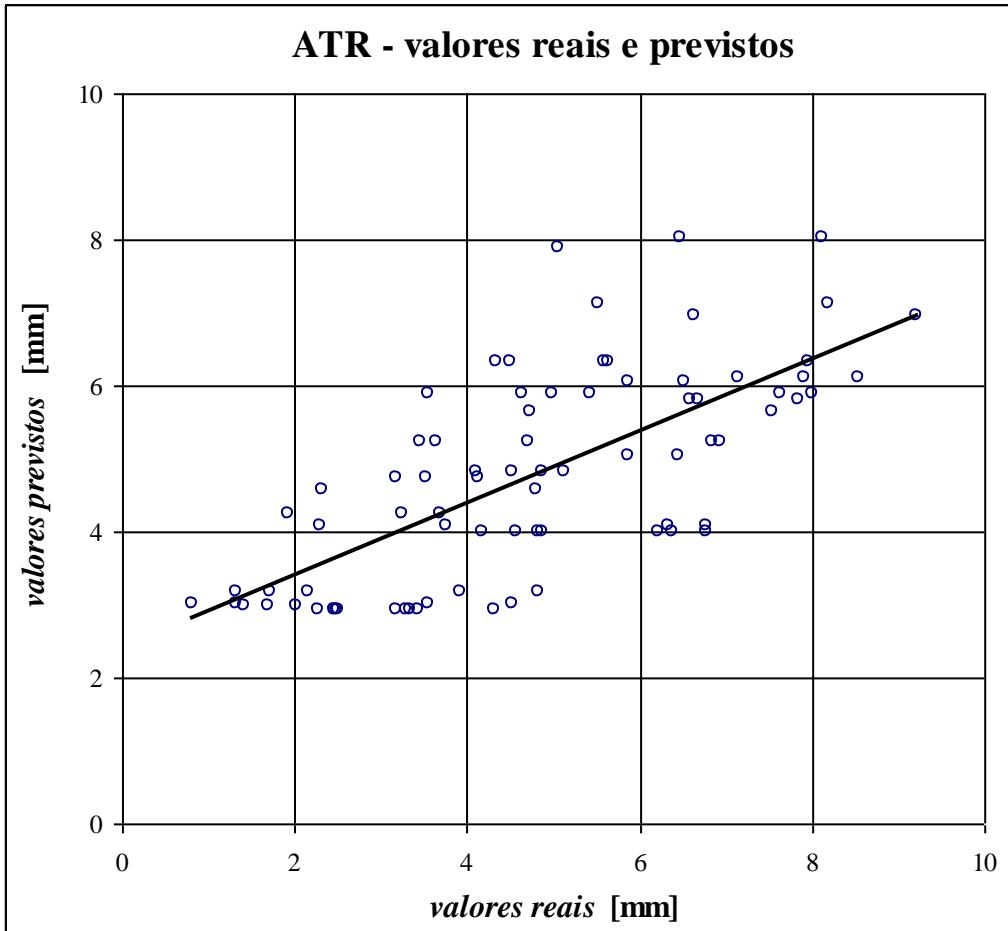


Figura 76: Scatterplot para a linha de tendência do afundamento de trilha de roda

A melhora dos resultados estatísticos evidencia a influência do procedimento do levantamento nas análises. Para a medida dos afundamentos de trilha de roda, diferentemente do levantamento para Irregularidade Longitudinal, o uso a menos de dois sensores interfere nos resultados. Os sensores externos são realmente utilizados no cálculo da trilha de roda, comprovando a variabilidade dos cálculos das trilhas de roda quando realizados a partir do levantamento com somente o sensor central e quando há os sensores externos, possibilitando a formação de um plano virtual do pavimento para ser comparado com os afundamentos nas trilhas.

Por fim, consideraram-se na análise as intervenções com remendos profundos realizadas nos pavimentos, obtendo, com a exclusão dos dados espúrios (11 dados), os resultados apresentados na Figura 77 e Tabela 41.

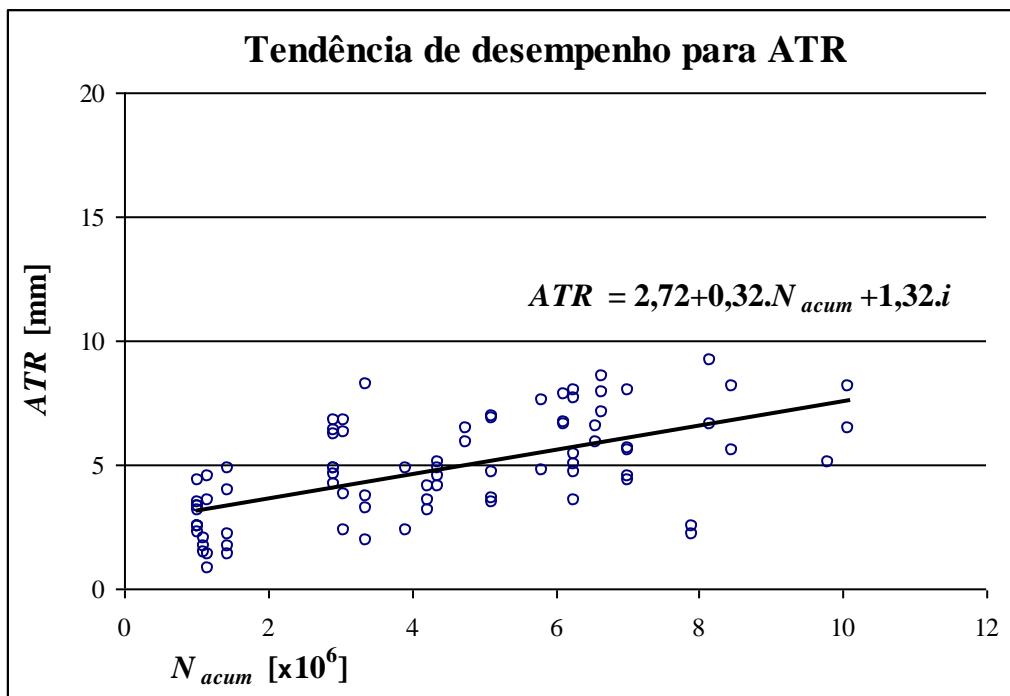


Figura 77: Evolução do ATR com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios, considerando as intervenções e excluindo levantamento ocorrido em 2007

Tabela 41: Resultados estatísticos da relação do ATR com o número de solicitações, excluindo-se os dados espúrios, considerando as intervenções nos pavimentos e excluindo levantamento ocorrido em 2007

		condição	Condição	
R ² :	0,43	rejeitado	F:	2,33
REMQP [%]:	1,57	aceito	F crítico:	1,44
F calculado:	29,69	teste aceito		t: 0,00
F Tabelado:	3,11	teste aceito		t crítico: 1,66

Os resultados considerando as intervenções não melhoraram os parâmetros estatísticos. Desse modo, percebe-se que os remendos profundos, realizados no trecho da BR-290/RS em análise, não modificaram os afundamentos de trilha de roda dos pavimentos. Os resultados evidenciam, assim, que os remendos realizados não têm como característica corrigir os afundamentos de trilha de roda. Conversando com técnicos da Concessionária que administra a rodovia, bem como em idas a campo, comprehendeu-se tal fato observando que os remendos, por serem, na maioria, realizados somente nas trilhas de roda (remendos do tipo “apenas nas trilhas de roda”, sendo extensos, mas estreitos), acabam tendo que



acompanhar as deformações transversais já existentes nos pavimentos, permanecendo os afundamentos.

8.1.12 SÍNTESE DOS MODELOS OBTIDOS POR VITORELLO (2008)

A Tabela 42 descreve os levantamentos considerados na análise deste estudo.

Tabela 42: Resumo dos levantamentos considerados nesta pesquisa

PARÂMETRO	EQUIPAMENTO	PERÍODO DO LEVANTAMENTO		
deflexões	FWD	out-dez/2007		
Irregularidade Longitudinal	perfilômetro a laser	abr/2005 (5 sensores)	jun/2006 (5 sensores)	jul/2007 (3 sensores)
afundamento de trilha de roda				

Relacionando os dados desses levantamentos com o número equivalente de solicitações exercidas sobre os pavimentos desde a sua construção até o período do levantamento, obtiveram-se correlações lineares representativas das condições dos pavimentos. A Tabela 43 apresenta os dados estatísticos dos melhores ajustes realizados para cada parâmetro, sendo as melhores regressões propostas para descrever a tendência de desempenho da estrutura de pavimento em análise.



Tabela 43: Resumo dos melhores ajustes de linhas de tendências de desempenho propostas por Vitorello (2008)

	Irregularidade Longitudinal	Afundamento de Trilha de Roda	
modelo proposto:	$QI = 19,35 + 0,82.N_{acum} + 5,81.i$		$ATR = 2,36 + 0,56.N_{acum}$
<i>observação :</i>	<i>i = 0</i> , segmento sem intervenção <i>i = 1</i> , segmento com intervenção	sem considerar levantamento de ATR de 2007 (3 sensores)	
R²:	0,51	<i>Condição</i>	<i>condição</i>
REMQP [%]:	4,67	<i>Aceito</i>	<i>aceito</i>
F calculado:	66,84	75,10	<i>teste aceito</i>
F Tabelado:	3,07	4,00	
F:	1,94	2,03	<i>teste rejeitado</i>
F crítico:	1,34	1,45	
t:	0,00	0,00	<i>teste aceito</i>
t crítico:	1,65	1,66	

8.2 COMPARAÇÕES ENTRE VALORES PREVISTOS DE IRI E DE ATR EMPREGANDO O ME-PDG E VALORES PREVISTOS COM AS LINHAS DE TENDÊNCIA OBTIDAS POR VITORELLO (2008)

Como coroamento desta ampla pesquisa realizada por pesquisadores da empresa S&T Engenharia, Arquitetura e Meio Ambiente e da Concessionária Concea, apresentam-se, a seguir, comparações entre valores previstos de Irregularidade Longitudinal (na escala IRI) e Afundamentos nas Trilhas, empregando-se os modelos da AASHTO, incorporados no software ME-PDG, e os modelos obtidos por Vitorello (2008).

Para tal, foi necessário fazer algumas transformações:



- a) A Irregularidade Longitudinal, que no modelo de Vitorello (2008) é expressa na escala QI (unidade contagens/km) foi transformada para a escala IRI (cuja unidade é m/km); e
- b) As solicitações do tráfego, que nos modelos de Vitorello (2008) são expressas em números equivalentes de operações de eixo padrão (N), com emprego dos fatores de equivalência de carga da AASHTO, foram transformadas em tempo decorrido desde a abertura do pavimento ao tráfego (em meses).

Como os modelos de Vitorello (2008) foram obtidos a partir de levantamentos realizados exclusivamente na Freeway (trecho da BR-290/RS), as comparações se limitam a valores previstos para esse trecho rodoviário.

8.2.1 Comparações entre valores previstos de Irregularidade Longitudinal

A Figura 78 apresenta as evoluções da Irregularidade Longitudinal na escala IRI, previstas pelo ME-PDG (considerando-se as condições sem sobrecarga e com sobre carga) e pelo modelo obtido por Vitorello (2008), apresentado no item 8.1.12 deste Relatório. Inclui-se nessa Figura uma linha vermelha que indica o valor máximo admissível de IRI (2,7 m/km, correspondente a QI = 35 cont/km).

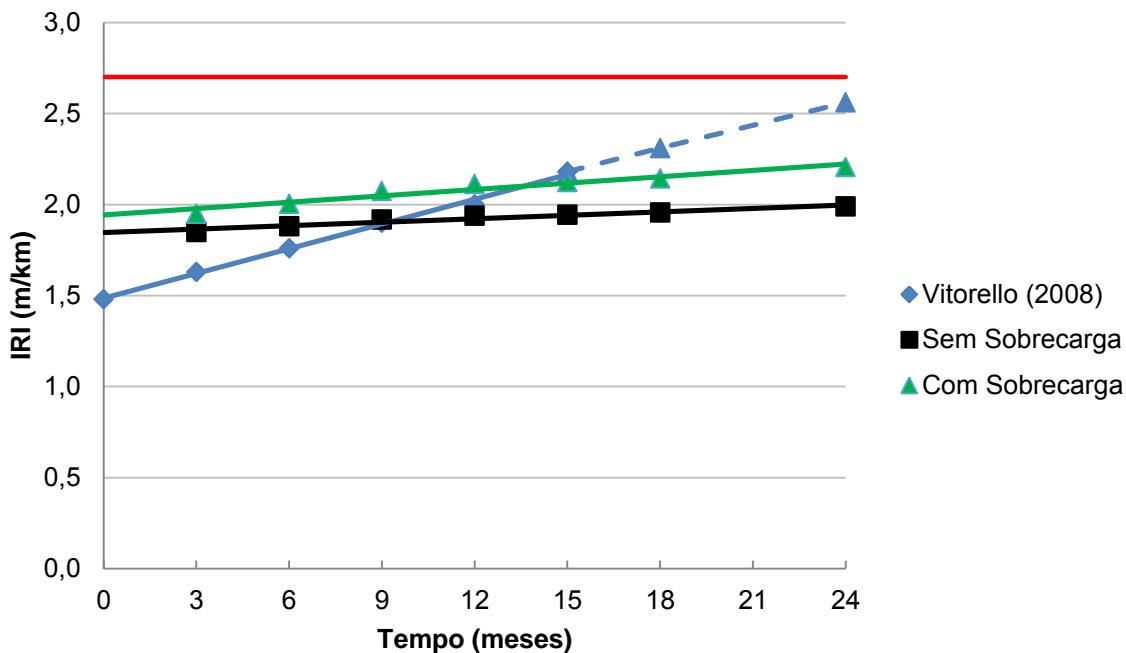


Figura 78: Evoluções da Irregularidade Longitudinal (escala IRI) previstas pelos modelos do ME-PDG (sem sobrecarga e com sobrecarga) e de Vitorello (2008)

Na Figura 78 observa-se que:

- A evolução da Irregularidade Longitudinal prevista pelo modelo de Vitorello (2008) é muito mais severa que as estimadas com emprego do ME-PDG;
- Mesmo partindo de valor inicial de IRI bastante baixo (1,5 m/km, equivalente a aproximadamente 20 cont/km), segundo a previsão do modelo de Vitorello (2008) o valor máximo aceitável de IRI (2,7 m/km ou 35 cont/km) será alcançado pouco depois de dois anos de abertura do pavimento ao tráfego. Este fato parece indicar que a sobrecarga atuante no pavimento da Freeway é, na realidade, muito superior à aferida³⁴ nas balanças instaladas no km 65 da rodovia;
- Aparentemente, o modelo do ME-PDG para evolução de Irregularidade Longitudinal não é muito afetada pela sobrecarga. Na análise sem sobrecarga, o IRI após 24 meses de tráfego é de 1,99 m/km, enquanto ao ser

³⁴ Salienta-se que as referidas balanças operam apenas em horário comercial e dias úteis. É lícito supor que os transportadores que costumeiramente sobrecarregam seus veículos evitem os horários de operação das balanças.

considerada a sobrecarga o IRI previsto é de 2,21 m/km, ou seja, aumento de pouco mais de 10%.

8.2.2 Comparações entre valores previstos de Afundamentos nas Trilhas de Roda

A Figura 79 apresenta as evoluções dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR), previstas pelo ME-PDG (considerando-se as condições sem sobrecarga e com sobre carga) e pelo modelo obtido por Vitorello (2008), apresentado no item 8.1.12 deste Relatório. Inclui-se nessa Figura uma linha vermelha que indica o valor máximo admissível de ATR (5 mm).

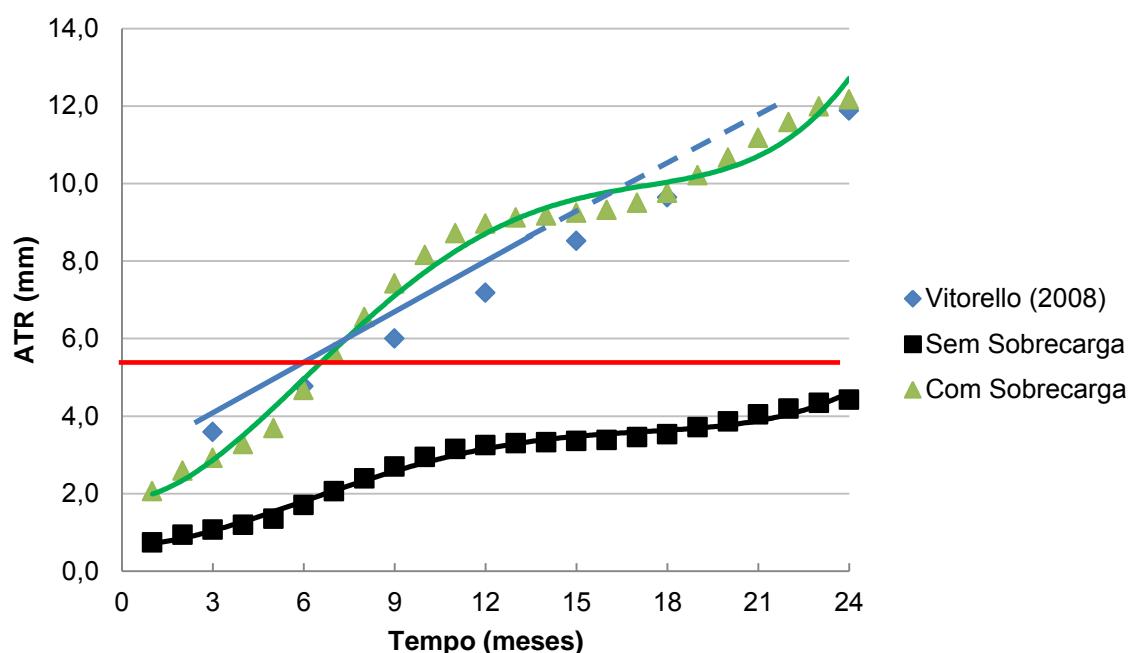


Figura 79: Evoluções dos Afundamentos nas Trilhas de Roda previstas pelos modelos do ME-PDG (sem sobrecarga e com sobrecarga) e de Vitorello (2008)

Na Figura 79 observa-se que:

- A evolução do Afundamento na Trilha de Roda prevista pelo modelo de Vitorello (2008) é muito parecida à estimada com emprego do ME-PDG para a condição “com sobrecarga”; e
- O efeito da sobrecarga na evolução do ATR é extremamente danoso ao pavimento. Enquanto que a análise sem sobrecarga indica que o valor

máximo aceitável de ATR (5 mm) seria alcançado após 24 meses de tráfego, esse valor terminal será alcançado em apenas 6 meses se o pavimento for solicitado por tráfego com sobrecarga.

8.2.3 Conclusões da pesquisa realizada por Vitorello (2008)

O estudo realizado por Vitorello (2008) permitiu a obtenção de modelos de previsão (ou linhas de tendências, como esse autor as classificou) de desempenho, possibilitando a eficaz gerência do pavimento. A seguir, estão descritas as principais conclusões obtidas nesse estudo:

- A reunião de todos os dados do banco de dados fornecido pela Concessionária que administra a rodovia no trecho em análise possibilitou estimar tendências particulares para o pavimento, fato esse essencial na gerência de pavimentos, em que muitas vezes assumem-se modelos genéricos de previsão de desempenho, elaborados para condições dos pavimentos diferentes do administrado;
- A partir também do conjunto de dados do histórico da construção dos pavimentos da rodovia, definiu-se o volume de tráfego aos quais os pavimentos foram solicitados e, a partir desses dados, formularam-se tendências de comportamento de desempenho para Irregularidade Longitudinal e afundamento de trilha de roda;
- Para cada parâmetro, realizaram-se análises estatísticas, que se mostraram adequadas com a exclusão de dados não representativos (denominados de dados espúrios), considerados, na dissertação de Vitorello (2008), aqueles que possuíssem diferença entre o valor real e o estimado superior a duas vezes o desvio padrão da amostra. Houve, seguindo esse procedimento de exclusão de dados não significativos, a melhora significativa dos coeficientes de determinação das regressões lineares propostas;
- Para a Irregularidade Longitudinal, as intervenções realizadas com remendos profundos influenciaram diretamente na variação do parâmetro QI com a evolução do tráfego, representado pelo número equivalente de operações;



- As intervenções com remendos profundos não acarretaram em variações dos Afundamentos nas trilhas de Roda, em função principalmente das configurações dos remendos típicos executados na rodovia, que se caracterizam por serem realizados, na grande maioria, apenas nas trilhas de rodas, sendo extensos a ponto de corrigir a irregularidade, mas, por serem apenas nas trilhas, acompanham a deformação transversal da pista, não corrigindo por completo as deformações permanentes das trilhas. Para o afundamento de trilha de rodas os remendos executados não são eficazes.
- A diferenciação do procedimento do ensaio com o perfilômetro a laser, medindo Irregularidade Longitudinal e Afundamentos nas Trilhas de Roda, passando de 5 para 3 sensores a laser foi determinante no acompanhamento da variação do ATR, por utilizar, no cálculo do parâmetro, os dados dos 5 sensores, enquanto para a variação do QI tal mudança de procedimento não afetou os resultados, até mesmo pelo fato desse parâmetro ser obtido pelas leituras apenas dos sensores das trilhas.
- Todos os modelos desenvolvidos apresentaram uma nítida tendência do desempenho da estrutura analisada, sendo indicado o uso dos mesmos como ferramentas de auxílio para a gerência da malha viária. A confiabilidade dos dados reunidos (estrutura, idade, intervenções ocorridas, tráfego, procedimento adotado nos levantamentos) foi determinante para a elaboração dos modelos propostos.



9 CONCLUSÕES

9.1 RELATÓRIO I

No 1º Relatório foram apresentadas as principais características do software ME-PDG da AASHTO, o qual foi empregado na continuidade da pesquisa na avaliação dos efeitos de novos tipos de veículos comerciais e de excessos de cargas no desempenho de pavimentos representativos de rodovias com volume de tráfego elevado no Sul do País.

Lembra-se que o referido software foi empregado na realização de um estudo de sensibilidade para avaliar os efeitos de mudanças na granulometria dos agregados e no tipo de ligante (convencionais e modificados) no desempenho de pavimentos.

Foram apresentados os resultados de um Estudo de Tráfego completo realizado em base a contagens classificatórias realizadas em dois postos localizados nos municípios de Capão de Canoa e Torres, na BR-101/RS.

Em um enfoque diferenciado foram também apresentados dados de tráfego obtidos junto às praças de pedágio localizadas nos municípios de Santo Antônio da Patrulha e Gravataí, na BR-290/RS. Estes dados foram organizados na forma em que foram empregados nas análises realizadas com o ME-PDG, ou seja, considerando o espectro de carga ao invés do número de operações do eixo padrão (número N).

9.2 RELATÓRIO II

As principais conclusões inferidas a partir das análises desenvolvidas no 2º Relatório de Pesquisa foram as seguintes:

9.2.1 Quanto à ocorrência de sobrecarga na Rodovia Br-290/RS (Freeway)

- a) o excesso de carga na Freeway é uma realidade: 14% e 17% dos veículos pesados nas Balanças Sul e Norte apresentaram PBT superior ao limite;
- b) os excessos de carga são semelhantes nos dois sentidos da rodovia;
- c) a maior incidência de sobrecarga se dá nos eixos simples: 11% na Balança Sul e 14% na Norte, a máxima carga de eixo simples medida foi de 17,5 tf;

- d) a incidência de excesso de carga é menor nos eixos tandem duplos (7 e 5%) e triplos (6 e 2%). A maior carga de exio tandem duplo pesada foi de 29,57 tf, enquanto que a maior carga de eixo tandem triplo foi de 57,58 tf; e
- 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.

9.2.2 Quanto aos efeitos da ocorrência de sobrecarga e do aumento da pressão de inflação dos pneus no desempenho do pavimento da BR-290/RS

- A influência da pressão dos pneus na evolução da **Irregularidade Longitudinal** não é significativa quando os veículos trafegam sem sobrecarga. Contudo, quando os veículos trafegam com sobrecarga, a Irregularidade aumenta mais rapidamente, quanto maior for a pressão de inflação dos pneus.
- Se os veículos trafegarem sem sobrecarga, o pavimento ao cabo de 10 anos não apresentará Irregularidade acima do limite do PER, qual seja 2,70 m/km. Já se os veículos trafegarem com sobrecarga a Irregularidade máxima será atingida em aproximadamente 4 anos.
- A ocorrência de sobrecarga resulta em aumento de 55% nos **afundamentos nas trilhas de roda** (ATR). Os efeitos da pressão de inflação nos pneus são mais modestos, embora não desprezíveis (aproximadamente 15%).
- Os elevados valores de ATR expõem a suscetibilidade das misturas asfálticas características do sul do País ao acúmulo de deformações permanentes, considerando o tráfego pesado e as condições climáticas adversas (temperaturas elevadíssimas na superfície do pavimento).
- É relevante observar que, se os veículos trafegam com sobrecarga, o **Trincamento de Cima para Baixo** (Top-down Cracking ou TDC) começa a manifestar-se tão logo o pavimento é aberto ao tráfego. Isto tem-se observado em pavimentos recentemente construídos na Região Sul do País, evidenciando que as tensões cisalhantes geradas por parte dos veículos comerciais excede a resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica.



- Em termos de **Trincamento por Fadiga** (TF), constatou-se que a ocorrência de sobrecarga aumenta o percentual de área trincada em 7,76 vezes quando a pressão de inflação é 150 psi e em 9,23 para a pressão de 120 psi.
- Se não houver sobrecarga solicitando o pavimento, o percentual de área trincada, devido à fadiga, ao cabo de 10 anos será inferior a 10%. Entretanto, se o pavimento for solicitado por veículos com excesso de carga, o pavimento apresentará forte trincamento por fadiga de 3 a 4 anos após sua entrada em operação.

9.2.3 Quanto aos efeitos da taxa de crescimento do tráfego e do aumento da pressão de inflação dos pneus no desempenho do pavimento da BR-101/RS

- As degradações (Irregularidade Longitudinal, ATR, Trincamento por Fadiga e Trincamento de Cima para Baixo) se processarão mais rapidamente no pavimento do Lote 1 do que no pavimento do Lote 3. O pavimento do Lote 1 sofrerá trincamento pro fadiga e ATR em magnitudes muito superiores às que experimentará o pavimento do Lote 3. Isso é coerente, pois o volume de tráfego previsto para o Lote 1 é maior e também porque a espessura total de camadas asfálticas é menor (15 cm no Lote1; 17 cm no Lote3).
- Nos dois pavimentos, o Trincamento de cima para baixo (top-down cracking - TDC) se manifestará já nos primeiros meses de abertura ao tráfego, tanto na superfície quanto à profundidade de 12,7 mm (0,5");;
- A taxa de crescimento anual do tráfego comercial (3 ou 5%) não parece afetar de forma significativa a evolução dos parâmetros de desempenho. Os efeitos são mais claros quando se analisam os ATR e o TDC, mas são imperceptíveis quando se analisa a Irregularidade Longitudinal e o Trincamento por Fadiga.
- Os efeitos da pressão de inflação nos parâmetros de desempenho analisados não são desprezíveis no pavimento do Lote 3 e são muito significativos nos parâmetros de desempenho do pavimento do lote 1.



- As elevadas pressões de inflação são mais nocivas quando se analisa a evolução dos afundamentos nas trilhas de roda, os quais sofrem incrementos da ordem de 25% e aceleram o processo de degradação dos pavimentos.
- Em função do mais elevado volume de carga e da estrutura mais delgada do pavimento do lote 1, comparado com o do lote 3, os efeitos da pressão de inflação nos pneus são mais notáveis no primeiro.

9.3 RELATÓRIO III

As principais conclusões inferidas a partir das análises desenvolvidas no 3º Relatório de Pesquisa foram as seguintes:

9.3.1 Quanto à ocorrência de sobrecarga nas Rodovias BR-290/RS e BR-101/RS

- f) o excesso de carga nessas rodovias é uma realidade. De 14% a 17% dos veículos pesados nas Balanças Sul e Norte apresentaram PBT superior ao limite;
- g) os excessos de carga são semelhantes nos dois sentidos da rodovia;
- h) a maior incidência de sobrecarga se dá nos eixos simples: 11% na Balança Sul e 14% na Norte. A máxima carga de eixo simples medida foi de 17,5 tf;
- i) a incidência de excesso de carga é menor nos eixos tandem duplos (7 e 5%) e triplos (6 e 2%). A maior carga de exio tandem duplo pesada foi de 29,57 tf, enquanto que a maior carga de eixo tandem triplo foi de 57,58 tf; e
- j) 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.

9.3.2 Quanto aos efeitos da ocorrência de sobrecarga no desempenho do pavimento da BR-101/RS

Neste Relatório reavaliou-se o volume de tráfego que solicitará os pavimentos da Obra de Ampliação de Capacidade e Modernização da BR-101/RS, trecho Torres-Maquiné, propiciando análises mais realistas. Também estimou-se o desempenho dos pavimentos, com emprego do software ME-PDG da AASHTO, quantificando-se



os efeitos do excesso de carga evidenciado em pesagens realizadas nas balanças instaladas na Freeway, não considerado nos Projetos realizados há mais de 10 anos. Comparam-se os desempenhos estimados para pavimentos dos Lotes 1e 3.

- Ao considerar-se o tráfego real (com sobrecarga), constatou-se que os ATR acumulados serão entre 75% e 85% superiores aos correspondentes ao tráfego dos Projetos (sem sobrecarga). O valor limite (7 mm) de ATR será atingido em tempos cerca de três vezes menores.
- O percentual de área com trincamento por fadiga aumentará mais de 9 vezes, em função da sobrecarga registrada no tráfego real.
- O trincamento de cima para baixo (*top down cracking* ou TDC), mecanismo de degradação recentemente identificado, também será significativamente afetado pelo excesso de carga do tráfego real (com sobrecarga), processando-se 3 vezes mais rapidamente do que se fosse considerado o tráfego dos Projetos.
- Embora sem alcançar valor limite (IRI = 2,70 m/km), a Irregularidade Longitudinal correspondente ao tráfego com sobrecarga também será superior à correspondente ao tráfego sem sobrecarga, em percentuais que variam de 14,1% (Lote 3) a 18,9% (Lote 1).

9.3.3 Quanto aos efeitos da composição das misturas asfálticas no desempenho de pavimentos

Neste Relatório foram apresentados os resultados de um Estudo Preliminar sobre o efeito da composição (tipo e teor de ligante e composição granulométrica dos agregados) de misturas asfálticas no desempenho de pavimentos, empregando-se os modelos de previsão de desempenho do ME-PDG.

Foram consideradas 4 misturas asfálticas e o pavimento da obra de ampliação da BR-290/RS, trecho Osório-Porto Alegre (Freeway). Apesar de tratar-se de um estudo preliminar, algumas constatações importantes foram feitas:

- a) As evoluções da Irregularidade Longitudinal e dos Afundamentos nas Trilhas de Roda não foram significativamente afetadas pelas composições das misturas asfálticas consideradas, para o pavimento analisado. Contudo, deve



enfatizar-se que a composição granulométrica das misturas consideradas é bastante semelhante, quase sempre com mais de 50% em peso passando na peneira N° 4 e retido na peneira N° 200 (a chamada “fração areia”). Certamente, com granulometrias mais grosseiras (maior percentual de agregados graúdos e menor proporção da fração areia), os ATRs seriam significativamente menores do que os previstos para as misturas analisadas, consideradas “finas”.

- b) As evoluções do trincamento por fadiga e do trincamento de cima para baixo (*Top-down Cracking – TDC*) parecem ser afetados de forma mais significativa pela composição das misturas asfálticas. Foi possível diferenciar dois grupos de comportamento: as misturas asfálticas “mais secas” (teores de ligantes em volume da ordem de 11%) mostraram-se mais suscetíveis aos trincamentos do que as misturas com teores superiores de ligante (da ordem de 13% em volume).
- c) Comparando-se as evoluções dos trincamentos nos pavimentos da rodovia BR-101/RS com as correspondentes ao pavimento da BR-290/RS, concluiu-se que nos pavimentos com camadas asfálticas espessas da BR-101/RS (15 a 17 cm) o trincamento mais significativo é o que ocorre de cima para baixo (TDC – Top Down Cracking); enquanto que no pavimento da BR-290/RS, com espessura total de camada asfáltica de 8 cm predomina o trincamento por fadiga.

9.4 RELATÓRIO IV

A comparação entre previsões de Irregularidade Longitudinal e de ATR feitas com emprego de modelos da AASHTO (contemplando, ou não, a possibilidade de sobrecarga) e obtidos por Vitorello (2008) permite concluir que:

- a) A evolução da Irregularidade Longitudinal prevista pelo modelo de Vitorello (2008) é muito mais severa que as estimadas com emprego do ME-PDG;
- b) À luz da evolução da Irregularidade Longitudinal prevista com aplicação do modelo de Vitorello (2008), é lícito concluir que a sobrecarga atuante no pavimento da Freeway é, na realidade, muito superior à aferida nas balanças instaladas no km 65 da rodovia;
- c) Aparentemente, o modelo do ME-PDG para evolução de Irregularidade Longitudinal não é muito afetada pela sobrecarga.
- d) A evolução do Afundamento na Trilha de Roda prevista pelo modelo de Vitorello (2008) é muito parecida à estimada com emprego do ME-PDG para a condição “com sobrecarga”;
- e) O efeito da sobrecarga na evolução do ATR é extremamente danoso ao pavimento, podendo aumentar sua degradação em 4 vezes.
- f) Pelo exposto acima, resulta evidente a necessidade de adotarem-se medidas mais severas no controle da carga atuante sobre os pavimentos, sob risco de reduzir-se notavelmente a vida útil dos mesmos.
- g) O fato de que, mesmo quando não se considera a hipótese de sobrecarga, o ATR máximo aceitável pelo PER (5 mm) seja atingido em poucos anos, sugere a necessidade de estudar-se de forma mais aprofundada (e talvez inovadora) os efeitos combinados das elevadas pressões de contato pneu-pavimento e elevadas cargas de roda nas tensões cisalhantes geradas próximo à superfície de pavimentos asfálticos. Afinal, essas tensões são as causadoras de deformações plásticas do revestimento asfáltico, que se manifestam na forma de ATR.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBO, J. T. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: MATERIAIS, PROJETO E RESTAURAÇÃO**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BARELLA, R.M. **Contribuição para a Avaliação da Irregularidade Longitudinal de Pavimentos com Perfilômetros Inerciais**. Tese de doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2008. 362 p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Petrobrás / ABEDA. Rio de Janeiro - RJ, 2006. 501 p.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Medição da Irregularidade de Superfície de Pavimento com Sistemas Integradores IPR/USP e Maysmeter**. DNER-PRO 182/94. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **MANUAL DE ESTUDOS DE TRÁFEGO**. DNIT. Rio de Janeiro: IPR, 2006. 384 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **POSTOS DE CONTAGEM VMD**. DNIT. 2001. Disponível em: <<https://gestao.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviarias/postos-de-contagem>>. Acesso em: 20 jan. 2010.

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