

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Felipe Garcia

**AVALIAÇÃO DO ESPECTRO DE CARGA E DO
CRESCIMENTO DO VOLUME DE TRÁFEGO NO
DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM O USO
DO SOFTWARE M-E PDG: TRECHOS DA BR-101 E BR-290**

Porto Alegre
dezembro 2010

FELIPE GARCIA

**AVALIAÇÃO DO ESPECTRO DE CARGA E DO
CRESCIMENTO DO VOLUME DE TRÁFEGO NO
DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM O USO
DO SOFTWARE M-E PDG: TRECHOS DA BR-101 E BR-290**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Washington Peres Núñez

Porto Alegre
dezembro 2010

FELIPE GARCIA

**AVALIAÇÃO DO ESPECTRO DE CARGA E DO
CRESCIMENTO DO VOLUME DE TRÁFEGO NO
DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM O USO
DO SOFTWARE M-E PDG: TRECHOS DA BR-101 E BR-290**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 20 de dezembro de 2010

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Profª. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Eng. Lélío Antônio Brito (Concessionária Concepa)
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

Dedico este trabalho a meus pais, Vinício e Mara, e aos meus amigos, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Washington Peres Núñez, orientador deste trabalho, pelo tempo que dedicou em auxiliar e pelo conhecimento que me passou nesse ano.

Agradeço à Prof. Carin Maria Schmitt, coordenadora do Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, pelo empenho em ajudar na organização e no correto andamento do trabalho.

Agradeço aos meus colegas do curso de graduação, que durante toda essa época estiveram presentes, nos bons e nos maus momentos, para ajudar, aconselhar, ensinar, rir e compartilhar todos os sentimentos que essa fase da vida nos traz.

Agradeço aos meus amigos do tempo de colégio, pelo companheirismo durante todos esses anos. Obrigado pelo apoio.

Agradeço às minhas amigas Jordana e Luiza, por tanto me ouvirem e me apoiarem em todos os momentos. Durante todos esses anos, se tornaram parte da minha família.

Agradeço aos meus irmãos Gustavo e Daniela, à minha sobrinha Giovanna e ao meu tio Celso, por todo carinho que sempre tiveram comigo.

Agradeço aos meus pais, Vinício e Mara, pela vida, pela educação, pelo carinho e amor que sempre me deram.

É preciso força pra sonhar e perceber que a estrada vai
além do que se vê.

Marcelo Camelo

RESUMO

GARCIA, F. **Avaliação do Espectro de Carga e do Crescimento do Volume de Tráfego no Desempenho de Pavimentos Flexíveis com o Uso do Software M-E PDG:** trechos da BR-101 e BR-290. 2010. 85 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Garantir resistência adequada aos esforços produzidos pelo tráfego aliado à economia, conforto e segurança, são requisitos fundamentais no projeto de pavimentos. Para isso, é necessário que se identifiquem as cargas de eixo que atuarão no pavimento e se faça um estudo adequado de como essas cargas afetarão a estrutura no que diz respeito ao seu desempenho. Pode-se subdividir o desempenho em estrutural (relativo ao desgaste) e funcional (conforto e segurança). Através de modelos mecanístico-empíricos de previsão de desempenho, pode-se ter conhecimento dos danos estruturais e funcionais que a estrutura de pavimento (no caso estudado, pavimento flexível) acumulará durante o período de projeto. Estes dados de previsão de desempenho são imprescindíveis para o projeto, permitindo prever o tempo até serem necessárias possíveis manutenções ou reabilitações e, até mesmo, achar alguma alternativa para prolongar esse tempo. O presente trabalho visou aplicar espectros de carga e fatores de crescimento de tráfego variados em um trecho da rodovia BR-290 e em dois trechos da BR-101. Estes espectros foram baseados em veículos com peso de até 48,5 tf, veículos que atualmente trafegam nos trechos e uma possível tendência de substituição de veículos menores e mais leves por veículos maiores e mais pesados. Os fatores de crescimento de tráfego utilizados foram de 3%, 4% e 5%. Foi empregado o software M-E PDG no estudo, fazendo-se uma análise dos danos que serão acumulados na estrutura de pavimento devido aos espectros e aos fatores de crescimento. Os resultados dos efeitos nas estruturas de pavimento sob a aplicação dos espectros de carga foi bastante significativo. Entre os parâmetros que sofreram maiores variações em todos os trechos estão a deformação permanente e o trincamento de cima para baixo. Já os resultados dos efeitos em virtude da variação do fator de crescimento de tráfego foram pouco expressivos, podendo-se então concluir que o valor da carga aplicada pelo tráfego é mais relevante no desgaste do pavimento do que o crescimento do tráfego em si.

Palavras-chave: desempenho pavimentos flexíveis; análise mecanística; software M-E PDG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama de etapas de pesquisa	18
Figura 2: parâmetros de análise de pavimentos flexíveis	33
Figura 3: tela <i>inputs</i>	34
Figura 4: fatores de ajustes mensais	36
Figura 5: distribuição de classes de veículos	37
Figura 6: distribuição horária do tráfego de caminhões	37
Figura 7: fatores de distribuição de cargas de eixo	39
Figura 8: irregularidade para espectros de carga variados (BR-290)	60
Figura 9: deformação permanente para espectros de carga variados (BR-290)	61
Figura 10: trincamento de baixo para cima para espectros de carga variados (BR-290) .	61
Figura 11: trincamento de cima para baixo para espectros de carga variados (BR-290) .	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: parâmetros de análise para a BR-290	44
Quadro 2: distribuição de veículos por classe, do software M-E PDG, da BR-290	44
Quadro 3: distribuição mensal do tráfego da BR-290	45
Quadro 4: distribuição horária do tráfego da BR-290	45
Quadro 5: parâmetros de análise para o Lote 1	47
Quadro 6: distribuição de veículos por classe para o Lote 1	48
Quadro 7: adaptação para as classes de veículos do M-E PDG	49
Quadro 8: distribuição de veículos por classe, do software M-E PDG, do Lote 1	49
Quadro 9: distribuição horária do tráfego do Lote 1	50
Quadro 10: distribuição de veículos por classe para o Lote 3	52
Quadro 11: distribuição de veículos por classe, do software M-E PDG, do Lote 3	53
Quadro 12: distribuição horária do tráfego do Lote 3	53
Quadro 13: pesos dos veículos por classe do software M-E PDG	55
Quadro 14: VDM _c e distribuição de veículos dos trechos por classe para o Tráfego Antigo	56
Quadro 15: VDM _c e distribuição de veículos dos trechos por classe para o Tráfego Futuro	57
Quadro 16: análise da irregularidade para espectros de carga variados (Lote 1)	64
Quadro 17: análise da deformação para espectros de carga variados (Lote 1)	64
Quadro 18: análise do trincamento de baixo para cima para espectros de carga variados (Lote 1)	64
Quadro 19: análise do trincamento de cima para baixo para espectros de carga variados (Lote 1)	65
Quadro 20: análise da irregularidade para espectros de carga variados (Lote 3)	65
Quadro 21: análise da deformação para espectros de carga variados (Lote 3)	66
Quadro 22: análise do trincamento de baixo para cima para espectros de carga variados (Lote 3)	66
Quadro 23: análise do trincamento de cima para baixo para espectros de carga variados (Lote 3)	66
Quadro 24: análise da irregularidade para fatores de crescimento de tráfego variados ...	67
Quadro 25: análise da deformação para fatores de crescimento de tráfego variados	68
Quadro 26: análise do trincamento de baixo para cima para fatores de crescimento de tráfego variados	68
Quadro 27: análise do trincamento de cima para baixo para fatores de crescimento de tráfego variados	69

LISTA DE SIGLAS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AADTT: *Average Annual Diary Truck Traffic*

ATR: Afundamento de Trilha de Roda

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

IRI: *International Roughness Index*

M-E PDG: *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*

VDM_c: Volume Diário Médio de Veículos Comerciais

LISTA DE SÍMBOLOS

A = idade do pavimento, desde a construção até a sua reabilitação (anos)

B = deflexão com viga Benkelman (10^{-2} mm)

DEFM = deflexão máxima média (10^{-2} mm)

E = módulo de elasticidade (MPa)

ER = variável que indica se o pavimento é restaurado ou não (ER=0, original; ER=1, restaurado)

ε = deformação (mm/mm)

IDADE = idade do pavimento, desde a construção, restauração ou reconstrução (anos)

σ = tensão normal (kgf/cm²)

ν = coeficiente de Poisson

τ = tensão cisalhante (kgf/cm²)

K_0 = coeficiente de empuxo lateral do solo (0,5 é o valor típico)

N_{acum} = número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf

NA = número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 tf

QI = quociente de irregularidade (cont./km)

SNC = número estrutural corrigido

TR = variável indicadora do tipo de revestimento (TR = 0, mistura asfáltica; TR = 1, tratamento superficial)

TRI = profundidade média de trilhas de roda (mm)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 MÉTODO DE PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	16
2.2.1 Objetivos Principal	16
2.2.2 Objetivos Secundários	17
2.3 PRESSUPOSTO	17
2.4 DELIMITAÇÕES	17
2.5 LIMITAÇÕES	17
2.6 DELINEAMENTO	17
3 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	20
3.1 DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS	20
3.1.1 Modelos de Desempenho de Pavimentos	21
3.1.1.1 Tipos de Modelo de Desempenho Utilizados no Brasil	22
3.1.1.2 Modelos de Previsão de Desempenho Utilizados no Brasil	23
3.1.1.2.1 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Queiroz	24
3.1.1.2.2 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Marcon	25
3.1.2 Indicadores de Desempenho de Pavimentos Flexíveis	26
3.1.2.1 Trincamento por Fadiga de Baixo para Cima	27
3.1.2.2 Trincamento por Fadiga de Cima para Baixo	27
3.1.2.3 Deformação Permanente (afundamento)	27
3.1.2.4 Irregularidade (IRI)	27
3.2 ANÁLISE MECANÍSTICA	28
4 SOFTWARE M-E PDG	31
4.1 PROJETO	32
4.1.1 Informações Gerais	32
4.1.2 Parâmetros de Análise	33
4.2 DADOS DE ENTRADA	34
4.2.1 Tráfego	35
4.2.1.1 Fatores de Ajuste do Volume do Tráfego (<i>Traffic Volume Adjustment Factors</i>) ...	35
4.2.1.1.1 Fatores de Ajuste Mensal (<i>Monthly Adjustment Factors</i>)	35
4.2.1.1.2 Distribuição de Classe de Veículo (<i>Vehicle Class Distribution</i>)	36

4.2.1.1.3 Distribuição Horária do Tráfego de Caminhão (<i>Hourly Truck Traffic Distribution</i>)	37
4.2.1.1.4 Fatores de Crescimento do Tráfego (<i>Traffic Growth Factors</i>)	38
4.2.1.2 Fatores de Distribuição de Carga de Eixo (<i>Axle Load Distribution Factors</i>)	38
4.2.1.3 Dados de Entrada Gerais de Tráfego (<i>General Traffic Data Inputs</i>)	39
4.2.2 Clima	40
4.2.3 Estrutura	41
4.2.3.1 Concreto Asfáltico e Camadas Asfálticas Estabilizadas (<i>Asphalt Concrete and Asphalt Stabilized Layers</i>)	41
4.2.3.2 Base, Sub-base e Subleito (<i>Unbound Base/Subbase/Subgrade</i>)	41
5 COLETA DE DADOS	42
5.1 CLIMA	42
5.2 BR-290	43
5.2.1 Projeto do Pavimento	43
5.2.2 Distribuição dos Veículos por Classe e VDM_c	44
5.2.3 Porcentagem de Distribuição Mensal do Tráfego	44
5.2.4 Porcentagem de Distribuição Horária do Tráfego	45
5.3 BR-101	46
5.3.1 Lote 1	46
5.3.1.1 Projeto do Pavimento	46
5.3.1.2 Distribuição dos Veículos por Classe e VDM _c	47
5.3.1.3 Porcentagem de Distribuição Mensal do Tráfego	49
5.3.1.4 Porcentagem de Distribuição Horária do Tráfego	49
5.3.2 Lote 3	50
5.3.2.1 Projeto do Pavimento	50
5.3.2.2 Distribuição dos Veículos por Classe e VDM _c	51
5.3.2.3 Porcentagem de Distribuição Mensal do Tráfego	53
5.3.2.4 Porcentagem de Distribuição Horária do Tráfego	53
6 ESPECTROS DE CARGA E FATORES DE CRESCIMENTO DE TRÁFEGO	54
6.1 VARIAÇÕES NO ESPECTRO DE CARGA	54
6.1.1 Tráfego Atual	55
6.1.2 Tráfego Antigo	55
6.1.3 Tráfego Futuro	56
6.2 VARIAÇÕES DOS FATORES DE CRESCIMENTO DE TRÁFEGO	58
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	59

7.1 ESPECTROS DE CARGA	59
7.1.1 BR-290	59
7.1.2 BR-101 (Lote 1)	63
7.1.3 BR-101 (Lote 3)	65
7.2 FATORES DE CRESCIMENTO DE TRÁFEGO	67
8 CONCLUSÕES	70
8.1 ESPECTROS DE CARGA.....	70
8.2 FATORES DE CRESCIMENTO DE TRÁFEGO	71
8.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
REFERÊNCIAS	72
APÊNDICE A	73
APÊNDICE B	78
APÊNDICE C	83

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT, pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (BRASIL, 2006). Para um adequado dimensionamento dessa estrutura, é necessário identificar corretamente as cargas de eixo que solicitarão o pavimento durante o seu período de projeto e aplicar essas condições de carregamento através de um método, empírico ou mecanístico.

Métodos empíricos, como o do DNIT e o antigo método da AASHTO (última versão empírica de 1993) ainda são amplamente utilizados no projeto de pavimentos flexíveis. Nesses métodos, todas as configurações e magnitudes de cargas de eixo que, estimadas em um estudo de tráfego, atuarão sobre o pavimento ao longo de sua vida útil, são transformadas em um número equivalente de solicitações de carga padrão (eixo simples de rodas duplas, que transmite ao pavimento uma carga de 8,2 tf), comumente designado como número N.

A simplicidade de se trabalhar com apenas um número como solicitação de tráfego é atrativa, porém torna o dimensionamento limitado, pois a equivalência de cargas não está ligada apenas a carga de eixo. Pressão de inflação, tipo de pneus e espaçamento entre eixos, variáveis de importante atuação no pavimento, não são consideradas no cálculo do número N.

Ao empregarem-se métodos mecanísticos, (nos quais se calculam tensões, deformações e deslocamentos no pavimento e os comparam a valores admissíveis) é possível considerar o espectro de carga (porcentagem de cada tipo de veículo comercial com suas configurações e cargas de eixo) e fatores de crescimento de tráfego (crescimento do volume de tráfego) e determinar o dano que veículos reais causarão ao pavimento, utilizando-se qualquer configuração de carga sem a necessidade de transformá-la com algum fator de equivalência (como quando se trabalha com o número N).

Neste contexto, o presente trabalho propõe avaliar o efeito de diversos espectros de carga e fatores de crescimento de tráfego no desempenho de trechos de pavimentos flexíveis da BR-101 e BR-290. Para tal análise, será utilizado o software M-E PDG (*Mechanistic-Empirical*

Pavement Design Guide) da AASHTO, na sua versão de 2009, do qual serão obtidos parâmetros de desempenho do pavimento, tais como: trincamentos, irregularidades e deformações.

O trabalho será dividido em:

- a) método de pesquisa;
- b) pavimentos flexíveis;
- c) software M-E PDG;
- d) coleta de dados;
- e) espectros de carga e fatores de crescimento de tráfego;
- f) análise dos resultados;
- g) conclusões.

O Método de Pesquisa consiste em apresentar as questões e os objetivos do estudo. Será mostrado também o delineamento, assim como pressupostos utilizados, limitações e delimitações do trabalho.

No capítulo Pavimentos Flexíveis, será feita uma abordagem sobre esse assunto, com o foco basicamente voltado para desempenho da estrutura e análise mecânica. Será feita a apresentação do software M-E PDG no capítulo seguinte, detalhando os dados de entrada necessários para a realização do trabalho e os resultados que serão buscados.

Serão apresentados, no capítulo de Coleta de Dados, os trechos de rodovias que serão estudados, bem como os dados necessários para que se realize a análise mecânica pelo software M-E PDG. Em Espectros de Carga e Fatores de Crescimento de Tráfego, será mostrado quais são e como foram definidos os espectros de carga utilizados no trabalho, bem como os fatores de crescimento de tráfego.

No capítulo Análise dos Resultados, serão apresentados os gráficos e tabelas geradas pelo software M-E PDG, fazendo-se considerações sobre os efeitos causados pelos espectros de carga variados e fatores de crescimento de tráfego nas estruturas dos trechos estudados.

No último capítulo (Conclusões) será finalizado o assunto, indicando quais foram as principais conclusões e contribuições que este trabalho trouxe.

2 MÉTODO DE PESQUISA

O método de pesquisa que é apresentado a seguir, está dividido em:

- a) questão de pesquisa;
- b) objetivos do trabalho;
- c) pressuposto;
- d) delimitações;
- e) limitações;
- f) delineamento.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: quais os efeitos da aplicação de diversos espectros de carga e fatores de crescimento de tráfego no desempenho estrutural e funcional dos pavimentos flexíveis estudados?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a análise dos efeitos da aplicação de espectros de carga e fatores de crescimento de tráfego variados para a obtenção de parâmetros de desempenho através do software M-E PDG, fazendo-se uma avaliação de como essas diferentes aplicações de carga e fatores afetam a vida útil dos pavimentos flexíveis estudados.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário deste trabalho é a apresentação do software M-E PDG.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os resultados fornecidos pelo software M-E PDG são válidos para o tipo de análise que será realizada.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo da estrutura de pavimento flexível da rodovia BR-290 (km 18 ao 19) e da BR-101, Lote 1 (km 00 ao 25) e Lote 3 (km 56 ao 75).

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) os dados de entrada de clima do software terão que ser adaptados para simular o clima do Rio Grande do Sul;
- b) as classes de veículos utilizadas no software são diferentes ou não contemplam todas as classes adotadas no Brasil.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) conhecimento dos estudos de tráfego e projeto dos trechos;
- c) estudo do software;

- d) definição dos espectros de carga e dos fatores de crescimento de tráfego;
- e) aplicação do software;
- f) análise dos resultados;
- g) conclusões.

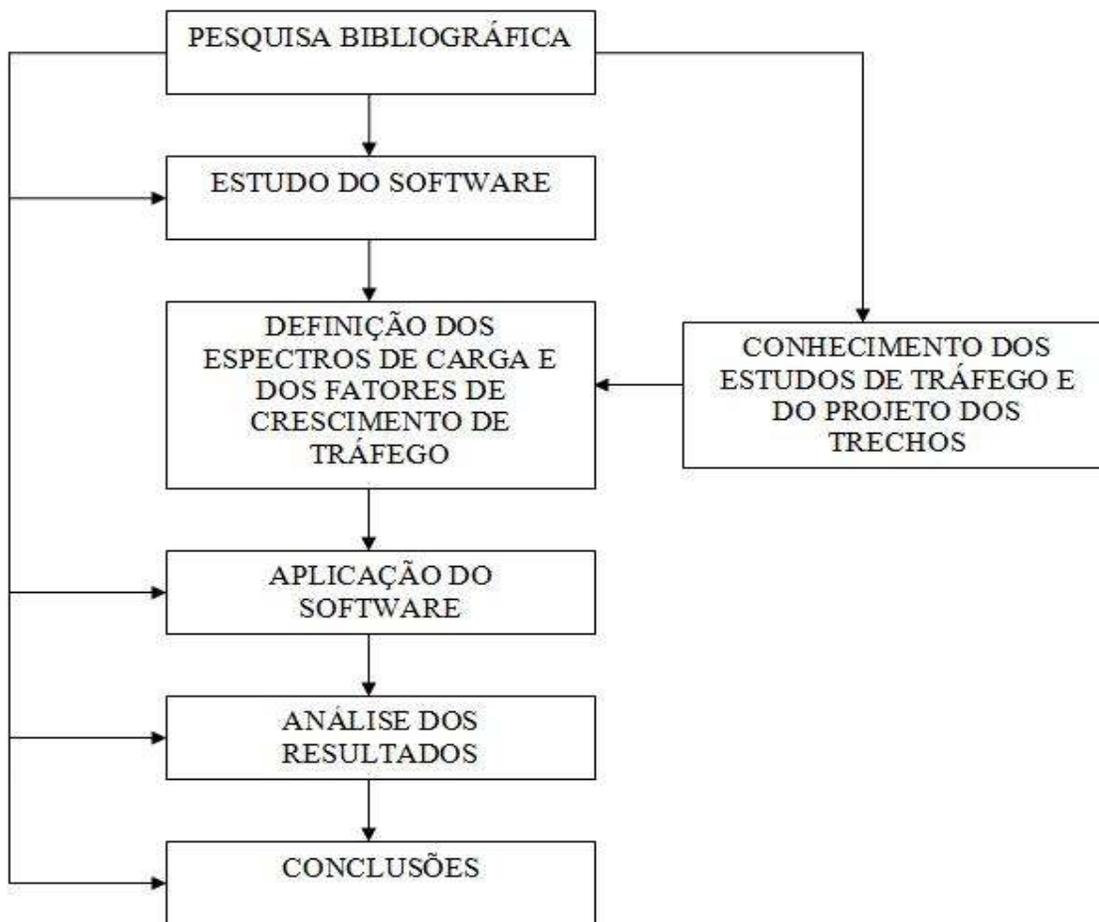


Figura 1: diagrama de etapas da pesquisa

Durante todo o trabalho foi realizada a pesquisa bibliográfica, com o intuito de obter-se um conhecimento satisfatório do software M-E PDG e embasamento teórico para ser realizada a análise dos resultados e as devidas conclusões do trabalho. A pesquisa bibliográfica relacionada ao embasamento teórico foi feita lendo-se teses, dissertações e livros sobre o assunto pavimentos flexíveis. Para o conhecimento do software, foi feita a tradução livre do seu manual (disponível apenas na versão em inglês).

Após possuir um conhecimento adequado do software e ter em mãos os projetos dos pavimentos (projetos das estruturas e estudos de tráfego), foram definidos os espectros de carga e os fatores de crescimento de tráfego a serem utilizados no trabalho. Foram definidos três espectros de carga: tráfego atual, tráfego antigo e tráfego futuro. Para o Tráfego Atual foi utilizada a distribuição de veículos que atualmente trafega nos trechos utilizados para o trabalho. O Tráfego Antigo foi definido baseando-se em veículos comerciais com peso de até 48,5 tf (dentro da distribuição do Tráfego Atual). O Tráfego Futuro foi definido como uma possível tendência de aumento de carga dos veículos comerciais, substituindo-se veículos menores e mais leves por veículos maiores e mais pesados, também utilizando o Tráfego Atual como base. Esses espectros de carga foram criados com o auxílio de estudos de tráfego elaborados nos trechos estudados da BR-290 e da BR-101. Os fatores de crescimento de tráfego utilizados foram de 3%, 4% e 5%.

Com base no completo estudo do software, foi feita a sua aplicação, empregando-se os espectros de carga e fatores de crescimento de tráfego, fazendo-se as devidas adaptações para simular adequadamente as situações de clima, tráfego e demais variáveis na rodovia estudada.

O embasamento teórico adquirido ao longo de todo o trabalho, através da pesquisa bibliográfica, foi utilizado para a análise dos resultados e as conclusões do trabalho.

3 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Pavimentos flexíveis são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída de agregados e ligantes asfálticos. É composto basicamente por quatro camadas (BERNUCCI et al., 2008, p. 9):

- a) revestimento asfáltico;
- b) base;
- c) sub-base;
- d) reforço do subleito.

De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 9), “Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros.”.

Esta estrutura é criada para resistir aos esforços do tráfego e garantir conforto e segurança ao usuário. Estes parâmetros são caracterizados como desempenho do pavimento e são detalhados a seguir assim como a análise mecânica.

3.1 DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

De acordo com a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (1990¹ apud VITORELLO, 2008, p. 38):

[...] desempenho de um pavimento é a capacidade deste de atender seus objetivos ao longo do tempo. Desempenho é dado como a variação da serventia dos pavimentos ao longo do tempo, ou seja, é a adequação com que o pavimento cumpre seus objetivos. Chama-se de serventia a capacidade de um pavimento construído em um trecho de servir ao usuário em um determinado momento quanto à segurança e conforto ao rolamento.

¹ AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guidelines for Pavement Management Systems**. Washington, EUA, 1990.

Vitorello (2008, p. 38) afirma que o objetivo principal de se prever a degradação de um pavimento é essencialmente econômico. A fim de prever adequadamente os serviços de manutenção que serão necessários ao pavimento, é imprescindível que se tenha conhecimento de modelos e indicadores de desempenho de pavimentos.

Os tipos e alguns exemplos de modelos de desempenho utilizados no Brasil são mostrados no item 3.1.1. O item 3.1.2 detalha os indicadores de desempenho que serão utilizados como parâmetro de desempenho para o trabalho.

3.1.1 Modelos de Desempenho de Pavimentos

De acordo com *National Highway Institute* (1998² apud ALBUQUERQUE, 2007, p. 98), os modelos de previsão de desempenho possibilitam:

- a) determinar a vida restante de pavimentos, quando se tem conhecimento da condição limite aceitável;
- b) otimizar a combinação de projetos, estratégias e o tempo para concluir as metas estabelecidas;
- c) avaliar o impacto temporal de vários cenários;
- d) promover a retroalimentação para o processo de projeto de pavimento;
- e) auxiliar na estimativa dos custos do ciclo de vida do pavimento.

Os modelos de desempenho podem ser elaborados para cada parâmetro de desempenho e índice de serventia separadamente ou para um índice de condição que envolva todos os mecanismos de degradação (VITORELLO, 2008, p. 38).

A seguir são apresentados os tipos e alguns exemplos de modelos de previsão de desempenho utilizados no Brasil.

² NATIONAL Highway Institute. FEDERAL Highway Administration. **Pavement Management Systems**. 1998. 422 p. NHI Course n. 131035.

3.1.1.1 Tipos de Modelos de Desempenho Utilizados no Brasil

Na elaboração de modelos de previsão de desempenho, é necessária a forma desejada para o modelo. São elas (NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 1998³ apud ALBUQUERQUE, 2007, p. 100):

- a) determinísticos, que são modelos que determinam os resultados a partir de condições iniciais. Usam regressões para fornecer um único valor de um parâmetro a partir de uma ou mais variáveis. Este tipo de modelo pode ser subdividido em modelos de,
 - resposta primária, que determinam a relação existente entre tensões e deformações;
 - desempenho estrutural, que prevêm o surgimento e a propagação dos defeitos produzidos pela repetição de cargas do tráfego;
 - desempenho funcional, que prevêm a queda do índice de serventia e do coeficiente de atrito da superfície com o tempo;
 - degradação, derivado de um dos dois anteriores, que utilizam uma função de degradação, que é um indicador normalizado de defeitos ou de queda do índice de serventia;
- b) probabilísticos, que fornecem o alcance de valores de um parâmetro. Este tipo de modelo é baseado em matrizes de transição probabilística que estimam a probabilidade de seções de pavimentos mudarem de uma condição para outra. Este tipo de modelo pode ser subdividido em,
 - curvas de sobrevivência, que são gráficos de probabilidade em função do tempo e representam a porcentagem de pavimentos que permanecem em serviço após certo número de anos (ou de passagem de eixo-padrão) sem precisarem de grande investimento em conservação ou restauração;
 - modelos markovianos, que utilizam a chamada Matriz de Transição, expressa a probabilidade que um grupo de pavimentos com idades semelhantes e sujeitos ao mesmo nível de tráfego passar de um estado de degradação ou índice de serventia para outro, dentro de um período de tempo;
 - modelos semi-markovianos, que são semelhantes aos modelos markovianos, com a diferença que se considera que o processo seja estocástico apenas durante incrementos de tempo.

Os modelos ainda podem ser subdivididos quanto a sua natureza em (HAAS et al., 1994⁴ apud ALBUQUERQUE, 2007, p. 101):

³ NATIONAL Highway Institute. FEDERAL Highway Administration. **Pavement Management Systems**. 1998. 422 p. NHI Course n. 131035.

⁴ HAAS, R. C. G.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. P. **Modern Pavement Management**. Malabar, Florida: Krieger, 1994.

- a) puramente mecânicos, que são modelos baseados em parâmetros de respostas estruturais como tensão, deformação e deflexão. Esses modelos não são considerados modelos de desempenho;
- b) mecânico-empíricos, onde o parâmetro de resposta estrutural é relacionado à deterioração estrutural ou funcional medida. Esses tipos de modelo são os mais utilizados para previsão de desempenho de pavimentos;
- c) empíricos ou de regressão, nos quais, variáveis dependentes da deterioração estrutural ou funcional são relacionadas a uma ou mais variáveis independentes, como suporte do subleito e aplicações de carga por eixo;
- d) subjetivos, nos quais a experiência de técnicos é formalizada através de processos de transição, que permitem a obtenção de modelos de desempenho mesmo sem uma série histórica de dados.

Os modelos mecânico-empíricos têm boa aplicação para a utilização em projetos de pavimentos, sendo ferramentas fundamentais para a avaliação de resultados de análise mecânica, a partir da comparação de dados obtidos em ensaios de laboratório. A utilização desses modelos para avaliação da malha rodoviária ou para comparação entre alternativas de projeto não consiste em uma opção prática, pois nessas etapas, a avaliação de degradação e serventia é o mais importante (NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 1998⁵ apud ALBUQUERQUE, 2007, p. 103).

3.1.1.2 Modelos de Previsão de Desempenho Utilizados no Brasil

Para o uso eficiente e otimizado dos recursos de conservação, é necessário estimar as condições ou nível de serventia futuros dos pavimentos administrados em determinada rede rodoviária. Esta estimativa só é possível se o planejador ou o engenheiro de pavimentação tiver à disposição modelos de previsão de desempenho realistas (QUEIROZ, 1984⁶ apud VITORELLO, 2007, p. 51).

⁵ NATIONAL Highway Institute. FEDERAL Highway Administration. **Pavement Management Systems**. 1998. 422 f. NHI Course n. 131035.

⁶ QUEIROZ, C. A. V. **Modelos de Previsão do Desempenho para a Gerência de Pavimentos no Brasil**. Brasília-DF: Ministério dos Transportes – Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1984.

São apresentados a seguir, alguns modelos de desempenho utilizados no Brasil apenas para contextualização e conhecimento do assunto. Nenhum desses modelos será utilizado no presente trabalho, pois o software M-E PDG, que será utilizado para a análise mecânica, possui seus próprios modelos de desempenho.

3.1.1.2.1 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Queiroz

Queiroz (1981⁷ apud ALBUQUERQUE, 2007, p. 117), desenvolveu modelos empíricos e mecanístico-empíricos utilizando dados de irregularidade, entre outros parâmetros, obtidos nos estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Distrito Federal. Foram três modelos empíricos desenvolvidos para o Quociente de Irregularidade, incluindo:

- a) o Número Estrutural Corrigido SNC (modelo 1);
- b) a deflexão com Viga Benkelman (modelo 2);
- c) as duas variáveis anteriores (modelo 3).

O modelo 1 é dado por:

$$\log QI = 1,478 - 0,318ER + 0,000795A + 0,0224 (\log N_{\text{acum}}/\text{SNC})^2 \quad (\text{equação 1})$$

O modelo 2 é regido por:

$$QI = 21,8 - 7,52ER + 5,16TR + 0,515A + 7,22 \times 10^{-5} (B \times \log N_{\text{acum}})^2 \quad (\text{equação 2})$$

O modelo 3 é dado por:

⁷ QUEIROZ, C. A. V. **Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil**. 1981. 317 f. Dissertation (Degree of Doctor of Philosophy) – University of Texas, Austin-Texas, USA.

$$\begin{aligned}
 \text{QI} = & 12,63 - 5,16\text{ER} + 3,31\text{TR} + 0,393\text{A} + 8,66 (\log N_{\text{acum}}/\text{SNC})^2 + & \text{(equação 3)} \\
 & 7,17 \times 10^{-5} (\text{B} \times \log N_{\text{acum}})^2
 \end{aligned}$$

Onde:

QI = quociente de irregularidade;

A = idade do pavimento, desde a construção até a sua reabilitação;

ER = variável que indica se o pavimento é restaurado ou não (ER=0, original; ER=1, restaurado);

N_{acum} = número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf.

SNC = número estrutural corrigido;

TR = variável indicadora do tipo de revestimento (TR = 0, mistura asfáltica; TR = 1, tratamento superficial);

B = deflexão com Viga Benkelman (10^{-2} mm).

3.1.1.2.2 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Marcon

Reunindo dados de levantamentos de 2.500 km de malha rodoviária do estado de Santa Catarina, Marcon (1996⁸ apud VITORELLO, 2007, p. 58) desenvolveu linhas de tendência de pavimento para parâmetros como irregularidade longitudinal, deflexões máximas médias, índice de gravidade global e afundamento de trilha de roda. Os modelos relacionaram o parâmetro de desempenho do pavimento com a idade do revestimento ou com o número equivalente de operações do eixo padrão. Os modelos são:

- a) irregularidade longitudinal (relacionando com o número estrutural);
- b) deflexões (relacionando com o número equivalente de operações);
- c) afundamento de trilha de roda (relacionando com a idade dos pavimentos).

⁸ MARCON, A. F. **Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema de Gerência de Pavimentos para a Malha Rodoviária estadual de Santa Catarina**. 1996. Tese (Doutorado em Infra-Estrutura Aeronáutica) – Instituto de Tecnologia da Aeronáutica, São José dos Campos-SP, Brasil.

O modelo de irregularidade longitudinal é dado por:

$$QI = 25,783 + 4,0 \times 10^{-6} \times NA - 5,0 \times 10^{-14} \times NA^2 \quad (\text{equação 4})$$

O modelo de deflexões é regido por:

$$DEFM = 44,928 + 1,0 \times 10^{-5} \times NA \quad (\text{equação 5})$$

O modelo de afundamento de trilha de roda é dado por:

$$TRI = 1,8228 + 0,2325 \times IDADE \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

QI = quociente de irregularidade (cont./km);

DEFM = deflexão máxima média (10^{-2} mm);

TRI = profundidade média de trilhas de roda (mm);

NA = número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 tf;

IDADE = idade do pavimento, desde a construção, restauração ou reconstrução (anos).

3.1.2 Indicadores de Desempenho de Pavimentos Flexíveis

Os indicadores de desempenho tratados nesse capítulo serão utilizados como parâmetros de análise de desempenho para o software M-E PDG, utilizado para a análise mecânica do presente trabalho.

3.1.2.1 Trincamento por Fadiga de Baixo para Cima

Conforme *National Cooperative Highway Research Program* (2004, p. 3.3.8) essas trincas iniciam na parte inferior da camada asfáltica e se propagam para a superfície sob repetidas aplicações de carregamento (fadiga).

3.1.2.2 Trincamento por Fadiga de Cima para Baixo

A maioria das trincas por fadiga iniciam na parte inferior da camada asfáltica e se propagam para a superfície do pavimento. Entretanto, há várias evidências de trincas que surgem na superfície do pavimento e se propagam para baixo. Alguns dos mecanismos sugeridos que causam esse tipo de trincamento são (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.9):

- a) carga da roda que induz tensões e deformações que ocorrem na superfície e causam trincas que se propagam;
- b) cisalhamento da superfície da mistura asfáltica causado por pneus radiais com pressões de alto contato próximas à borda do pneu;
- c) envelhecimento da mistura asfáltica próximo a superfície, resultando em alto enrijecimento que, em contato com pressões de alto contato, causam trincas na superfície que se propagam.

3.1.2.3 Deformação Permanente (afundamento)

De acordo com *National Cooperative Highway Research Program* (2004, p. 3.3.10) afundamento é uma depressão na superfície na trilha de roda (afundamento de trilha de roda, conhecido como ATR), causada por deformações plásticas ou inelásticas em alguma ou em todas as camadas do pavimento.

3.1.2.4 Irregularidade (IRI)

De acordo com *National Cooperative Highway Research Program* (2004, p. 3.3.15), o IRI (*International Roughness Index*) define a suavidade do pavimento. Este parâmetro é altamente

dependente das especificações de suavidade do projeto e tem um significativo impacto sobre a qualidade de rolamento do pavimento.

3.2 ANÁLISE MECANÍSTICA

Conforme Franco (2007, p. 2):

A necessidade de uma modelagem mecanística-empírica vem da busca constante de se melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural, de modo a utilizar materiais, sobre cujo desempenho de campo ainda não se têm experiência suficiente, e considerar, também, os efeitos das condições ambientais e de tráfego, diferentes daquelas para as quais os Métodos Empíricos, ainda utilizados no país, foram desenvolvidos.

Huang (2003⁹ apud FRANCO, 2007) afirma que os métodos de projeto de pavimentos flexíveis podem ser divididos em cinco categorias, ou seja, métodos:

- a) empíricos, com ou sem ensaio de resistência de solo;
- b) que limitam a ruptura por cisalhamento;
- c) que limitam a ruptura por deformação vertical;
- d) baseados nos desempenho de pavimentos em pistas experimentais;
- e) mecanístico-empíricos.

De acordo com *National Cooperative Highway Research Program* (2004, p. 1.1.7), o termo **mecanístico** refere-se à aplicação dos princípios da Engenharia Mecânica. Para qualquer procedimento de projeto de pavimento ser completamente racional, três elementos devem ser considerados (só o primeiro elemento será tratado nesse capítulo):

- a) a teoria utilizada para prever falhas e parâmetros de degradação;
- b) a avaliação da aplicação das propriedades dos materiais na teoria selecionada;
- c) determinação da relação entre a magnitude do parâmetro em questão e o nível de desempenho desejado.

⁹ HUANG, Y. H. **Pavements Analysis and Design**. 2nd ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2003.

De uma forma geral, a solução analítica para o estado de tensões e deformações dentro de um pavimento usando a teoria elástica de multicamadas considera vários pressupostos, entre eles (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 1.1.7-1.1.8):

- a) as propriedades dos materiais de cada camada são homogêneas;
- b) cada camada tem uma espessura finita, com exceção da camada inferior, e todas as camadas são infinitas nas direções laterais.
- c) cada camada é isotrópica, ou seja, as propriedades de um ponto específico são as mesmas para toda direção e orientação;
- d) atrito total é desenvolvido entre as camadas em cada interface;
- e) forças de cisalhamento da superfície não estão presentes;
- f) as soluções das tensões são caracterizadas por duas propriedades dos materiais para cada camada: coeficiente de Poisson (ν) e módulo de elasticidade (E).

Com um ponto dado dentro de qualquer camada, o equilíbrio estático requer que nenhuma tensão exista. As tensões, em um sistema de coordenadas polares, atuam nos planos vertical (z), radial (r) e tangencial (t). Essas tensões são compostas por três tensões normais (σ_z , σ_r , σ_t) atuando perpendicular às faces elementares e seis tensões cisalhantes (τ_{rt} , τ_{tr} , τ_{rz} , τ_{zr} , τ_{tz} , τ_{zt}) atuando paralelas às faces. As condições de equilíbrio estático também mostram que as tensões cisalhantes atuando nas faces de intersecção são iguais. Em cada ponto no sistema, existe uma certa orientação do elemento tal que, a tensão cisalhante atuando em cada face é zero. As tensões normais sob esta condição são definidas como tensões principais e são denotadas por σ_z (tensão primária), σ_r (tensão intermediária) e σ_t (tensão secundária). A soma das tensões principais em um ponto é definido como tensão *bulk* (Θ). Considerando este estado de tensões triaxial de qualquer elemento, as deformações (para as direções vertical, radial e tangencial, respectivamente) podem ser determinados pelas equações a seguir (YODER; WITCZAK, 1975¹⁰ apud NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 1.1.8):

$$\varepsilon_z = (1/E)[\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (\text{equação 7})$$

¹⁰ YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. New York, 1975.

$$\varepsilon_r = (1/E)[\sigma_r - \nu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (\text{equação 8})$$

$$\varepsilon_t = (1/E)[\sigma_t - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

ε = deformação (mm/mm)

E = módulo de elasticidade (MPa)

σ = tensão normal (kgf/cm²)

ν = coeficiente de Poisson.

Baseado nessas equações gerais, o tipo de teoria usado geralmente é distinguido por três propriedades do material, sendo elas (YODER;WITCZAK, 1975¹¹ apud NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 1.1.9):

- a) relação entre tensão e deformação (linear e não-linear);
- b) o tempo de dependência da deformação sob um nível de tensão constante (viscoso ou não-viscoso);
- c) o grau com que cada material consegue se recuperar da deformação depois da remoção da tensão.

Conforme *National Cooperative Highway Research Program* (2004, p. 1.1.9), enquanto o procedimento mecanístico para a análise e projeto do pavimento é muito mais racional que o empírico, é também muito mais técnico e computacional. Os procedimentos mecanísticos não eram práticos até o advento de computadores de alta velocidade, devido à demanda computacional associada às soluções de equações diferenciais e matrizes de elementos finitos, empregados pelos vários modelos de análise.

¹¹ YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. New York, 1975.

4 SOFTWARE M-E 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 (MINNESOTA, 2009, p. 1).

No mesmo trabalho, os autores citam que o M-E 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 (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.2-3.3.3):

- a) assumir uma tentativa de projeto para as condições específicas do local;
- 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) processar a entrada do procedimento para obter valores mensais de entrada de tráfego, variações sazonais dos materiais e clima, necessários na avaliação do projeto;
- e) computar respostas estruturais (degradação 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 principais degradações (afundamento de trilha de roda, trincas por fadiga e trincas térmicas) no final de cada período de análise durante o 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;

Os dados de entrada para o projeto de pavimentos flexíveis são caracterizados como (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.13-3.3.14):

- 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.

Nos itens que seguem, são descritos os dados referentes à utilização do software M-E PDG.

4.1 PROJETO

Nesse item serão 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 será trabalhada, por isso não foi apresentada.

4.1.1 Informações Gerais

A seguir são apresentados os dados da tela *General Information* do software M-E PDG (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.14):

- 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 ocorrem 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 ocorrem 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.

4.1.2 Parâmetros de Análise

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

Performance Criteria	Limit	Reliability
<input checked="" type="checkbox"/> Terminal IRI (in./mile)	172	90
<input checked="" type="checkbox"/> AC Surface Down Cracking Long Cracking (ft./mi)	2000	90
<input checked="" type="checkbox"/> AC Bottom Up Cracking Alligator Cracking (%)	25	90
<input checked="" type="checkbox"/> AC Thermal Fracture (ft./mi)	1000	90
<input checked="" type="checkbox"/> Chemically Stabilized Layer Fatigue Fracture(%)	25	90
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - Total Pavement (in)	0.75	90
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - AC Only (in)	0.25	90

Figura 2: parâmetros de análise de pavimentos flexíveis (MECHANISTIC..., 2009)

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 são (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.15):

- a) irregularidade (IRI);
- b) trincamento por fadiga de cima para baixo (*surface-down fatigue cracking*);
- c) trincamento por fadiga de baixo para cima (*bottom-up fatigue cracking*);
- d) trincamento térmico (*thermal cracking*);
- e) fratura por fadiga de camadas estabilizadas quimicamente (*fatigue fracture of chemically stabilized layers*);
- f) deformação permanente total (*total permanent deformation*).

4.2 DADOS DE ENTRADA

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

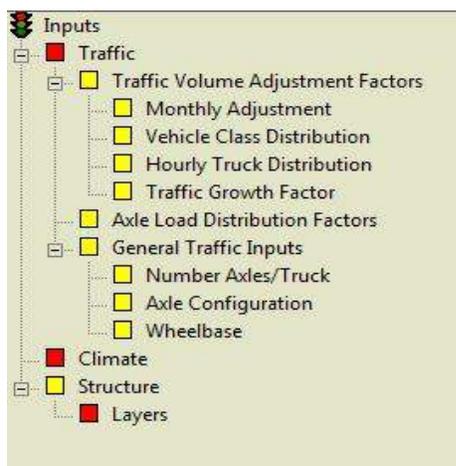


Figura 3: tela *Inputs* (MECHANISTIC..., 2009)

4.2.1 Tráfego

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 (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH BOARD, 2004, p. 3.3.18).

Nos itens a seguir, serão apresentados os dados de entrada necessários para a realização da análise pelo software. Os itens foram divididos exatamente como aparecem no software M-E PDG.

4.2.1.1 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 apresentados a seguir.

4.2.1.1.1 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, assumir 1.0 para todos os meses e todas as classes de veículos (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.20). A figura 4 apresenta a tela Fatores de Ajustes Mensais.

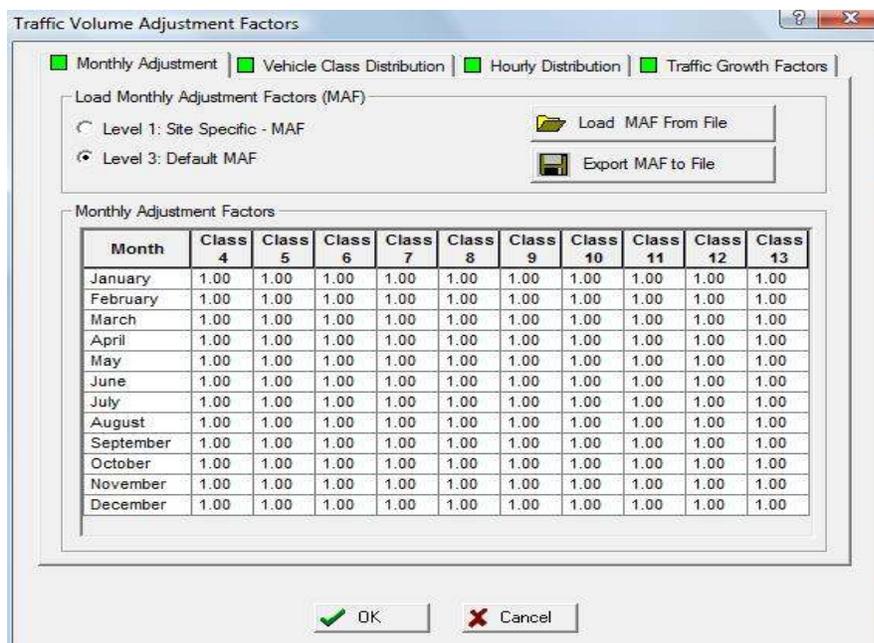


Figura 4: fatores de ajustes mensais (MECHANISTIC..., 2009)

4.2.1.1.2 Distribuição de Classe de Veículo (Vehicle Class Distribution)

De acordo com *National Cooperative Highway Research Program* (2004, p. 3.3.20-3.3.21) 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.

Traffic Volume Adjustment Factors

Monthly Adjustment
 Vehicle Class Distribution
 Hourly Distribution
 Traffic Growth Factors

AADTT distribution by vehicle class

Class 4	1.8	
Class 5	24.6	
Class 6	7.6	
Class 7	0.5	
Class 8	5.0	
Class 9	31.3	
Class 10	9.8	
Class 11	0.8	
Class 12	3.3	
Class 13	15.3	
Total	100.0	

Note: AADTT distribution must total 100%.

Load Default Distribution

Level 1: Site Specific Distribution
 Level 2: Regional Distribution
 Level 3: Default Distribution

OK Cancel

Figura 5: distribuição de classes de veículos (MECHANISTIC..., 2009)

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

De acordo com *National Cooperative Highway Research Program* (2004, p. 3.3.21) 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.

Traffic Volume Adjustment Factors

Monthly Adjustment
 Vehicle Class Distribution
 Hourly Distribution
 Traffic Growth Factors

Hourly truck traffic distribution by period beginning:

Midnight	2.3	Noon	5.9
1:00 am	2.3	1:00 pm	5.9
2:00 am	2.3	2:00 pm	5.9
3:00 am	2.3	3:00 pm	5.9
4:00 am	2.3	4:00 pm	4.6
5:00 am	2.3	5:00 pm	4.6
6:00 am	5.0	6:00 pm	4.6
7:00 am	5.0	7:00 pm	4.6
8:00 am	5.0	8:00 pm	3.1
9:00 am	5.0	9:00 pm	3.1
10:00 am	5.9	10:00 pm	3.1
11:00 am	5.9	11:00 pm	3.1

Note: The hourly distribution must total 100%.

Total: 100

OK Cancel

Figura 6: distribuição horária do tráfego de caminhões (MECHANISTIC..., 2009)

4.2.1.1.4 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 (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.21):

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

De acordo com a mesma obra, diferentes funções de crescimento devem 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.

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

Segundo *National Cooperative Highway Research Program* (2004, p. 3.3.21), 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 abaixo:

- 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.

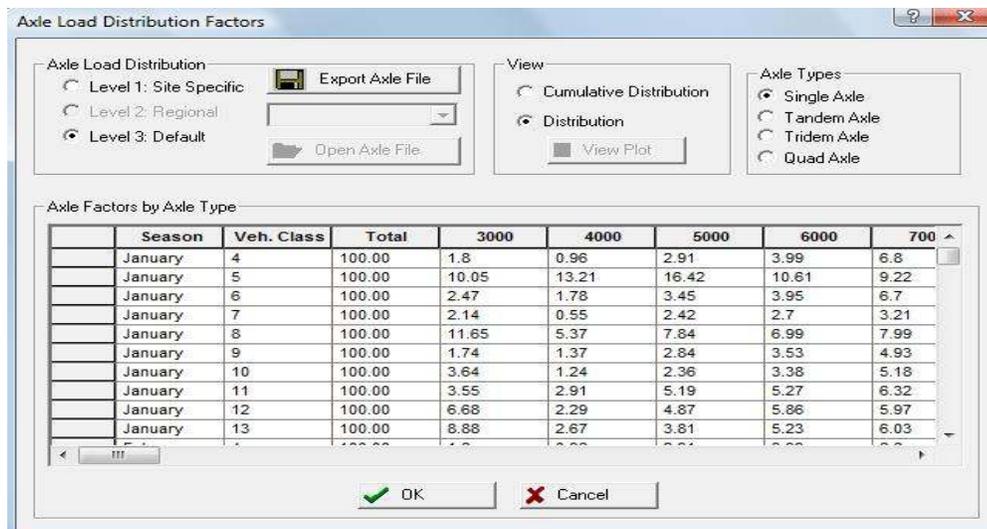


Figura 7: fatores de distribuição de cargas de eixo (MECHANISTIC..., 2009)

4.2.1.3 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 (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.22-3.3.25):

- 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. Se assume 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.

4.2.2 Clima

Condições do ambiente 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 (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.25-3.3.26):

- 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;
- d) valores horários de umidade relativa do ambiente;
- e) tabela de profundidade da água, sazonal ou constante, do local do projeto.

Conforme o mesmo trabalho, 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.

Os autores da mesma obra informam que 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.

4.2.3 Estrutura

O procedimento de projeto de pavimentos flexíveis permite uma grande variedade de propriedades de materiais e espessura de camadas de asfalto, base e sub-base (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.28). As camadas e os seus respectivos dados de entrada são discutidos a seguir.

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

Os dados de materiais requeridos para a camada de concreto asfáltico são (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.29):

- 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 fluência;
 - coeficiente de contração térmica.

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

Os principais dados de entrada para as camadas de base, sub-base e subleito são (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004, p. 3.3.32):

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

5 COLETA DE DADOS

Para o presente estudo, foram selecionados três diferentes trechos de rodovias: BR-290 (km 18) e Lote 1 e Lote 3 da BR-101.

A seguir, são apresentados os dados de clima utilizados, os trechos estudados e os dados coletados pertinentes ao trabalho. Basicamente, as informações extraídas de cada trecho, necessárias para a análise realizada pelo software M-E PDG (e que serão apresentadas nos itens 5.2 e 5.3), foram:

- a) projeto da estrutura do pavimento;
- b) volume diário médio de veículos comerciais (VDM_c);
- c) distribuição dos veículos por classe;
- d) porcentagem de distribuição mensal dos veículos;
- e) porcentagem de distribuição horária dos veículos.

Utilizou-se a opção *default* (padrão) para alguns dados de entrada pedidos pelo software M-E PDG (não foram considerados relevantes para o trabalho ou, devido a dificuldade de sua obtenção, não foram coletados). Esses dados não serão apresentados nesse trabalho.

5.1 CLIMA

Os dados de clima utilizados foram baixados diretamente do banco de dados do software M-E PDG. Foi selecionado o clima da localidade de Savannah, Georgia, EUA, por ser o clima mais parecido com clima do Rio Grande do Sul (é o clima normalmente adotado em trabalhos e artigos que utilizam o M-E PDG no Rio Grande do Sul).

Devido ao clima ser de uma localidade dos Estados Unidos, os dados de distribuição mensal do tráfego tiveram que ser defasados em 6 meses para que as passagens dos veículos coincidisse com o clima correto e não prejudicassem a análise (tendo em vista que o clima afeta diretamente no desgaste do pavimento).

5.2 BR-290

A rodovia BR-290 (denominada oficialmente de Rodovia Osvaldo Aranha) situa-se no estado do Rio Grande do Sul, com uma extensão de 726 km. A rodovia atravessa o Litoral Norte do Estado em sentido oeste, até o município de Uruguaiana. O trecho entre o município de Osório e Porto Alegre é conhecido como Free-way (Wikipédia, 2010).

Neste trabalho foi estudado o trecho entre o km 18 e o 19 da BR-290. Todos os dados foram levantados em janeiro de 2010 pela Concessionária Concepa, na praça de pedágio localizada em Santo Antônio da Patrulha (km 18 da BR-290). As informações são mostradas a seguir.

5.2.1 Projeto do Pavimento

De acordo com os dados fornecidos pela Concepa¹², o pavimento da BR-290 no trecho estudado possui uma estrutura com os seguintes materiais, espessuras e propriedades:

- a) revestimento de concreto asfáltico com espessura de 8 cm com,
 - temperatura de referência de 77° F;
 - porcentagem efetiva de ligantes de 12,6%;
 - coeficiente de Poisson de 0,35;
 - penetração 60-70;
- c) base de brita graduada com 15 cm de espessura com,
 - módulo de resiliência de 30.000 psi;
 - coeficiente de Poisson de 0,35;
- d) sub-base de macadame seco com espessura de 30 cm com,
 - módulo de resiliência de 35.000 psi;
 - coeficiente de Poisson de 0,35;
- e) subleito de solo A-6 (segundo classificação da AASHTO) com,
 - módulo de resiliência de 14.000 psi;
 - coeficiente de Poisson de 0,45.

¹² Dados fornecidos pela Concessionária Concepa ao orientador desse trabalho e por sua vez, disponibilizados ao autor.

Os dados de entrada utilizados como parâmetros de análise pelo software para o pavimento da BR-290 (trecho estudado) são apresentados no quadro 1.

Irregularidade Inicial (m/km)	1,7
Irregularidade Terminal (m/km)	2,7
Trincamento de Baixo para Cima (%)	20
Trincamento de Cima para Baixo (m/km)	190
Afundamento de Trilha de Roda (mm)	6,35

Quadro 1: parâmetros de análise para a BR-290

5.2.2 Distribuição dos Veículos por Classe e VDM_c

Segundo os dados levantados pela Concepa¹³, o VDM_c levantado para o trecho da BR-290 é de 4.640 veículos. A distribuição de veículos por classe¹⁴ é apresentada no quadro 2.

Classe 4	0,0%
Classe 5	27,2%
Classe 6	30,9%
Classe 7	5,8%
Classe 8	0,0%
Classe 9	18,6%
Classe 10	12,9%
Classe 11	0,0%
Classe 12	0,0%
Classe 13	4,6%

Quadro 2: distribuição de veículos por classe, do software M-E PDG, da BR-290

5.2.3 Porcentagem de Distribuição Mensal do Tráfego

Segundo os dados levantados pela Concepa¹⁵, a distribuição mensal do tráfego da BR-290 (já defasada em 6 meses), trecho do km 18, é apresentada no quadro 3.

¹³ Dados fornecidos pela Concessionária Concepa ao orientador desse trabalho e por sua vez, disponibilizados ao autor.

¹⁴ Dados foram fornecidos e adaptados às classes do software M-E PDG diretamente pelo orientador.

¹⁵ op. cit.

Mês	Classe de Veículos									
	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
Mai	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

Quadro 3: distribuição mensal do tráfego da BR-290

5.2.4 Porcentagem de Distribuição Horária do Tráfego

Ainda de acordo com os dados fornecidos pela Concepa¹⁶, segue no quadro 4 a distribuição horária do tráfego da BR-290 (km 18).

0:00	1,8%	12:00	4,6%
1:00	1,3%	13:00	4,9%
2:00	1,1%	14:00	5,6%
3:00	1,0%	15:00	5,7%
4:00	1,4%	16:00	6,0%
5:00	2,7%	17:00	6,4%
6:00	5,0%	18:00	6,4%
7:00	6,2%	19:00	5,5%
8:00	5,8%	20:00	4,3%
9:00	5,6%	21:00	3,4%
10:00	5,5%	22:00	2,6%
11:00	5,2%	23:00	2,0%

Quadro 4: distribuição horária do tráfego da BR-290

¹⁶ Dados fornecidos pela Concessionária Concepa ao orientador desse trabalho e por sua vez, disponibilizados ao autor.

5.3 BR-101

A BR-101, também conhecida como Rodovia Translitorânea, é uma rodovia federal longitudinal do Brasil. O ponto inicial da rodovia está localizado na cidade de Touros (Rio Grande do Norte) e o seu ponto final está localizado no sul, no Arroio Chuí (Rio Grande do Sul). A BR-101 segue no sentido Norte-Sul por praticamente todo o litoral leste e atravessa doze estados brasileiros. Sua denominação oficial em toda sua extensão é Rodovia Governador Mário Covas (Wikipédia, 2010).

Neste trabalho, foram estudados dois trechos da BR-101: o Lote 1 e Lote 3. Esses trechos são apresentados nos itens a seguir.

5.3.1 Lote 1

O Lote 1 da BR-101 se localiza entre o km 00 e o 25. Suas informações são apresentadas abaixo.

5.3.1.1 Projeto do Pavimento

De acordo com os dados fornecidos pela Empresa Queiroz Galvão¹⁷, o pavimento do Lote 1 possui uma estrutura com os seguintes materiais, espessuras e propriedades:

- a) revestimento de concreto asfáltico com espessura de 10 cm com,
 - temperatura de referência de 77° F;
 - porcentagem efetiva de ligantes de 11,8%;
 - coeficiente de Poisson de 0,35;
 - penetração 40-50;
- b) camada de concreto asfáltico com 5 cm de espessura com,
 - temperatura de referência de 77° F;
 - porcentagem efetiva de ligantes de 14,1%;
 - coeficiente de Poisson de 0,35;

¹⁷ Dados fornecidos pela Empresa Queiroz Galvão ao orientador desse trabalho e por sua vez, disponibilizados ao autor.

- penetração 40-50;
- c) base de brita graduada com 15 cm de espessura com,
 - módulo de resiliência de 25.000 psi;
 - coeficiente de Poisson de 0,35;
- d) sub-base de macadame seco com espessura de 38 cm com,
 - módulo de resiliência de 42.000 psi;
 - coeficiente de Poisson de 0,35;
- e) subleito de solo A-2-4 (segundo classificação da AASHTO) com,
 - módulo de resiliência de 14.000 psi;
 - coeficiente de Poisson de 0,35.

São mostrados no quadro 5 os dados de entrada utilizados pelo software como parâmetros de análise para o pavimento da BR-101 (Lote 1).

Irregularidade Inicial (m/km)	1,7
Irregularidade Terminal (m/km)	2,7
Trincamento de Baixo para Cima (%)	25
Trincamento de Cima para Baixo (m/km)	190
Deformação Permanente (ATR) (mm)	6,35

Quadro 5: parâmetros de análise para o Lote 1

5.3.1.2 Distribuição dos Veículos por Classe e VDM_c

De acordo com os dados de contagem de tráfego da BR-101 realizados pela Empresa Queiroz Galvão¹⁸, a distribuição dos veículos por classe do Lote 1 é apresentada no quadro 6.

¹⁸ Estudo realizado em 2009 pela Empresa Queiroz Galvão.

Tipo de Veículo		Sentido		Expansão para 24h		Tráfego	
		Osório - Torres	Torres - Osório	Osório - Torres	Torres - Osório	Total	%
	Passeio	1733	1684	3466	2695	6161	48,81
	Utilitário	274	262	549	419	967	7,66
	2CB	29	34	59	55	113	0,90
	3CB	33	28	65	45	110	0,87
	4CB	2	1	3	2	5	0,04
	4CD	5	5	9	8	17	0,14
	2C	143	139	287	223	509	4,04
	3C	482	460	964	736	1700	13,47
	4C	0	0	0	0	0	0,00
	2S1	2	2	3	3	6	0,05
	2S2	124	99	249	159	407	3,23
	2S3	340	350	680	560	1240	9,83
	3S1	0	0	1	1	1	0,01
	3S2	15	16	30	25	56	0,44
	3S3	245	258	491	413	903	7,16
	2C2	1	1	3	2	5	0,04
	2C3	1	0	2	0	2	0,02
	3C2	2	2	5	3	8	0,06
	3C3	2	1	4	2	6	0,05
	3D4	92	93	184	148	332	2,63
	3D6*	3	2	6	4	9	0,07
	3T6	15	20	30	32	63	0,50

Quadro 6: distribuição de veículos por classe para o Lote 1 (QUEIROZ GALVÃO¹⁹)

Descartando-se os veículos de passeio e utilitários (são muito leves, portanto sua parcela de dano ao pavimento é baixa), tem-se um VDM_c de 5.494 veículos. Adaptando-se a distribuição de veículos por classe fornecida para a distribuição do software M-E PDG (através da equivalência de eixos e pesos), tem-se no quadro 7 que:

¹⁹ Estudo realizado em 2009 pela Empresa Queiroz Galvão.

Classe 4	3CB
Classe 5	2CB + 2C
Classe 6	3C
Classe 7	4CD + 4CB + 4C + 2S2 + 3S1 + 2C2
Classe 8	2S1
Classe 9	2S3 + 3S2
Classe 10	3S3
Classe 11	2C3 + 3C2
Classe 12	3C3
Classe 13	3D4 + 3D6 + 3T6

Quadro 7: adaptação para as classes de veículos do M-E PDG

Após, foram recalculadas as porcentagens, sendo apresentada no quadro 8 a distribuição de veículos por classe utilizada na análise.

Classe 4	2,0%
Classe 5	11,3%
Classe 6	30,9%
Classe 7	7,8%
Classe 8	0,1%
Classe 9	23,6%
Classe 10	16,4%
Classe 11	0,2%
Classe 12	0,1%
Classe 13	7,6%

Quadro 8: distribuição de veículos por classe, do software M-E PDG, do Lote 1

5.3.1.3 Porcentagem de Distribuição Mensal do Tráfego

Os dados de distribuição mensal do tráfego do Lote 1 da BR-101 não foram levantados, portanto, foi usada a mesma distribuição mensal da BR-290.

5.3.1.4 Porcentagem de Distribuição Horária do Tráfego

A distribuição horária do tráfego do Lote 1 da BR-101 é a mesma levantada na BR-290, porém com duas horas de atraso. A distribuição do Lote 1 é mostrada abaixo no quadro 9.

0:00	2,6%	12:00	5,5%
1:00	2,0%	13:00	5,2%
2:00	1,8%	14:00	4,6%
3:00	1,3%	15:00	4,9%
4:00	1,1%	16:00	5,6%
5:00	1,0%	17:00	5,7%
6:00	1,4%	18:00	6,0%
7:00	2,7%	19:00	6,4%
8:00	5,0%	20:00	6,4%
9:00	6,2%	21:00	5,5%
10:00	5,8%	22:00	4,3%
11:00	5,6%	23:00	3,4%

Quadro 9: distribuição horária do tráfego do Lote 1

5.3.2 Lote 3

O Lote 3 da BR-101 se localiza entre o km 50 e o 75. Suas informações são apresentadas abaixo.

5.3.2.1 Projeto do Pavimento

Segundo os dados fornecidos pela Empresa Queiroz Galvão²⁰, o pavimento do Lote 3 possui uma estrutura com os seguintes materiais e espessuras:

- a) revestimento de concreto asfáltico com espessura de 12 cm com,
 - temperatura de referência de 77° F;
 - porcentagem efetiva de ligantes de 12,7%;
 - coeficiente de Poisson de 0,35;
 - penetração 40-50;
- b) camada de concreto asfáltico com 5 cm de espessura com,
 - temperatura de referência de 77° F;
 - porcentagem efetiva de ligantes de 18%;
 - coeficiente de Poisson de 0,35;
 - penetração 40-50;
- c) base de brita graduada com 15 cm de espessura com,

²⁰ Dados fornecidos pela Empresa Queiroz Galvão ao orientador desse trabalho e por sua vez, disponibilizados ao autor.

- módulo de resiliência de 25.000 psi;
- coeficiente de Poisson de 0,35;
- d) sub-base de macadame seco com espessura de 38 cm com,
 - módulo de resiliência de 42.000 psi;
 - coeficiente de Poisson de 0,35;
- e) subleito de solo A-2-4 (segundo classificação da AASHTO) com,
 - módulo de resiliência de 14.000 psi;
 - coeficiente de Poisson de 0,35.

Os dados utilizados como parâmetros de análise pelo software M-E PDG para o pavimento da BR-101 (Lote 3) são os mesmos apresentados para o Lote 1 (quadro 5).

5.3.2.2 Distribuição dos Veículos por Classe e VDM_c

Segundo os dados de contagem de tráfego da BR-101 levantados pela Empresa Queiroz Galvão ²¹, a distribuição de veículos por classe do Lote 3 é mostrada no quadro 10.

²¹ Estudo realizado em 2009 pela Empresa Queiroz Galvão.

Tipo de Veículo		Sentido		Expansão para 24h		Tráfego	
		Osório - Torres	Torres - Osório	Osório - Torres	Torres - Osório	Total	%
	Passeio	559	497	1005	746	1752	24,66
	Utilitário	82	86	147	129	276	3,88
	2CB	60	53	107	80	187	2,64
	3CB	35	32	64	48	111	1,56
	4CB	1	1	3	1	4	0,05
	4CD	5	5	8	7	16	0,22
	2C	207	192	372	289	661	9,30
	3C	424	441	764	661	1425	20,06
	4C	0	0	0	0	0	0,00
	2S1	4	3	6	5	12	0,16
	2S2	139	119	250	179	428	6,03
	2S3	292	333	525	500	1025	14,43
	3S1	0	1	1	1	2	0,02
	3S2	15	15	28	23	50	0,71
	3S3	229	252	412	378	790	11,12
	2C2	5	2	8	2	11	0,15
	2C3	1	1	1	1	3	0,04
	3C2	3	3	5	4	9	0,13
	3C3	0	3	1	5	5	0,08
	3D4	85	83	153	125	277	3,91
	3D6*	0	2	0	3	3	0,05
	3T6	16	19	29	28	57	0,80

Quadro 10: distribuição de veículos por classe para o Lote 3
(QUEIROZ GALVAO²²)

Descartando os veículos de passeio e utilitários, como foi feito no Lote 1, o VDM_c do Lote 3 é de 5.076 veículos.

Fazendo-se as devidas adaptações (como mostrado no item 5.3.1.2) e recalculando as porcentagens, a distribuição de veículos por classe do software M-E PDG é apresentada no quadro 11.

²² Estudo realizado em 2009 pela Empresa Queiroz Galvão.

Classe 4	2,2%
Classe 5	16,7%
Classe 6	28,1%
Classe 7	9,0%
Classe 8	0,2%
Classe 9	21,2%
Classe 10	15,5%
Classe 11	0,3%
Classe 12	0,1%
Classe 13	6,7%

Quadro 11: distribuição de veículos por classe, do software M-E PDG, do Lote 3

5.3.2.3 Porcentagem de Distribuição Mensal do Tráfego

Os dados de distribuição mensal do tráfego do Lote 3 da BR-101 não foram levantados, portanto, foi usada a mesma distribuição mensal da BR-290.

5.3.2.4 Porcentagem de Distribuição Horária do Tráfego

A distribuição horária do tráfego do Lote 3 da BR-101 é a mesma levantada na BR-290, porém com uma hora de atraso. A distribuição do Lote 3 é mostrada abaixo no quadro 12.

0:00	2,0%	12:00	5,2%
1:00	1,8%	13:00	4,6%
2:00	1,3%	14:00	4,9%
3:00	1,1%	15:00	5,6%
4:00	1,0%	16:00	5,7%
5:00	1,4%	17:00	6,0%
6:00	2,7%	18:00	6,4%
7:00	5,0%	19:00	6,4%
8:00	6,2%	20:00	5,5%
9:00	5,8%	21:00	4,3%
10:00	5,6%	22:00	3,4%
11:00	5,5%	23:00	2,6%

Quadro 12: distribuição horária do tráfego do Lote 3

6 ESPECTROS DE CARGA E FATORES DE CRESCIMENTO DE TRÁFEGO

Ao contrário dos métodos empíricos, quando se trabalha com o número N, os métodos mecanístico-empíricos permitem o uso do **espectro de carga**. Espectro de carga é a porcentagem de cada veículo comercial (com suas configurações e magnitudes de carga específicas) que irá solicitar o pavimento durante o período de projeto. A partir do uso do espectro de carga, pode-se avaliar como veículos reais danificam a estrutura do pavimento em estudo.

Outra forma de avaliar o dano no pavimento é variando o volume do tráfego. Essa variação pode ser feita através de diferentes **fatores de crescimento de tráfego** (ferramenta disponível no software M-E PDG). As variações no espectro de carga e nos fatores de crescimento de tráfego utilizadas no trabalho são discutidas a seguir.

6.1 VARIAÇÕES NO ESPECTRO DE CARGA

Neste trabalho foram utilizados três espectros de carga diferentes para cada trecho. Eles foram divididos em:

- a) tráfego atual;
- b) tráfego antigo;
- c) tráfego futuro.

Basicamente, os espectros foram variados alterando-se a distribuição de veículos por classe e a pressão de inflação dos pneus. O fator de crescimento de tráfego utilizado para todos os espectros foi o de 3%. Nos itens abaixo são descritos detalhadamente os processos de elaboração dos espectros de carga.

6.1.1 TRÁFEGO ATUAL

Tráfego Atual é o tráfego que atualmente circula no trecho em estudo, baseado nos estudos de tráfego que foram fornecidos. Para esse espectro de carga, foram consideradas as distribuições de veículos por classe apresentadas anteriormente e pressão de inflação dos pneus de 120 psi.

6.1.2 TRÁFEGO ANTIGO

Tráfego Antigo foi definido neste trabalho como o tráfego de veículos com peso de até 48,5 tf. O quadro 13 mostra que os veículos das classes 12 e 13 estão acima dessa faixa.

Classe 4	27 tf
Classe 5	16 tf
Classe 6	23 tf
Classe 7	31,5 tf
Classe 8	26 tf
Classe 9	40 tf
Classe 10	48,5 tf
Classe 11	46 tf
Classe 12	53 tf
Classe 13	60 tf

Quadro 13: pesos dos veículos por classe do software M-E PDG

Para a elaboração do espectro de carga do Tráfego Antigo, foram retirados os veículos das classes 12 e 13, redistribuídos na classe 11, feito novamente o cálculo do VDM_c e recalculadas as porcentagens de veículos por classe, como demonstrado a seguir para o Lote 1 da BR-101.

$$VDM_c \text{ Atual} = 5.494 \text{ veículos}$$

$$\text{Classe 12} = 0,1\% = 5 \text{ veículos}$$

$$\text{Classe 13} = 7,6\% = 417 \text{ veículos}$$

$$VDM_c \text{ sem Classe 12 e 13} = 5.494 - 5 - 417 = 5.072 \text{ veículos}$$

Redistribuindo os veículos para a Classe 11, onde, de acordo com o quadro 10:

$$1 \text{ veículo da Classe 12} = 1,15 \text{ veículos da Classe 11}$$

1 veículo da Classe 13 = 1,3 veículos da Classe 11

Então:

$$\text{VDM}_c \text{ Antigo} = 5.072 + (5 \times 1,15) + (417 \times 1,3) \approx 5.622 \text{ veículos}$$

Fazendo o mesmo para os outros trechos e recalculando a porcentagem de veículos por classe, as distribuições de veículos e respectivos novos VDM_c para o Tráfego Antigo são apresentadas no quadro 14.

Classe	Lote 1	Lote 3	BR-290
Classe 4	1,95%	2,15%	0,00%
Classe 5	11,05%	16,40%	26,80%
Classe 6	30,20%	27,50%	30,47%
Classe 7	7,60%	8,80%	5,72%
Classe 8	0,10%	0,20%	0,00%
Classe 9	23,10%	20,77%	18,35%
Classe 10	16,00%	15,18%	12,73%
Classe 11	10,00%	9,00%	5,93%
Classe 12	0,00%	0,00%	0,00%
Classe 13	0,00%	0,00%	0,00%
VDM_c	5.622	5.180	4.705

Quadro 14: VDM_c e distribuição de veículos dos trechos por classe para o Tráfego Antigo

Para o Tráfego Antigo foi alterada também a pressão de inflação dos pneus, de 120 psi (Tráfego Atual) para 90 psi.

6.1.3 TRÁFEGO FUTURO

Tráfego Futuro foi definido neste trabalho como uma possível tendência de comportamento do tráfego, que seria a substituição de veículos menores e mais leves por veículos maiores e mais pesados. Essa substituição acarretaria no aumento da quantidade de carga transportada por viagem, diminuindo assim o tempo para o transporte, número de viagens e o número de funcionários necessários (comparando-se com o transporte feito por veículos menores).

Para a elaboração do espectro de carga do Tráfego Futuro, foram retirados os veículos das classes 5, 6 e 7, redistribuídos na classe 13, feito novamente o cálculo do VDM_c e recalculadas as porcentagens de veículos por classe, como demonstrado a seguir para o Lote 1 da BR-101.

$$\text{VDM}_c = 5.494 \text{ veículos}$$

$$\text{Classe 5} = 11,3\% = 621 \text{ veículos}$$

$$\text{Classe 6} = 30,9\% = 1.698 \text{ veículos}$$

$$\text{Classe 7} = 7,8\% = 429 \text{ veículos}$$

$$\text{VDM}_c \text{ sem Classe 5, 6 e 7} = 5.494 - 621 - 1.698 - 429 = 2.746 \text{ veículos}$$

Redistribuindo os veículos para a Classe 13, onde, de acordo com o quadro 10:

$$1 \text{ veículo da Classe 5} = 0,27 \text{ veículos da Classe 13}$$

$$1 \text{ veículo da Classe 6} = 0,38 \text{ veículos da Classe 13}$$

$$1 \text{ veículo da Classe 7} = 0,53 \text{ veículos da Classe 13}$$

Então:

$$\text{VDM}_c \text{ Futuro} = 2.746 + (621 \times 0,27) + (1.698 \times 0,38) + (429 \times 0,53) \approx 3.788 \text{ veículos}$$

Fazendo o mesmo para os outros trechos e recalculando a porcentagem de veículos por classe, as distribuições de veículos e respectivos novos VDM_c para o Tráfego Futuro são mostradas no quadro 15.

Classe	Lote 1	Lote 3	BR-290
Classe 4	2,90%	3,32%	0,00%
Classe 5	0,00%	0,00%	0,00%
Classe 6	0,00%	0,00%	0,00%
Classe 7	0,00%	0,00%	0,00%
Classe 8	0,14%	0,30%	0,00%
Classe 9	34,23%	32,05%	31,93%
Classe 10	23,78%	23,43%	22,15%
Classe 11	0,30%	0,45%	0,00%
Classe 12	0,14%	0,15%	0,00%
Classe 13	38,51%	40,30%	45,92%
VDM_c	3.788	3.358	2.702

Quadro 15: VDM_c e distribuição de veículos dos trechos por classe para o Tráfego Futuro

Para o Tráfego Futuro foi alterada também a pressão de inflação dos pneus, de 120 psi (Tráfego Atual) para 130 psi.

6.2 VARIAÇÃO DOS FATORES DE CRESCIMENTO DE TRÁFEGO

Para cada trecho de rodovia, foram utilizados três fatores de crescimento de tráfego (considerando o espectro de carga Tráfego Atual) para a análise do crescimento do volume do tráfego no desempenho do pavimento:

- a) 3%;
- b) 4%;
- c) 5%.

O fator de crescimento de tráfego de 3% é a porcentagem de crescimento tida como referência e tomada como orientação geral pelo DNIT para projetos rodoviários. Os fatores de crescimento de tráfego de 4% e 5% são fatores de crescimento considerados otimistas em relação à realidade brasileira, porém, estima-se que dentro de alguns anos esse fatores serão considerados nos projetos rodoviários (tendo em vista o crescimento da economia brasileira).

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De posse de todos os dados de entrada necessários, foi feita a análise pelo software (considerando um período de projeto de 10 anos). Dos dados de saída que são fornecidos pelo software M-E PDG, quatro parâmetros foram analisados no trabalho:

- a) irregularidade (IRI);
- b) deformação permanente (ATR);
- c) trincamento de baixo para cima;
- d) trincamento de cima para baixo.

Com esses parâmetros, pode-se analisar o desempenho funcional (irregularidade e deformação permanente) e estrutural (trincamentos por fadiga) dos pavimentos estudados. Os itens a seguir apresentam os resultados dos espectros de carga variados e dos fatores de crescimento de tráfego.

7.1 ESPECTROS DE CARGA

Os resultados relativos aos espectros de carga variados são mostrados e analisados a seguir. Os resultados da BR-290 serão apresentados na forma de gráficos e os da BR-101 (Lote 1 e 3) serão apresentados em quadros.

Os gráficos da aplicação dos espectros de carga dos Lotes 1 e 3 serão mostrados no apêndice A e B respectivamente.

7.1.1 BR-290

De acordo com a figura 8, pode-se notar uma pequena diferença com relação a irregularidade do pavimento sob a aplicação de cada espectro de carga. Para o Tráfego Antigo, a estrutura

atinge uma irregularidade de 2,25 m/km entre 6 e 6 anos e meio. Já para o Tráfego Atual, o mesmo valor de irregularidade é obtido em aproximadamente 5 anos. Com relação ao Tráfego Futuro, a irregularidade citada é alcançada em um pouco mais de 4 anos.

A irregularidade terminal (conforme quadro 1) para a estrutura de pavimento da BR-290 não é alcançada por nenhum dos espectros de carga, chegando mais perto de ser atingida pelo Tráfego Futuro, que encerra o período de projeto de 10 anos com uma irregularidade de 2,577 m/km.

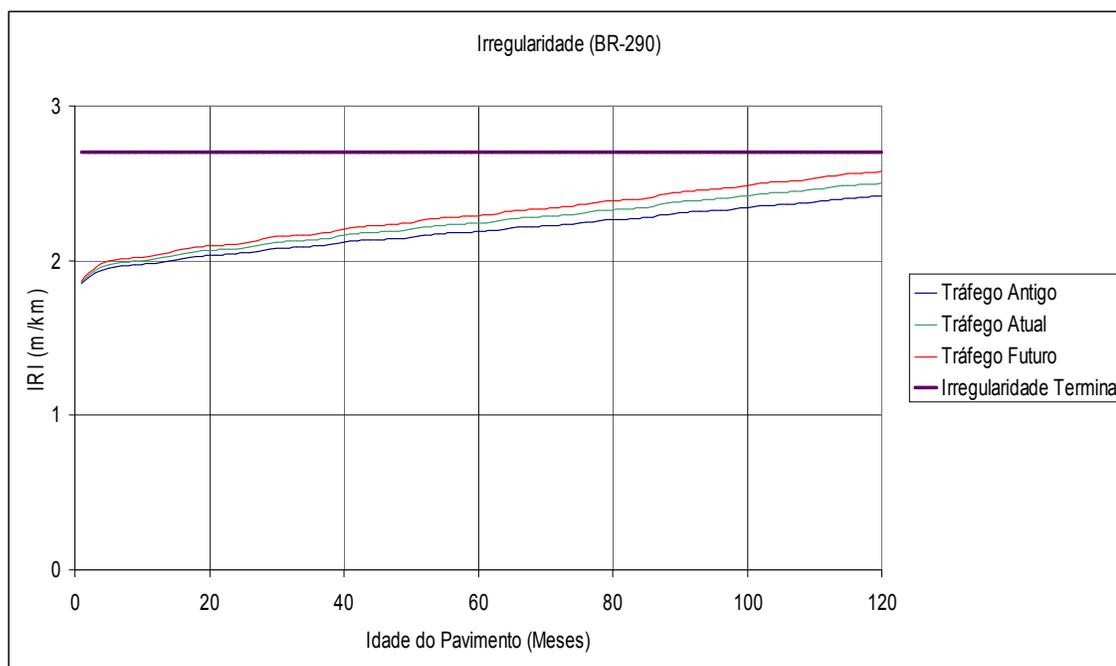


Figura 8: irregularidade para espectros de carga variados (BR-290)

Os resultados são mais significativos, de acordo com a figura 9, quando se analisa as deformações permanentes ou afundamentos nas trilhas de roda (ATR). O ATR limite, conforme o quadro 1, é obtido pelo Tráfego Antigo em aproximadamente 6 anos e meio. É também alcançada em um pouco antes de 4 anos e meio pelo Tráfego Atual e em aproximadamente 3 anos pelo Tráfego Futuro.

Nota-se também a grande influência do clima no desgaste do pavimento. O aumento da deformação permanente se dá principalmente nos verões, tendo maior significância no primeiro verão e, logo após, diminuindo a variação do afundamento nessa estação.

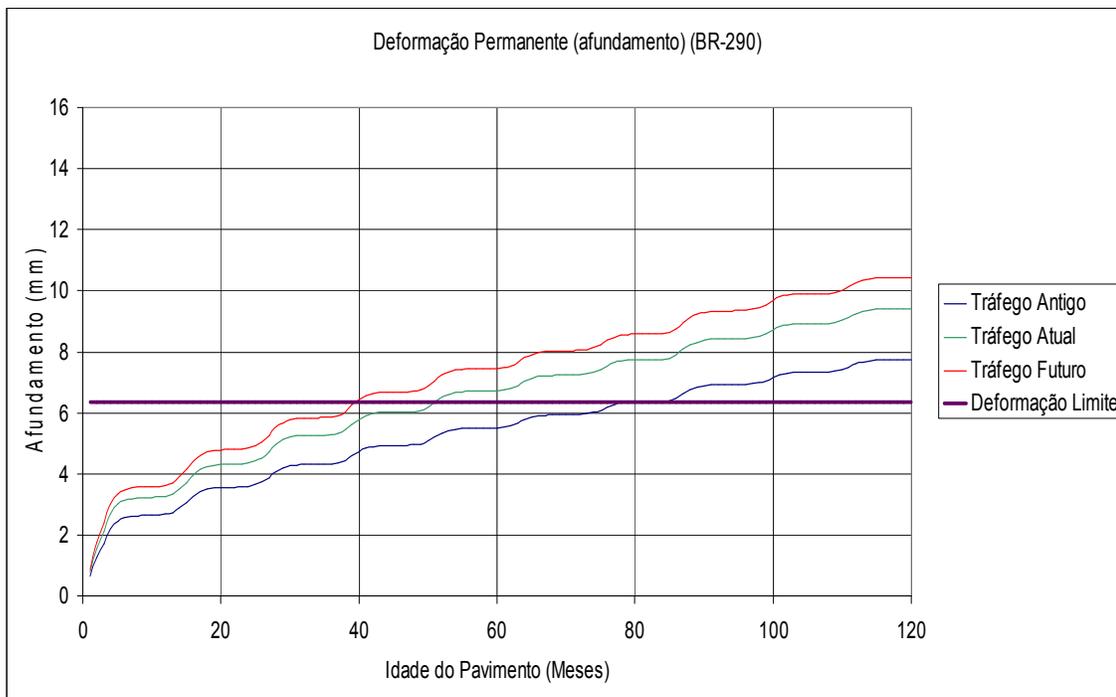


Figura 9: deformação permanente para espectros de carga variados (BR-290)

Conforme a figura 10, a porcentagem de trincamento de baixo para cima também sofre uma alteração com a variação dos espectros de carga. Com a aplicação do Tráfego Antigo, o pavimento alcança 5% de área trincada um pouco antes de 10 anos. Com o Tráfego Atual, atinge esse mesmo valor em 7 anos e com o Tráfego Futuro em aproximadamente 5 anos.

Essas porcentagens de trincamento de baixo para cima ainda são baixas comparadas com a porcentagem de trincamento admissível para essa estrutura de pavimento. O máximo atingido foi de 11,8% de área trincada (obtida com a aplicação do Tráfego Futuro), valor ainda muito abaixo do admissível (segundo o quadro 1).

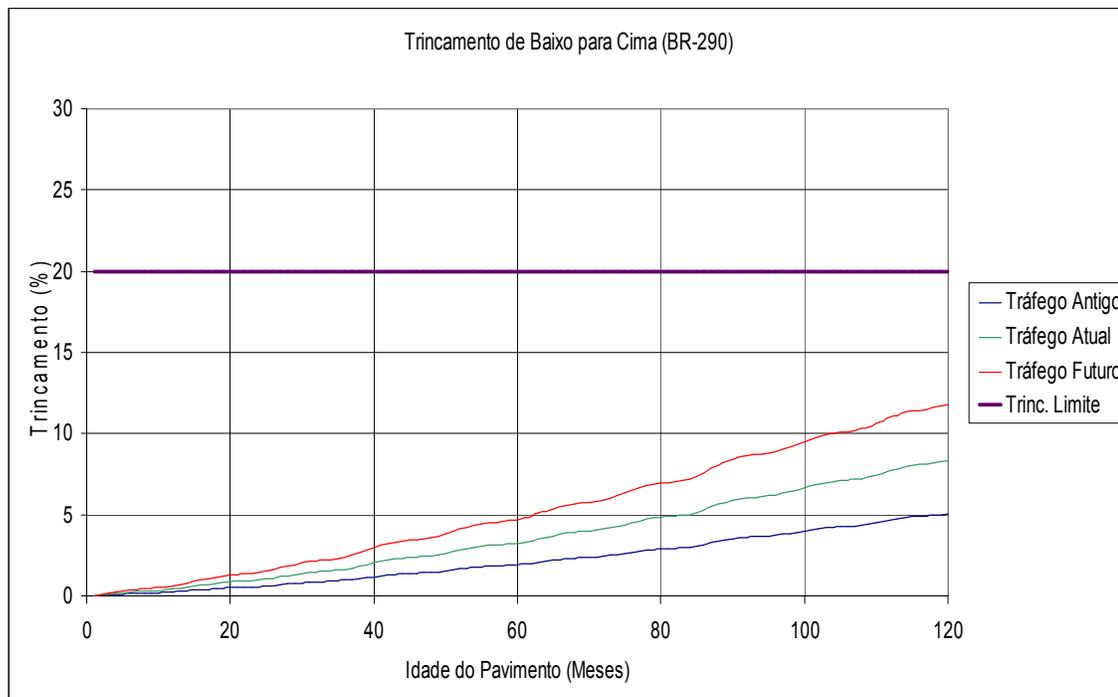


Figura 10: trincamento de baixo para cima para espectros de carga variados (BR-290)

Tem-se na figura 11, a variação do trincamento de cima para baixo na aplicação dos diferentes espectros de carga. Um valor de trincamento de cima para baixo de 30 m/km (1000 pés/milha) é obtido pelo Tráfego Antigo em 9 anos. Pelo Tráfego Atual, o mesmo nível de trincamento é atingido em 7 anos e meio. Já pelo Tráfego Futuro, o mesmo valor é obtido em pouco mais de 5 anos e meio.

Comparando-se com o valor de trincamento de cima para baixo admissível, de acordo com o quadro 1, nenhum dos espectros chegou a esse nível. O máximo foi de 84 m/km, atingido pelo Tráfego Futuro.

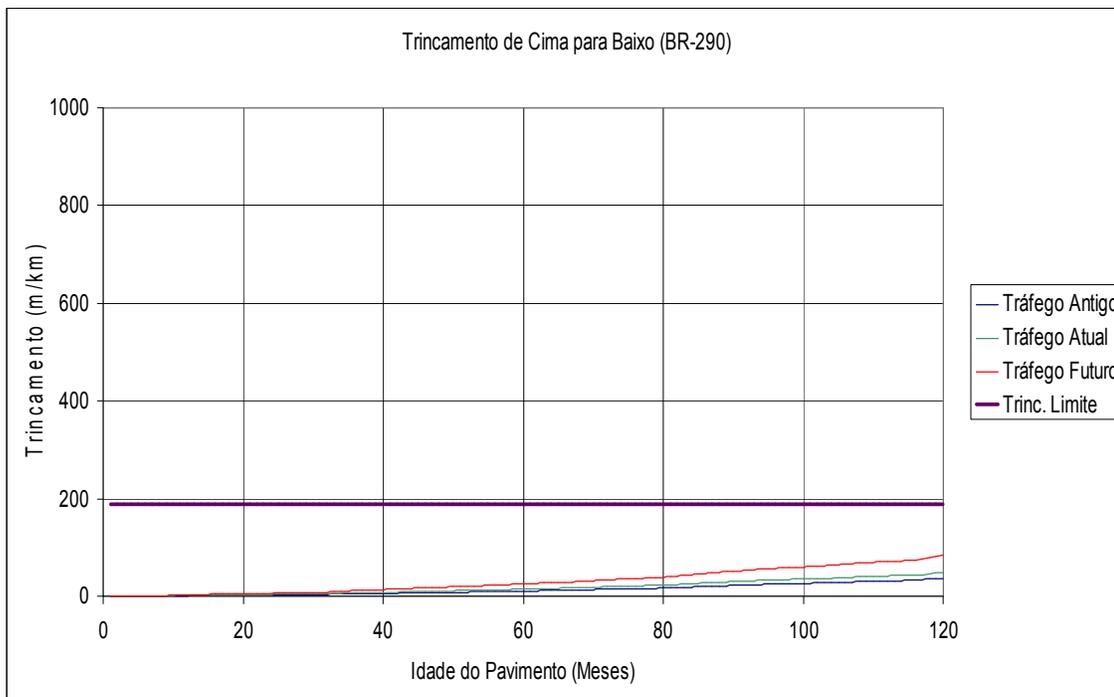


Figura 11: trincamento de cima para baixo para espectros de carga variados (BR-290)

7.1.2 BR-101 (Lote 1)

A irregularidade (IRI) devido a aplicação dos diferentes espectros de carga no Lote 1, segundo o quadro 16, também sofreu uma pequena variação, como na BR-290. Um mesmo valor de 2,25 m/km é obtido em aproximadamente 8 anos e meio pelo Tráfego Antigo, um pouco mais de 6 anos e meio pelo Tráfego Atual e em 6 anos pelo Tráfego Futuro.

Comparando os resultados obtidos com a irregularidade limite (de acordo com o quadro 5), tem-se que a estrutura não atingiu tal valor sob a aplicação dos três espectros de carga ao final do período de projeto. O máximo foi atingido pelo Tráfego Futuro com um valor de 2,43 m/km.

Tráfego Antigo		Tráfego Atual		Tráfego Futuro	
Idade (Meses)	IRI (m/km)	Idade (Meses)	IRI (m/km)	Idade (Meses)	IRI (m/km)
103	2,249	80	2,247	71	2,246
104	2,251	81	2,251	72	2,252
120	2,301	120	2,391	120	2,432
Irregularidade Terminal = 2,7 m/km					

Quadro 16: análise da irregularidade para espectros de carga variados (Lote 1)

Analisando os resultados dos espectros de carga com relação aos afundamentos nas trilhas de roda (ATR) tem-se novamente uma diferença significativa nos valores, de acordo com o quadro 17. O Tráfego Antigo, em aproximadamente 6 anos, atinge o valor de ATR limite (conforme o quadro 5). Mesmo valor é obtido pelo Tráfego Atual em um pouco mais de 3 anos e pelo Tráfego Futuro em cerca de 2 anos. Tendo em vista que a análise foi realizada para um período de projeto de 10 anos, os valores encontrados atingem rapidamente o limite.

Tráfego Antigo		Tráfego Atual		Tráfego Futuro	
Idade (Meses)	ATR (mm)	Idade (Meses)	ATR (mm)	Idade (Meses)	ATR (mm)
72	6,2	36	6,2	26	6,2
73	6,4	37	6,5	27	6,4
120	8,1	120	11,2	120	12,4
Deformação Permanente Limite = 6,35 mm					

Quadro 17: análise da deformação para espectros de carga variados (Lote 1)

O trincamento de baixo para cima do Lote 1 (de acordo com o quadro 18) sofre uma variação menor do que a apresentada no trincamento da BR-290 e com valores bem mais baixos. Um trincamento de 2,5% é obtido pelo Tráfego Antigo em pouco menos de 10 anos. A mesma porcentagem é atingida aos 8 anos pelo Tráfego Atual e em aproximadamente 7 anos pelo Tráfego Futuro.

Os valores atingidos pela estrutura, nos três cenários, ao final dos 10 anos de projeto, são significativamente baixos, sendo a porcentagem mais elevada atingida pelo Tráfego Futuro, com um valor de 3,78% (valor muito abaixo do limite, conforme quadro 5).

Tráfego Antigo		Tráfego Atual		Tráfego Futuro	
Idade (Meses)	Trinc. (%)	Idade (Meses)	Trinc. (%)	Idade (Meses)	Trinc. (%)
118	2,460	95	2,420	85	2,480
119	2,500	96	2,510	86	2,530
120	2,55	120	3,29	120	3,78
Trincamento de Baixo para Cima Limite = 25%					

Quadro 18: análise do trincamento de baixo para cima para espectros de carga variados (Lote 1)

Os resultados do Lote 1 para o trincamento de cima para baixo são bastante elevados e o seu limite é atingido rapidamente, porém com uma variação pequena entre cada cenário, de acordo com o quadro 19. O valor limite, de acordo com o quadro 5, é atingido em um pouco menos de 8 anos pela aplicação do Tráfego Antigo. Pelo Tráfego Atual, o mesmo nível de trincamento é obtido em cerca de 6 anos. Com o Tráfego Futuro, o mesmo valor é alcançado em pouco menos de 4 anos e meio.

Tráfego Antigo		Tráfego Atual		Tráfego Futuro	
Idade (Meses)	Trinc. (m/km)	Idade (Meses)	Trinc. (m/km)	Idade (Meses)	Trinc. (m/km)
94	186,4	75	187,5	52	187,1
95	193,1	76	191,2	53	191,2
120	286,8	120	390,0	120	592,5
Trincamento de Cima para Baixo Limite - 190 m/km					

Quadro 19: análise do trincamento de cima para baixo para espectros de carga variados (Lote 1)

7.1.3 BR-101 (Lote 3)

De acordo com o quadro 20, pode-se notar que a variação na irregularidade no Lote 3, pela aplicação de cara espectro de carga, é pequena, assim como os seus valores. Um valor de irregularidade de 2,20 m/km é atingido em aproximadamente 9 anos pelo Tráfego Antigo. O mesmo valor é obtido aos 7 anos pelo Tráfego Atual e aos 6 anos pelo Tráfego Futuro. Novamente o valor de irregularidade terminal (quadro 5) não foi obtido em nenhum dos três cenários, sendo o valor mais próximo alcançado pelo Tráfego Futuro (2,36 m/km).

Tráfego Antigo		Tráfego Atual		Tráfego Futuro	
Idade (Meses)	IRI (m/km)	Idade (Meses)	IRI (m/km)	Idade (Meses)	IRI (m/km)
105	2,197	82	2,199	72	2,199
106	2,200	83	2,202	73	2,205
120	2,241	120	2,323	120	2,360
Irregularidade Terminal = 2,7 m/km					

Quadro 20: análise da irregularidade para espectros de carga variados (Lote 3)

Conforme o quadro 21, os resultados de afundamentos nas trilhas de roda (ATR) para o Lote 3 atingem o valor limite (conforme quadro 5) rapidamente. Pela aplicação do Tráfego Antigo, tem-se o valor limite de afundamento atingido em 7 anos. O mesmo valor é obtido em 3 anos com o Tráfego Atual e em pouco mais de 2 anos e meio pelo Tráfego Futuro.

Tráfego Antigo		Tráfego Atual		Tráfego Futuro	
Idade (Meses)	ATR (mm)	Idade (Meses)	ATR (mm)	Idade (Meses)	ATR (mm)
95	6,2	46	6,3	35	6,1
96	6,4	47	6,4	36	6,4
120	7,2	120	10,1	120	11,3
Deformação Permanente Limite = 6,35 mm					

Quadro 21: análise da deformação para espectros de carga variados (Lote 3)

Os valores encontrados para o trincamento de baixo para cima do Lote 3 são praticamente nulos, de acordo com o quadro 22, sendo o valor mais elevado atingido pelo Tráfego Futuro (0,9% de trincamento).

Tráfego Antigo		Tráfego Atual		Tráfego Futuro	
Idade (Meses)	Trinc. (%)	Idade (Meses)	Trinc. (%)	Idade (Meses)	Trinc. (%)
116	0,59	96	0,59	85	0,59
117	0,6	97	0,61	86	0,6
120	0,63	120	0,78	120	0,90
Trincamento de Baixo para Cima Limite = 25%					

Quadro 22: análise do trincamento de baixo para cima para espectros de carga variados (Lote 3)

De acordo com o quadro 23, os resultados do trincamento de cima para baixo da estrutura do Lote 3 sofreram significativas variações para cada espectro de carga aplicado. Para o Tráfego Antigo, não foi obtido o valor limite (segundo o quadro 5) durante os 10 anos de projeto, sendo o valor máximo obtido de 116 m/km. O valor limite também não é obtido com o Tráfego Atual, sendo o valor máximo alcançado de 164 m/km. Para o Tráfego Futuro, o valor limite é atingido com um pouco menos de 8 anos.

Tráfego Antigo		Tráfego Atual		Tráfego Futuro	
Idade (Meses)	Trinc. (m/km)	Idade (Meses)	Trinc. (m/km)	Idade (Meses)	Trinc. (m/km)
119	113,1	119	159,9	94	189,4
120	116,1	120	164,1	95	198,7
120	116,1	120	164,1	120	294,4
Trincamento de Cima para Baixo Limite - 190 m/km					

Quadro 23: análise do trincamento de cima para baixo para espectros de carga variados (Lote 3)

7.2 FATORES DE CRESCIMENTO DE TRÁFEGO

Os gráficos da aplicação de diferentes fatores de crescimento de tráfego serão apresentados nos apêndices A e B (Lotes 1 e 3 respectivamente) e apêndice C (BR-290).

Pelo quadro 24 pode-se notar que a variação da irregularidade na estrutura do pavimento dos três trechos estudados, pouco se altera devido a mudança dos fatores de crescimento de tráfego. Nota-se que um mesmo valor de irregularidade (2,25 m/km) é obtido nos três cenários, no máximo, com uma diferença de 2 meses entre cada fator de crescimento.

A diferença no valor da irregularidade atingido ao final do período de projeto para cada trecho e fator de crescimento de tráfego não chega a 0,1 m/km, ou seja, é uma variação bastante baixa e pouco significativa.

BR-290					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	IRI (m/km)	Idade (Meses)	IRI (m/km)	Idade (Meses)	IRI (m/km)
61	2,246	61	2,249	60	2,249
62	2,251	62	2,254	61	2,252
120	2,503	120	2,513	120	2,522
Lote 1					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	IRI (m/km)	Idade (Meses)	IRI (m/km)	Idade (Meses)	IRI (m/km)
80	2,2475	79	2,249	76	2,247
81	2,251	80	2,251	77	2,251
120	2,391	120	2,399	120	2,407
Lote 3					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	IRI (m/km)	Idade (Meses)	IRI (m/km)	Idade (Meses)	IRI (m/km)
96	2,247	95	2,243	95	2,246
97	2,254	96	2,251	96	2,255
120	2,323	120	2,330	120	2,334

Quadro 24: análise da irregularidade para fatores de crescimento de tráfego variados

Assim como foi mostrado para os resultados de irregularidade dos trechos, o quadro 25 mostra que os resultados de afundamentos nas trilhas de roda (ATR) pouco variam com a aplicação de fatores de crescimento de tráfego variados. A diferença no afundamento ao final do período de projeto para cada trecho e fator de crescimento utilizado é mínima (cerca de 0,2 mm).

BR-290					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	ATR (mm)	Idade (Meses)	ATR (mm)	Idade (Meses)	ATR (mm)
42	5,9	41	5,9	41	5,9
43	6,0	42	6,0	42	6,0
120	9,4	120	9,6	120	9,7
Lote 1					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	ATR (mm)	Idade (Meses)	ATR (mm)	Idade (Meses)	ATR (mm)
35	5,9	34	5,9	34	5,9
36	6,2	35	6,0	35	6,0
120	11,2	120	11,4	120	11,6
Lote 3					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	ATR (mm)	Idade (Meses)	ATR (mm)	Idade (Meses)	ATR (mm)
37	5,9	36	5,7	36	5,8
38	6,1	37	6,0	37	6,1
120	10,1	120	10,3	120	10,5

Quadro 25: análise da deformação para fatores de crescimento de tráfego variados

Analisando o trincamento de baixo para cima, conforme mostrado no quadro 26, tem-se novamente a pequena variação nos valores para cada fator de crescimento de tráfego.

BR-290					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	Trinc. (%)	Idade (Meses)	Trinc. (%)	Idade (Meses)	Trinc. (%)
48	2,47	47	2,46	46	2,47
49	2,54	48	2,52	47	2,51
120	8,33	120	8,73	120	9,13
Lote 1					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	Trinc. (%)	Idade (Meses)	Trinc. (%)	Idade (Meses)	Trinc. (%)
95	2,42	94	2,44	93	2,48
96	2,51	95	2,51	94	2,51
120	3,29	120	3,43	120	3,57
Lote 3					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	Trinc. (%)	Idade (Meses)	Trinc. (%)	Idade (Meses)	Trinc. (%)
108	0,68	106	0,69	102	0,69
109	0,7	107	0,7	103	0,7
120	0,78	120	0,81	120	0,84

Quadro 26: análise do trincamento de baixo para cima para fatores de crescimento de tráfego variados

Os valores de trincamento de cima para baixo foram os que obtiveram uma maior variação para cada fator de crescimento de tráfego (conforme quadro 27), principalmente nos Lotes 1 e 3. No Lote 1, ao final dos 10 anos de projeto, a diferença do trincamento para cada fator de

crescimento alcançou cerca de 20 m/km. Para o Lote 3, essa diferença é de aproximadamente 9 m/km. No trecho estudado da BR-290, essa diferença cai para 3 m/km.

BR-290					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	Trinc. (m/km)	Idade (Meses)	Trinc. (m/km)	Idade (Meses)	Trinc. (m/km)
108	39,5	105	39,5	102	39,5
109	40,3	106	40,3	103	40,1
120	49,3	120	52,3	120	55,3
Lote 1					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	Trinc. (m/km)	Idade (Meses)	Trinc. (m/km)	Idade (Meses)	Trinc. (m/km)
64	148,7	63	149,4	62	148,7
65	151,1	64	153,0	63	153,5
120	390,0	120	410,6	120	429,3
Lote 3					
3%		4%		5%	
Idade (Meses)	Trinc. (m/km)	Idade (Meses)	Trinc. (m/km)	Idade (Meses)	Trinc. (m/km)
111	148,7	108	146,8	106	147,5
112	150,3	109	150,2	107	150,5
120	164,0	120	173,4	120	182,8

Quadro 27: análise do trincamento de cima para baixo para fatores de crescimento de tráfego variados

8 CONCLUSÕES

A proposta do presente trabalho foi analisar os efeitos da aplicação de espectros de carga variados e de fatores de crescimento de tráfego na estrutura do pavimento dos três trechos estudados. Essa análise foi feita através do software M-E PDG, inserindo-se dados sobre o trecho e período de projeto, estruturas de pavimentos, tráfego atuante e clima. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi alcançado com sucesso. Quatro parâmetros de desempenho foram analisados, sendo os dois primeiros (irregularidade e deformação permanente) relativos ao desempenho funcional e os dois últimos referentes ao desempenho estrutural (trincamentos).

Abaixo são apresentadas as conclusões do trabalho com relação à aplicação dos espectros de carga e a variação dos fatores de crescimento. No último item são feitas as considerações finais.

8.1 ESPECTROS DE CARGA

Com relação aos espectros de carga, tem-se que as variações nos valores de desempenho foram bem significativas. No trecho estudado da BR-290 foram constatados os maiores valores para a irregularidade e para o trincamento de baixo para cima, apesar do volume de tráfego ser o menor entre os trechos. Estes valores mais altos se devem principalmente ao fato de que o revestimento asfáltico da BR-290 possui apenas uma camada de 8 cm, enquanto que nos outros trechos, constata-se a presença de duas camadas asfálticas (10 e 5 cm para o Lote 1 e 12 e 5 cm para o Lote 3). Enfatizando que o trincamento de baixo para cima ocorre basicamente devido à fadiga.

Em relação à deformação permanente (ATR), os valores do Lote 1 foram os mais representativos devido ao maior volume de tráfego, porém, não houveram diferenças muito drásticas entre os três trechos. Isso acontece pois as espessuras das camadas de base dos três trechos é a mesma, com módulos de resiliência aproximadamente equivalentes.

Para o trincamento de cima para baixo, os maiores valores ocorreram na estrutura do Lote 1, esses sim com grandes diferenças comparado aos outros dois trechos. Esses valores altos devem-se principalmente às tensões cisalhantes provocadas pelo tráfego (que é mais pesado e com maior volume nesse trecho), especialmente as tensões geradas pelo Tráfego Futuro.

8.2 FATORES DE CRESCIMENTO DE TRÁFEGO

Com relação a variação dos fatores de crescimento de tráfego, os resultados não foram tão expressivos quanto se esperava. Os resultados de irregularidade, deformação permanente e trincamento de baixo para cima sofreram variações muito baixas analisando-se de um fator de crescimento para outro. Os valores do trincamento de cima para baixo obtiveram as variações mais expressivas, mas ainda assim abaixo do esperado.

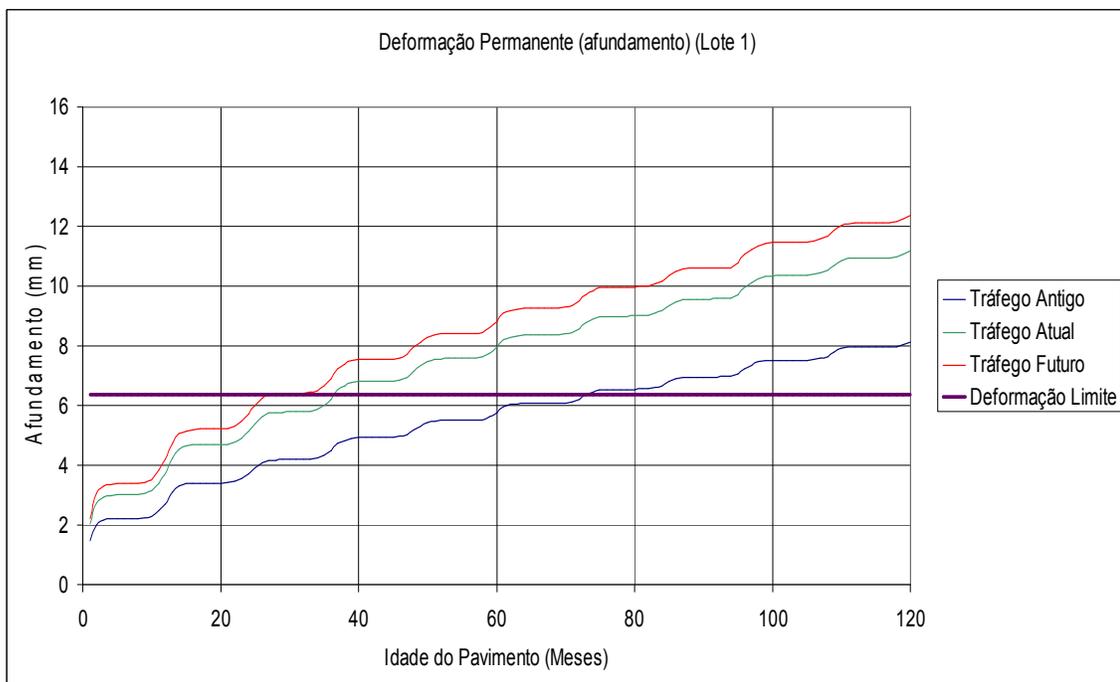
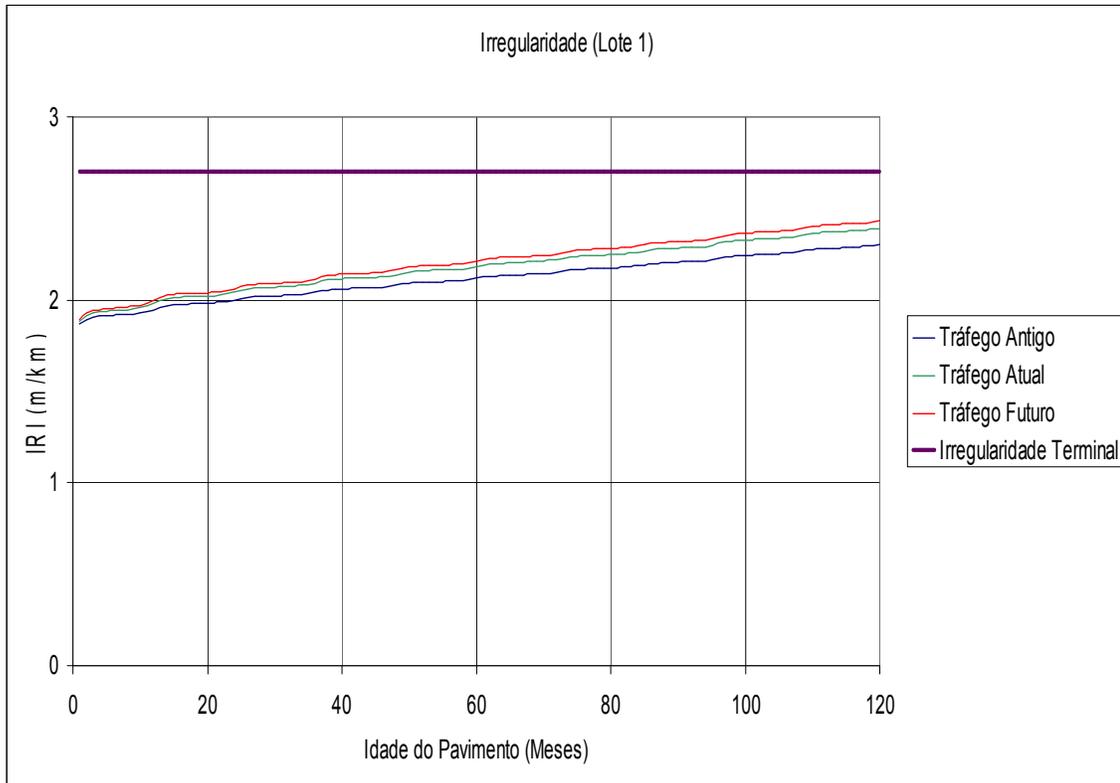
8.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

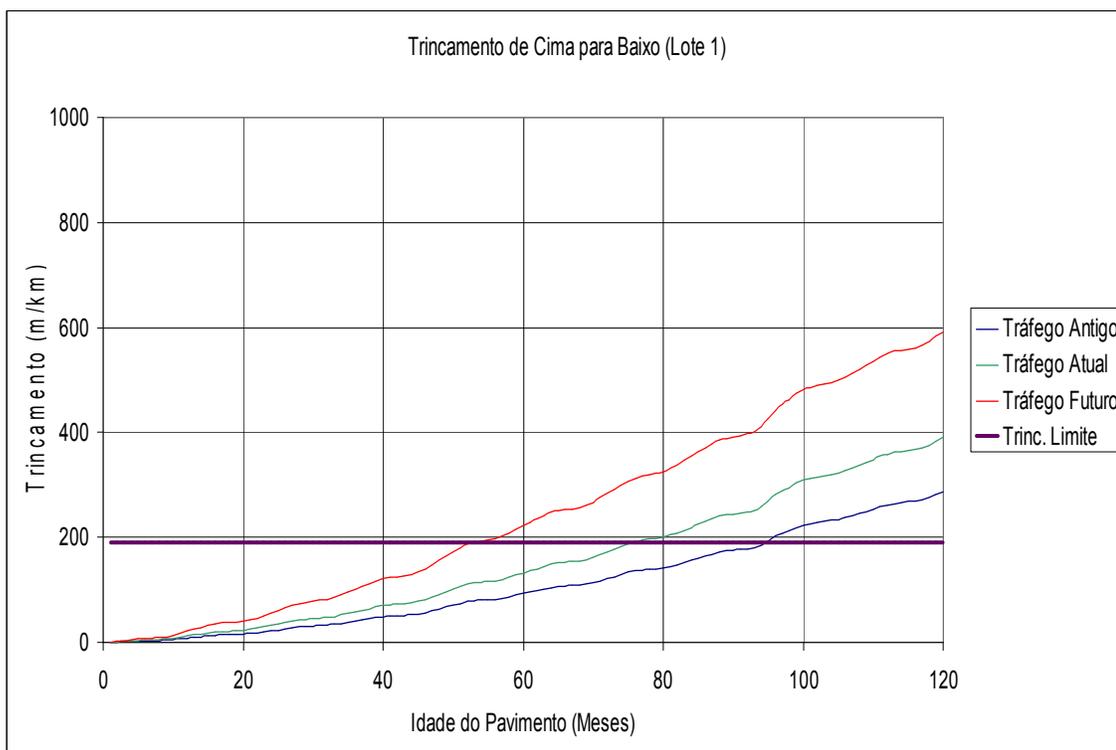
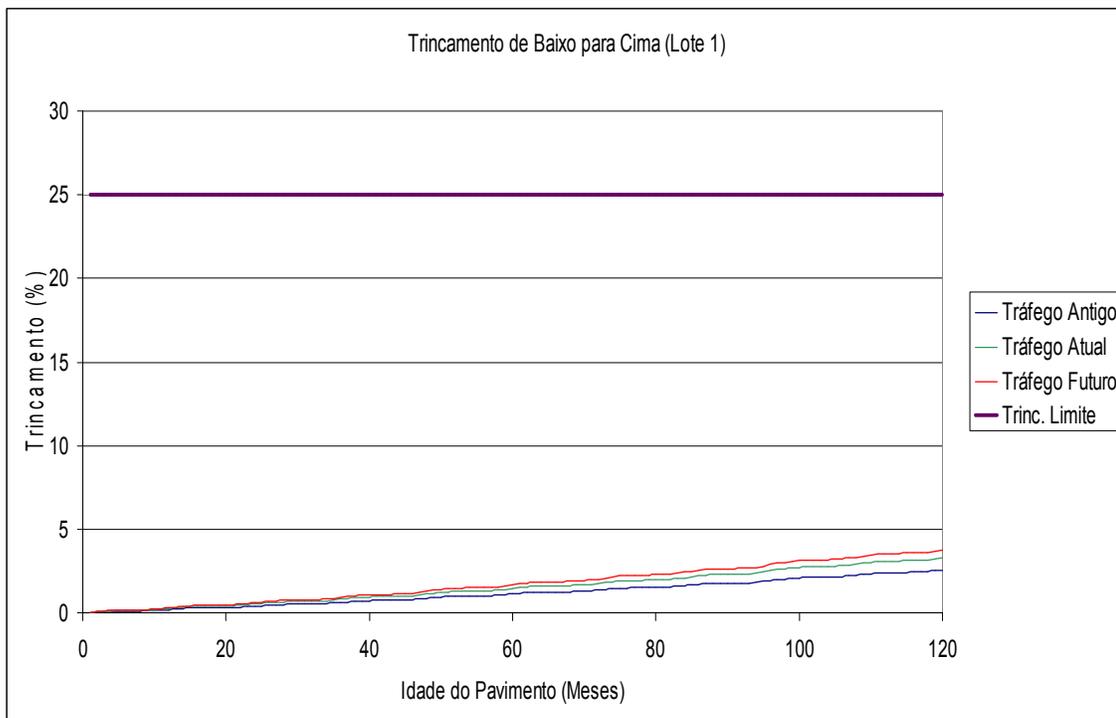
Comparando-se os resultados das aplicações dos espectros de carga com os obtidos com a variação dos fatores de crescimento, tem-se que os valores com o espectro de carga Tráfego Futuro ficaram bem acima dos valores encontrados para os fatores de crescimento de 4% e 5% (em todos os trechos). Nota-se com isso que a maior influência no desgaste do pavimento ocorre com relação à carga que é aplicada pelo tráfego em cada trecho, tendo maior relevância que o crescimento do seu volume.

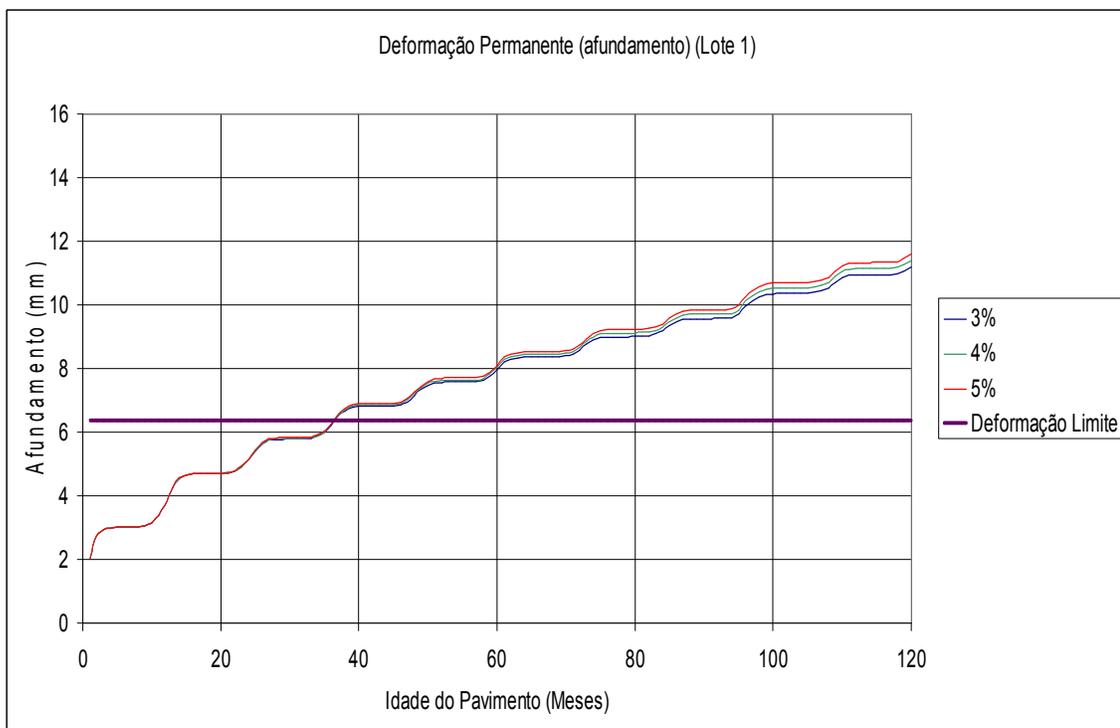
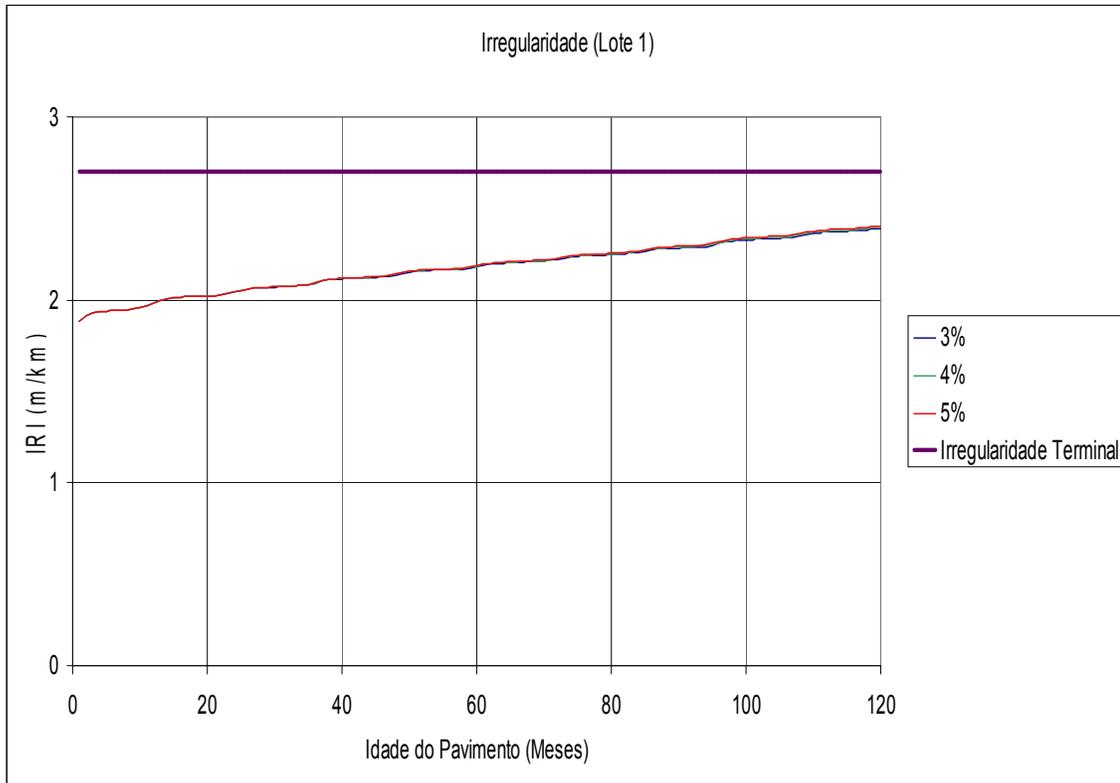
REFERÊNCIAS

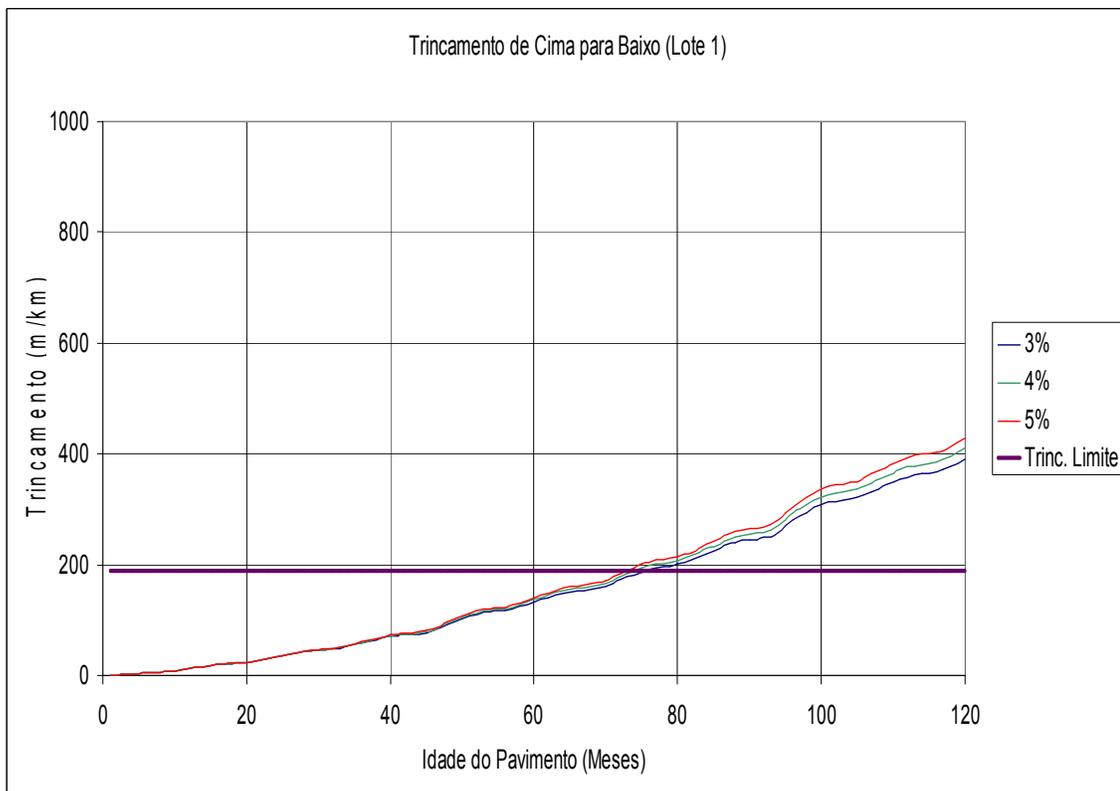
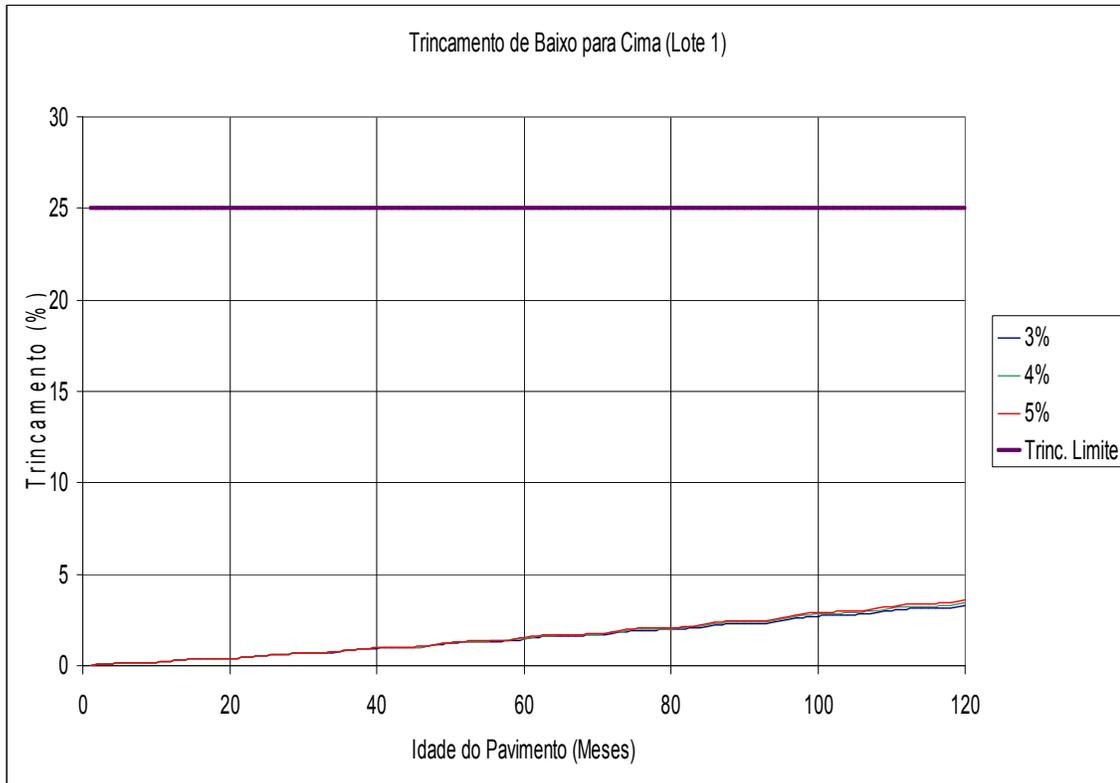
- ALBUQUERQUE, F. S. **Sistema de Gerência de Pavimento para Departamentos de Estradas do Nordeste Brasileiro**. 2007. 303 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras; Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Brasília, DF, 2006.
- FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav**. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MINNESOTA. Department of Transportation. Local Road Research Board. **Implementation of the MEPDG for New and Rehabilitated Pavement Structures for Design of Concrete and Asphalt Pavements in Minnesota**. St. Paul, Minnesota, 2009. Report MN/RC 2009-06.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures: Program 1-37A**. Washington, 2004. Final Report. Disponível em: <<http://www.trb.org/mepdg/guide.htm>>. Acesso em: 3 maio 2010.
- VITORELLO, T. **Análise de Desempenho da Estrutura de Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS no Trecho Osório-Porto Alegre**. 2008. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MECHANISTIC-Empirical Pavement Design Guide: Version 1.100. National Cooperative Highway Research Program, Washington, 2009. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/MEPDG_1100.zip>. Acesso em: 20 maio 2010.
- WIKIPÉDIA. **BR 290**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/>>. Acesso em: 13 outubro 2010.
- WIKIPÉDIA. **BR 101**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/>>. Acesso em: 13 outubro 2010.

**APÊNDICE A – Gráficos da BR-101 (Lote 1) para Espectros de Carga e
Fatores de Crescimento de Tráfego variados**

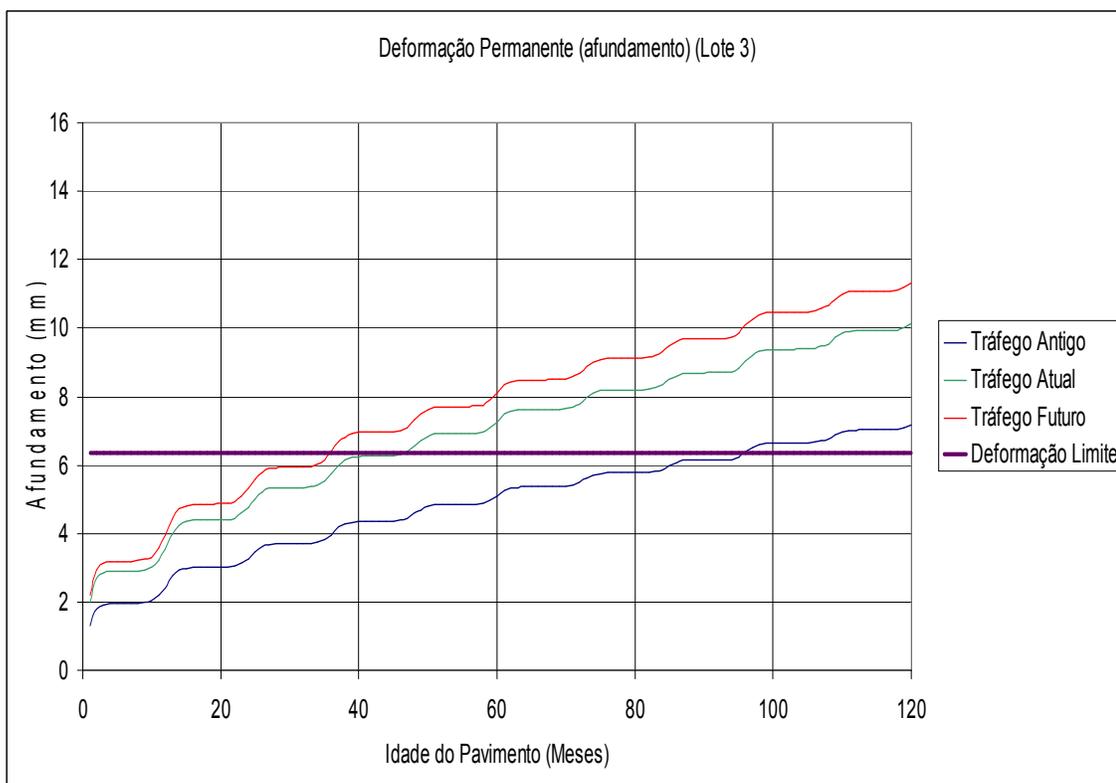
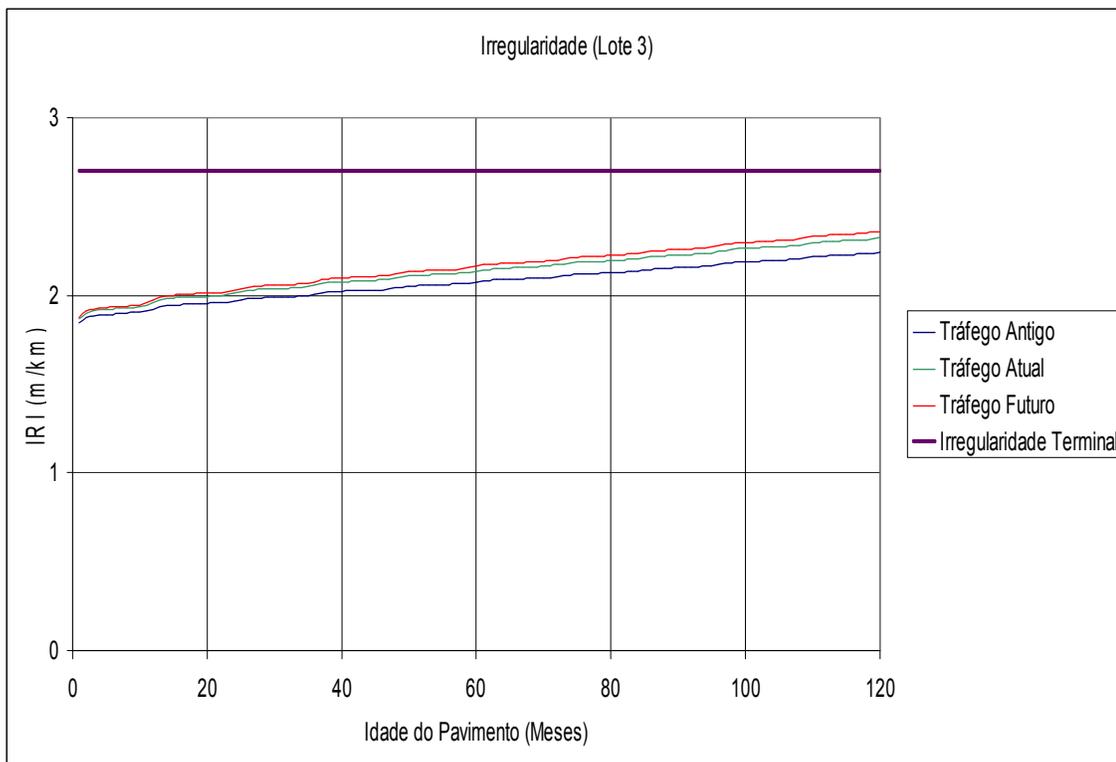


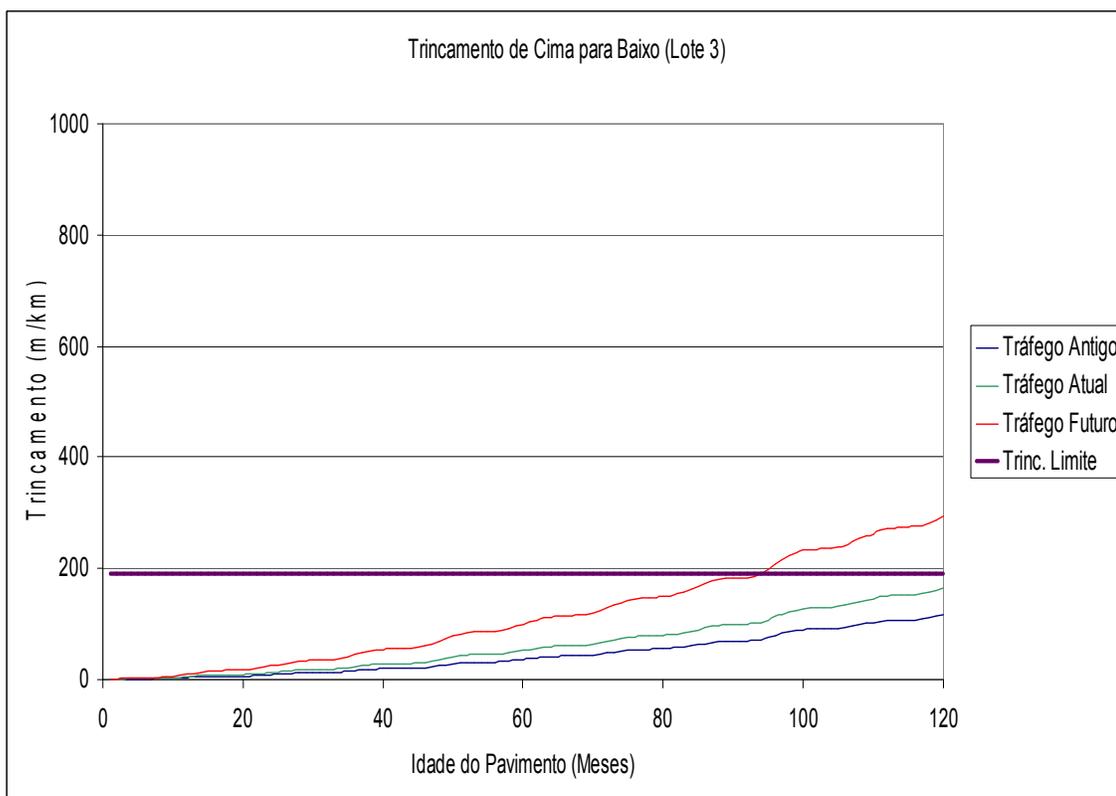
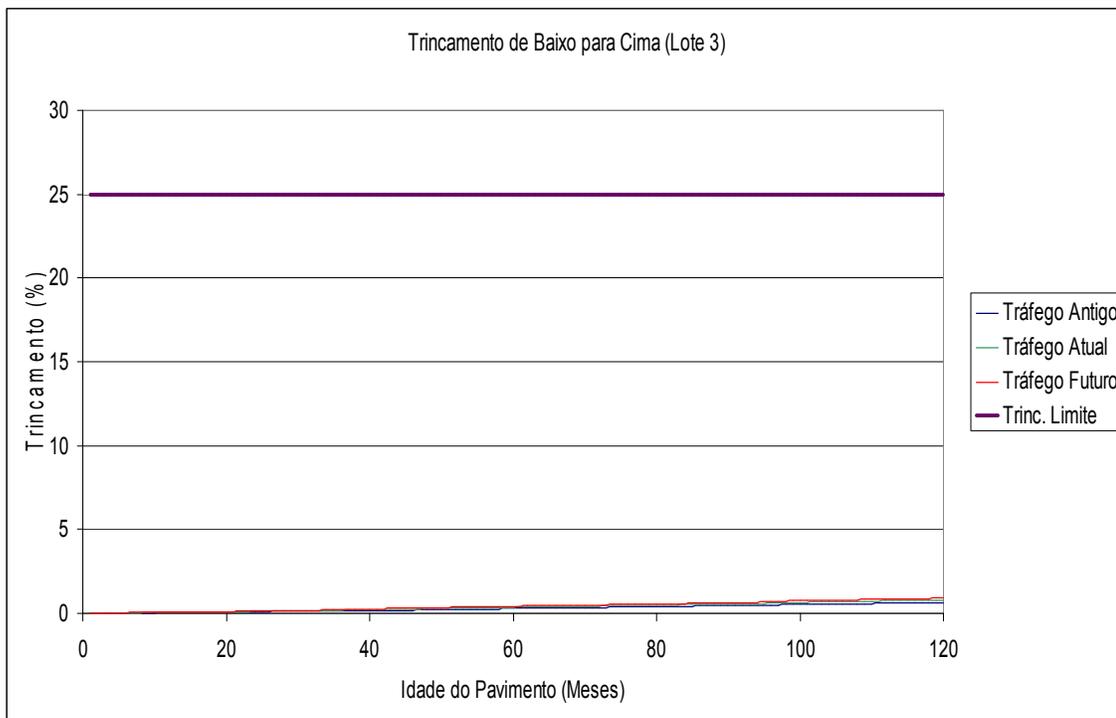


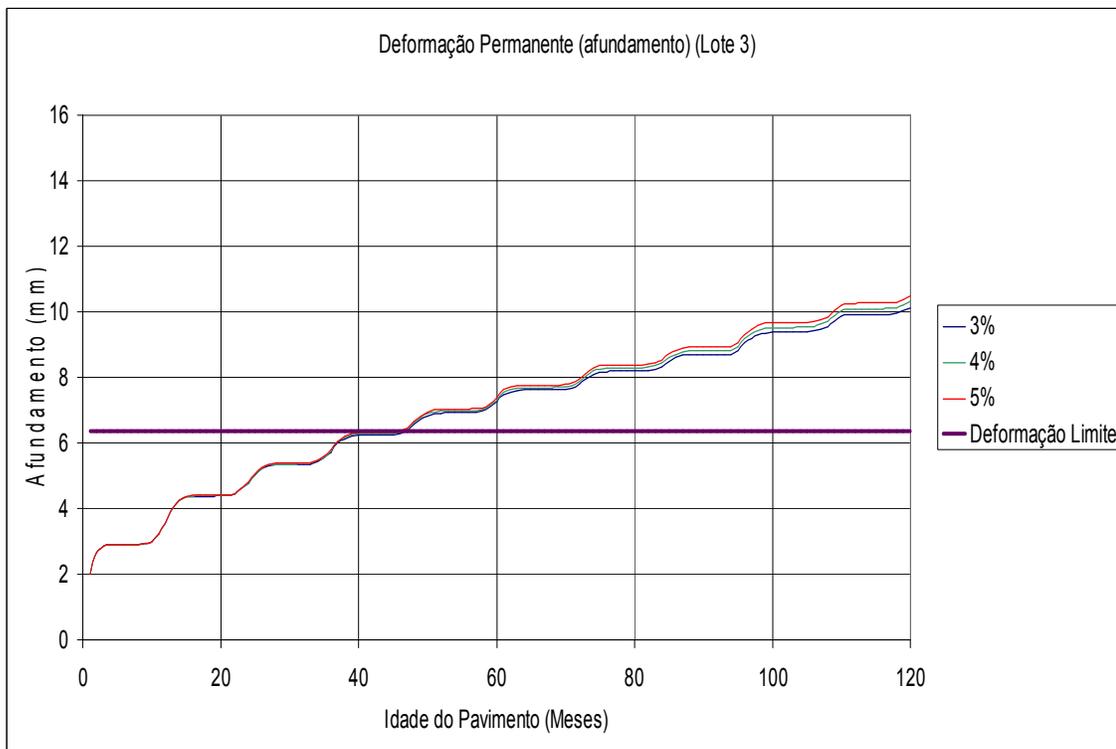
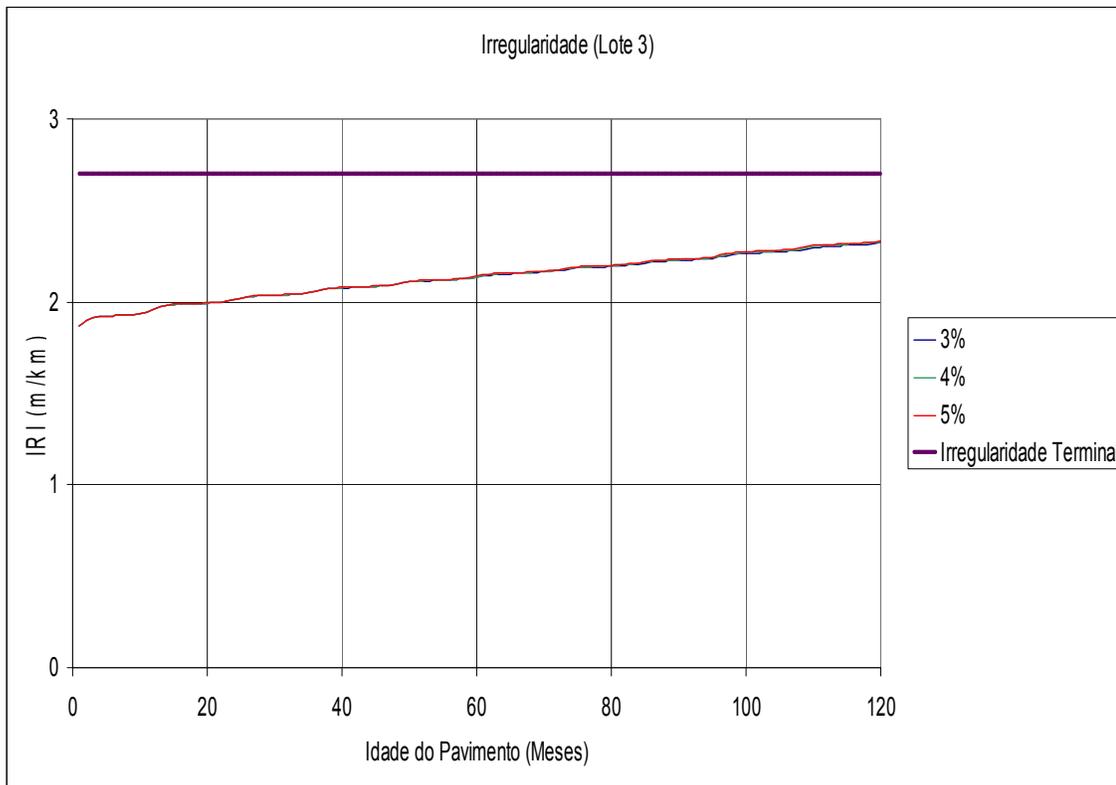


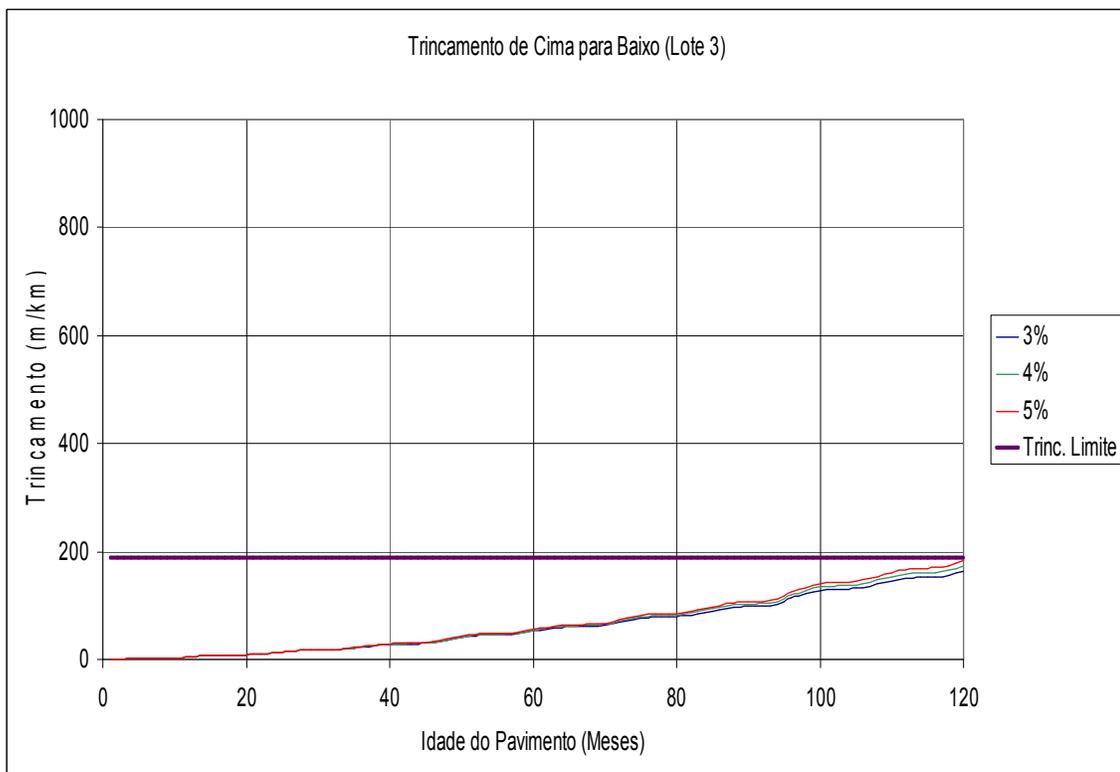
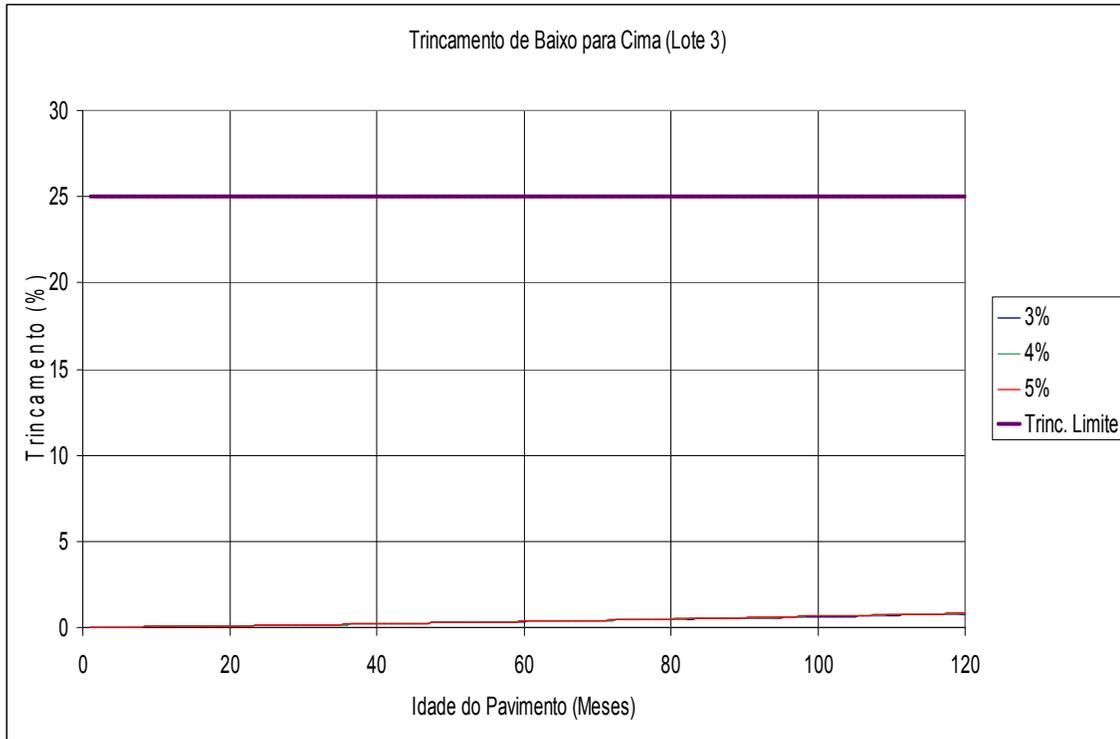


**APÊNDICE B – Gráficos da BR-101 (Lote 3) para Espectros de Carga e
Fatores de Crescimento de Tráfego variados**









**APÊNDICE C – Gráficos da BR-290 (trecho estudado) Fatores de
Crescimento de Tráfego variados**

