

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

Mariana Bianchin Pires

**PAVIMENTOS FLEXÍVEIS BRASILEIROS:
ANÁLISE DO DESEMPENHO SOB EXCESSO DE CARGAS**

Porto Alegre
dezembro 2014

MARIANA BIANCHIN PIRES

**PAVIMENTOS FLEXÍVEIS BRASILEIROS:
ANÁLISE DO DESEMPENHO SOB EXCESSO DE CARGAS**

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 2014

MARIANA BIANCHIN PIRES

**PAVIMENTOS FLEXÍVEIS BRASILEIROS:
ANÁLISE DO DESEMPENHO SOB EXCESSO DE CARGAS**

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, dezembro de 2014

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pelo PPGE/UFGRS
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFGRS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Eng. André Luiz Bock
Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFGRS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

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

Dedico este trabalho aos meus pais, pois sem seus esforços e constante amor e compreensão nada do que conquisei seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador Prof. Washington Núñez, por sua atenção e contribuição a este trabalho, proporcionando-me grandes aprendizados. Agradeço-o, ainda, por ser o responsável por despertar o meu interesse na área de Pavimentação e Geotecnia, pois foi meu professor em Terraplenagem e Pavimentação, apresentando-me essa área fascinante.

Agradeço à Profa. Carin Schmitt pela paciência e dedicação com que ajuda os alunos, fazendo com que atinjam a qualidade desejada de um trabalho de conclusão.

Agradeço também aos demais professores da UFRGS, principalmente os que me acompanharam nas etapas finais quando fiz minhas cadeiras eletivas, por todo o conhecimento transmitido e inspiração despertada através de suas experiências e grande sabedoria.

Agradeço à minha mãe, Mari Bianchin, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos de angústia e de indecisão, com carinho e palavras fortalecedoras que me permitiram vencer meus medos e atingir meus objetivos com êxito. Não existem palavras suficientes para explicar esse amor imenso que me inspira todos os dias para um contínuo aprimoramento de quem sou.

Agradeço ao meu pai, Paulo Pires, que sempre me cobrou o melhor, pois acreditava que eu era a melhor. Por seu amor incondicional e por seu apoio em todas as hipóteses de profissões que surgiam em minha mente desde pequena. Por ter sido um homem forte e ao mesmo tempo generoso com todos que o rodeavam, sendo assim eternamente amado por seus conhecidos.

Agradeço aos meus amigos, principalmente a Paula Pigatto, que é meu presente da Engenharia Civil, pois além de colega dedicada e atenciosa que me ajudou em todas as cadeiras da faculdade, sempre foi uma amiga para todos os momentos e hoje já é uma irmã da qual me orgulho muito.

Agradeço à toda a minha família e ao meu namorado, Bruno de Campos, por sua paciência e compreensão, ajudando continuamente em tudo o que puderam nessa fase de conclusão do curso.

O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas
serem o que são.

Aristóteles

RESUMO

Para o dimensionamento de pavimentos são considerados parâmetros de tráfego, sendo a carga máxima aplicada por eixo um dos principais. Quando o pavimento é solicitado por um carregamento superior ao considerado no projeto, ocorrem danos prematuros que afetam a qualidade ao rolamento e o funcionamento adequado das rodovias. Considerando isso, no presente trabalho se analisou duas estruturas de pavimentos flexíveis representativas de cada região brasileira solicitadas pela carga legal e por valores excedentes a essa, variando-se o tipo de eixo que a está transmitindo e a espessura do revestimento asfáltico dessas. No Brasil o principal mecanismo de degradação de pavimentos flexíveis é o trincamento por fadiga das camadas asfálticas, que é causado pela repetição de ciclos de carregamento e descarregamento, portanto esse foi o mecanismo de degradação considerado na análise dos efeitos da carga no desempenho de pavimentos típicos do país. A partir da revisão bibliográfica e de consultas a especialistas, escolheram-se os materiais das camadas de cada estrutura que melhor representavam as regiões, estimando seus módulos de resiliência também através de bibliografia. O programa EverStress FE foi empregado para simular a aplicação de cargas em pavimentos, podem-se selecionar as propriedades da estrutura e as magnitudes das cargas de eixo. Calculou-se, assim, as deformações geradas nas estruturas. Esses resultados aplicados em um modelo de vida de fadiga possibilitaram a análise da degradação ocorrida em cada estrutura em função do nível de carga. Como resultado secundário, analisou-se o efeito do aumento da espessura da camada asfáltica nesse processo, assim como o efeito do tipo de eixo através do qual a carga é aplicada. Comparou-se, ainda, os resultados obtidos pelo eixo padrão com um eixo simples de rodas duplas com diversos carregamentos, podendo analisar-se a relação do fator de equivalência de carga. Em adição, observou-se a reação gerada pelo aumento da tolerância do excesso de carga de 7,5% para 10%. Com essas análises, conclui-se que o excesso de carga aplicado diminuiu consideravelmente a vida de fadiga, chegando, em certos casos, a 33% do valor inicial. Contudo, esse efeito depende significativamente da estrutura do pavimento, suas espessuras e seus materiais de camadas. Os resultados explicitam a gravidade do efeito do excesso de carga em pavimentos flexíveis, trazendo, assim, a questão da adequação dos projetos, pavimentos com maior capacidade de carga, ou aumento de alternativas para o setor de transportes.

Palavras-chave: Pavimentos Flexíveis. Excesso de Carga.
Vida de Fadiga.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da pesquisa.....	19
Figura 2 – Estrutura de um pavimento flexível.....	22
Figura 3 – Tensão e deformações ocorridas em um pavimento flexível.....	23
Figura 4 – Variação das deflexões com a espessura efetiva do revestimento existente....	25
Figura 5 – Deformada e raio de curvatura.....	26
Figura 6 – Gráfico do módulo de resiliência versus a tensão confinante em solos granulares.....	28
Figura 7 – Estágios do processo de fadiga.....	31
Figura 8 – Camadas apresentadas no programa Everstress FE.....	39
Figura 9 – Estrutura 1 representativa da região Sul.....	48
Figura 10 – Estrutura 2 representativa da região Sul.....	50
Figura 11 – Gráfico do módulo de resiliência contra tensões desvios de solos argilosos e siltosos.....	51
Figura 12 – Estrutura 3 representativa da região Sudeste.....	53
Figura 13 – Estrutura 4 representativa da região Sudeste.....	55
Figura 14 – Estrutura 5 representativa da região Centro-Oeste.....	57
Figura 15 – Estrutura 6 representativa da região Centro-Oeste.....	59
Figura 16 – Gráfico de módulo de resiliência contra tensão desvio com energia modificada.....	60
Figura 17 – Estrutura 7 representativa da região Norte.....	62
Figura 18 – Estrutura 8 representativa da região Norte.....	63
Figura 19 – Estrutura 9 representativa da região Nordeste.....	65
Figura 20 – Estrutura 10 representativa da região Nordeste.....	66
Figura 21 – Parâmetros de geometria e propriedades das camadas no EverStress FE.....	67
Figura 22 – Parâmetros de carga aplicada no EverStress FE.....	68
Figura 23 – Saída em gráfico 2D no EverStress FE.....	69
Figura 24 – Saída gráfica e numérica no EverStress FE.....	69
Figura 25 – Gráficos da vida de fadiga versus carga aplicada por ESRS para revestimento de 5 cm.....	74
Figura 26 – Gráficos da vida de fadiga versus carga aplicada por ESRD para revestimento de 5 cm.....	75
Figura 27 – Gráficos da vida de fadiga versus carga aplicada por ESRS para revestimento de 10 cm.....	76
Figura 28 – Gráficos da vida de fadiga versus carga aplicada por ESRD para revestimento de 10 cm.....	77

Figura 29 – Gráficos da vida de fadiga versus carga aplicada por ESRS para revestimento de 15 cm.....	78
Figura 30 – Gráficos da vida de fadiga versus carga aplicada por ESRD para revestimento de 15 cm.....	79
Figura 31 – Gráficos da vida de fadiga versus carga aplicada por ESRS para revestimento de 20 cm.....	80
Figura 32 – Gráficos da vida de fadiga versus carga aplicada por ESRD para revestimento de 20 cm.....	81
Figura 33 – Gráficos de vida de fadiga versus carga aplicada por estrutura.....	83
Figura 34 – Gráficos da vida de fadiga carga aplicada por ESRD na estrutura 5 com suas linhas de tendência e respectivas equações.....	86
Figura 35 – Gráficos da vida de fadiga carga aplicada por ESRD na estrutura 10 com suas linhas de tendência e respectivas equações.....	86
Figura 36 – Comparação do aumento no excesso de carga legal em relação a vida de fadiga.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fatores que afetam a rigidez e o comportamento à fadiga de concretos asfálticos.....	32
Quadro 2 – Classificação dos veículos.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Camadas e espessuras definidas como padrão para as estruturas.....	42
Tabela 2 – Cargas aplicadas por tipo de eixo.....	43
Tabela 3 – Simulação das tensões através da equação de Boussinesq considerando diferentes espessuras de revestimento.....	45
Tabela 4 – Tensões desvio e confinantes geradas pela equação de Boussinesq.....	46
Tabela 5 – Módulos de resiliência de solos arenosos da região Sul (Lapav).....	47
Tabela 6 – Módulos de resiliência de solos arenosos da região Sul.....	47
Tabela 7 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Sul.....	49
Tabela 8 – Módulos de resiliência de BGS da região Sul (Lapav).....	49
Tabela 9 – Módulos de resiliência de BGS da região Sul.....	49
Tabela 10 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Sudeste.....	51
Tabela 11 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Sudeste provenientes de Minas Gerais.....	52
Tabela 12 – Módulos de resiliência de areias argilas lateríticas da região Sudeste.....	52
Tabela 13 – Módulos de resiliência de solos arenosos da região Sudeste.....	53
Tabela 14 – Módulos de resiliência de BGS da região Sudeste.....	54
Tabela 15 – Módulos de resiliência de solos argilosos do Brasil.....	56
Tabela 16 – Módulos de resiliência de macadame hidráulico do Brasil.....	56
Tabela 17 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Centro-Oeste.....	56
Tabela 18 – Módulos de resiliência de solos arenosos da região Centro-Oeste.....	57
Tabela 19 – Módulos de resiliência de solos arenosos do Brasil.....	58
Tabela 20 – Módulos de resiliência de pedregulhos lateríticos do Brasil.....	58
Tabela 21 – Módulos de resiliência de pedregulhos lateríticos da região Norte.....	61
Tabela 22 – Módulos de resiliência de pedregulhos lateríticos.....	61
Tabela 23 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Norte.....	63
Tabela 24 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Nordeste.....	64
Tabela 25 – Módulos de resiliência de solo-brita da região Nordeste.....	64
Tabela 26 – Módulos de resiliência de solo arenoso da região Nordeste.....	66
Tabela 27 – Variáveis do modelo de vida de fadiga do método mecanístico da Republica da África do Sul.....	72

LISTA DE SIGLAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

AM - Amazonas

BGS – Brita Graduada Simples

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

Contran – Conselho Nacional de Trânsito

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ESRS – Eixo Simples de Rodas Simples

ESRD – Eixo Simples de Rodas Duplas

FEC – Fator de Equivalência de Carga

Lapav – Laboratório de Pavimentação

MR - Módulo de Resiliência

RS - Rio Grande do Sul

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USACE - US Army Corps of Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

MR – módulo de resiliência

σ – tensão

ϵ –deformação

σ_3 – tensão confinante

N – número de repetições de carregamento até o começo do trincamento

ϵ_t – máxima deformação específica de tração

k – constante em função da rigidez e do teor asfáltico

Nf – vida de fratura

Ns – vida de serviço

Np, Ni – número de aplicação de carga de eixo

Ci, Cp – carga de eixo

n – constante em função da rigidez e do teor asfáltico

ν – coeficiente de Poisson

σ_d – tensão-desvio

σ_0 – pressão do pneu

p_{pneu} – pressão do pneu

a – raio de atuação da carga

z – profundidade de análise

C_{roda} – carga por roda

θ – soma das tensões principais

p_{atm} – pressão atmosférica

ε_{xx} – tensões normais no eixo x

ε_{yy} – tensões normais no eixo y

Nf – vida de fadiga

ε_h – tensão horizontal

A, B – variáveis dependentes do módulo de resiliência e da classe da rodovia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	17
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA.....	17
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	17
2.2.1 Objetivo Principal.....	17
2.2.2 Objetivos Secundários.....	17
2.3 PREMISSA.....	18
2.4 DELIMITAÇÕES.....	18
2.5 LIMITAÇÕES	18
2.6 DELINEAMENTO.....	18
3 MECÂNICA ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	21
3.1 ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	21
3.2 TENSÕES E DEFORMAÇÕES OCORRIDAS NOS PAVIMENTOS.....	23
3.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	26
3.4 DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	28
3.4.1 Fadiga.....	29
3.4.2 Vida de Fadiga.....	31
4. APLICAÇÃO DE CARGAS EM PAVIMENTOS E FATORES RELEVANTES.....	33
4.1 TIPOS DE EIXOS DE VEÍCULOS DE CARGA.....	33
4.2 EXCESSO DE CARGA APLICADA AOS PAVIMENTOS.....	35
4.3 FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA.....	36
4.4 PROGRAMA EVERSTRESS FE.....	38
5. OBTENÇÃO DE DADOS E CÁLCULO DAS DEFORMAÇÕES.....	40
5.1 ESTRUTURAS REPRESENTATIVAS DE CADA REGIÃO.....	40
5.1.1 Parâmetros Gerais das Estruturas.....	41
5.1.2 Módulo de Resiliência e Definição das Estruturas.....	43
5.1.2.1 Estruturas Representativas da Região Sul.....	46
5.1.2.1.1 Estrutura 1.....	46
5.1.2.1.2 Estrutura 2.....	48
5.1.2.2 Estruturas Representativas da Região Sudeste.....	50
5.1.2.2.1 Estrutura 3.....	50
5.1.2.2.2 Estrutura 4.....	53

5.1.2.3 Estruturas Representativas da Região Centro-Oeste.....	55
5.1.2.3.1 Estrutura 5.....	55
5.1.2.3.2 Estrutura 6.....	57
5.1.2.4 Estruturas Representativas da Região Norte.....	59
5.1.2.4.1 Estrutura 7.....	59
5.1.2.4.2 Estrutura 8.....	62
5.1.2.5 Estruturas Representativas da Região Nordeste.....	63
5.1.2.5.1 Estrutura 9.....	64
5.1.2.5.2 Estrutura 10.....	65
5.2 CÁLCULO DE DEFORMAÇÕES PELO PROGRAMA EVERSTRESS FE.....	67
6. APLICAÇÃO DO MODELO DE VIDA DE FADIGA E ANÁLISE DE	71
RESULTADOS.....	
6.1 MODELO DE VIDA DE FADIGA.....	71
6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	72
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE A.....	94
APÊNDICE B.....	103

1 INTRODUÇÃO

Os estudos sobre pavimentos revelam que o excesso de carga é um dos principais fatores que prejudicam as rodovias. A economia no Brasil tem crescido consideravelmente nos últimos anos e um dos setores que vem se destacando é o agrícola. Junto com a produção de alimentos, vem a necessidade de transportar essa carga. Bernucci et al. (2008, p. 20) afirmam que:

[...] os bens produzidos no país podem ser mais competitivos na fase de produção, mas perdem competitividade, notadamente, no quesito infraestrutura de transportes, devido a uma matriz modal deficiente, onde as estradas (principal meio de escoamento da produção nacional) encontram-se em estado tal que não são capazes de atender as necessidades de transporte de carga nacionais.

O Conselho Nacional de Trânsito – Contran – tem resoluções que determinam o comprimento, o peso de rodagem e o excesso desse permitido nas rodovias brasileiras, entretanto muitos veículos chegam a ter uma carga por eixo 50% maior que a carga legal. Além da falta de fiscalização, a baixa conscientização dos produtores tem sido um grande problema, pois, ao transportar um carregamento com grande excesso de carga, gera danos não previstos aos pavimentos. Com isso, ocorrem consequências que atingem tanto ao Estado, sendo o encarregado de corrigir imperfeições das estradas, quanto aos produtores, os quais tem maior custo de manutenção de seus veículos para transportar seus produtos. As rodovias no Mato Grosso são bons exemplos de como isso acontece. Segundo Schwenk e Cruz (2008, p. 501), referindo-se a exploração agrícola e economia nacional, “Das regiões brasileiras, a de maior crescimento é o centro-oeste [...]”. Em consequência disso, várias cidades foram fundadas nas proximidades das estradas já existentes, implantando um fluxo de cargas pesadas que não foi considerado anteriormente para os pavimentos, lhes causando grandes danos.

Diferentes estudos mostram que um dos métodos de avaliar a durabilidade de um pavimento flexível é através da fadiga gerada pelo processo de cargas cíclicas que resulta em diversos danos, como, o chamado, couro de jacaré. A vida de fadiga pode ser definida como sendo o número de repetições do carregamento necessário para levar o pavimento à ruptura ou apenas

para reduzir o valor da rigidez de flexão do revestimento para a metade do inicial, comenta Baburamani (1999) mencionando que o melhor meio seria pela primeira consideração.

A proposta deste trabalho é avaliar o desempenho de pavimentos flexíveis representativos das regiões brasileiras mediante condições de excesso de carga tendo em vista seus materiais e suas espessuras. A partir do parâmetro vida de fadiga analisou-se, com o auxílio de meios computacionais, a relação entre o excesso de carga e o surgimento e progresso de defeitos nas vias, podendo também observar o efeito causado pelo tipo de eixo que aplica essa carga como também o da espessura da camada de revestimento desses pavimentos flexíveis. Considerando que o método de fator de equivalência de carga também é muito utilizado no Brasil, comparou-se o efeito causado pelo eixo padrão com o causado por eixos simples de rodas duplas com diferentes carregamentos. Em adição, observou-se os efeitos gerados pelo atual aumento do excesso de carga permitido de 7,5% para 10%.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual o efeito sobre a vida de fadiga gerado pela aplicação de diversas cargas acima do limite legal em pavimentos flexíveis representativos das regiões brasileiras?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é a avaliação do efeito sobre a vida de fadiga gerado pela aplicação de diversas cargas acima do limite legal por diferentes tipos de eixos em pavimentos flexíveis, considerando as estruturas representativas da região Sul, Sudeste, Norte, Nordeste e Centro-Oeste tendo em vista seus materiais e suas espessuras.

2.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) a avaliação da influência da espessura da camada de revestimento sobre a variação da vida de fadiga, quando esse é submetido à aplicação de uma carga;
- b) a avaliação da influência do tipo de eixo que aplica uma carga a um pavimento flexível sobre a variação da vida de fadiga;
- c) a análise do fator de equivalência de carga considerando diferentes estruturas sob aplicação de diferentes cargas;
- d) a análise do efeito gerado pelo aumento da tolerância do excesso de carga de 7,5% acima da legal para 10%.

2.3 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que os veículos de carga têm transportado carregamentos excessivos por tipo de eixo, sendo isso um dos principais motivos para a grande deterioração dos pavimentos atualmente.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a analisar duas estruturas de pavimentos flexíveis de cada região do Brasil com variação da carga aplicada e do tipo de eixo do veículo.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

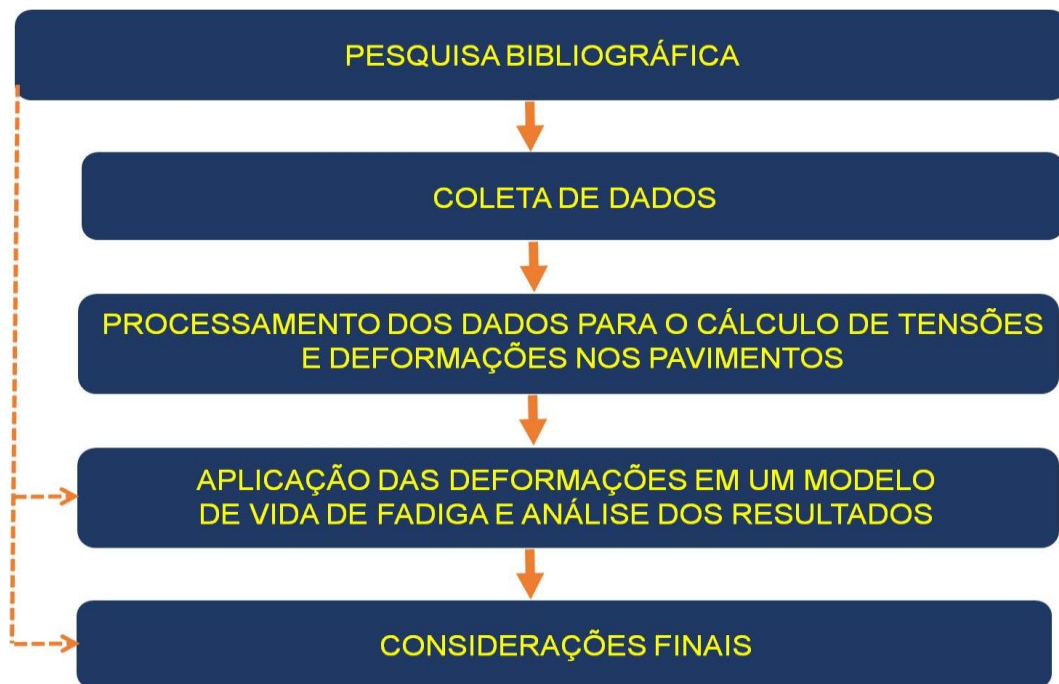
- a) o uso do programa computacional, Everstress FE, para definir as tensões e deformações, o qual considera cargas estáticas;
- b) a análise feita de duas estruturas de cada região devido ao número de dados processados;
- c) o módulo de resiliência estimado através de bibliografias, pois não foi possível examiná-los em ensaios de laboratório;
- d) a aplicação de carga feita através de eixos simples.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) coleta de dados;
- c) processamento dos dados para o cálculo de tensões e deformações nos pavimentos;
- d) aplicação dos resultados em um modelo de vida de fadiga;
- e) considerações finais.

Figura 1 – Etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

A primeira etapa do trabalho, composta pela **pesquisa bibliográfica**, se prolongou ao longo dele com a finalidade de dar suporte teórico e legislativo a pesquisa em questão. Para isso, foram consultadas diversas publicações e legislações sobre o tema em estudo.

Na segunda etapa, foi feita a **coleta de dados** através de pesquisas e consulta a especialistas, que possuem conhecimentos de diversos projetos executados e dos materiais mais utilizados, a fim de se obter as espessuras e os materiais que representam cada região do Brasil.

Com a etapa anterior concluída, pôde-se começar o **processamento dos dados para o cálculo de tensões e deformações nos pavimentos**, na qual se utilizou o programa computacional Everstress FE no qual os dados de cada estrutura representativa são os dados de entrada. Assim, após os devidos ajustes, esse programa simulou a aplicação de cargas de diversas magnitudes por diferentes tipos de eixo ao pavimento, a fim de obter as tensões e deformações causadas por esse processo.

A quarta etapa foi a **aplicação das deformações em um modelo de vida de fadiga e análise dos resultados** na qual se interpretou os dados obtidos pelo programa computacional e se aplicou os mesmos no modelo de vida de fadiga escolhido, podendo, assim, analisar os resultados obtidos.

Por último, teve a etapa das **considerações finais**. Com os números gerados pelo método da vida de fadiga, pôde-se concluir qual o efeito nesse parâmetro causado pelo excesso de carga em um pavimento flexível, revelando o quão danoso o carregamento excessivo pode ser para as rodovias. Concluiu-se também, o efeito gerado pelo tipo de eixo que aplica a carga e também da espessura da camada de revestimento em relação a esse parâmetro. Comparou-se, ainda, os efeitos causados pelo eixo padrão podendo assim analisar os fatores de equivalência de carga. Como análise final, observou-se os efeitos gerados pelo aumento da tolerância de excesso de 7,5% para 10%.

3 MECÂNICA ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Para poder estudar as imperfeições geradas nos pavimentos é necessário compreender sua estrutura e seus parâmetros. A seguir, explica-se a sua função e a sua composição, como também as tensões e deformações geradas pela aplicação de carga que permitem entender como esse processo funciona. Associado a isso vem o módulo de resiliência, propriedade dos materiais que influencia diretamente o comportamento das camadas do pavimento, principalmente entre as interfaces dessa estrutura.

Compreendendo a parte funcional de um pavimento flexível, pode-se verificar como alguns processos o afetam, como a fadiga, que é uma das grandes causas de deterioração em revestimentos asfálticos. Para a avaliação dessas imperfeições que ocorrem nas rodovias, é preciso ter um parâmetro de análise. A vida de fadiga vem sendo muito utilizada para esse fim, sendo então explicada nesse capítulo.

3.1 ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL

Garcia (2010, p. 23) define pavimento como “[...] um sistema composto por múltiplas camadas de diferentes espessuras, projetadas especialmente para suportarem os esforços oriundos do tráfego e as ações climáticas.”. Bernucci et al. (2008) complementam que essa estrutura fica posicionada a cima da terraplenagem finalizada e relembram que um pavimento serve também para melhorar o conforto, a segurança e as condições de rolamento para o usuário.

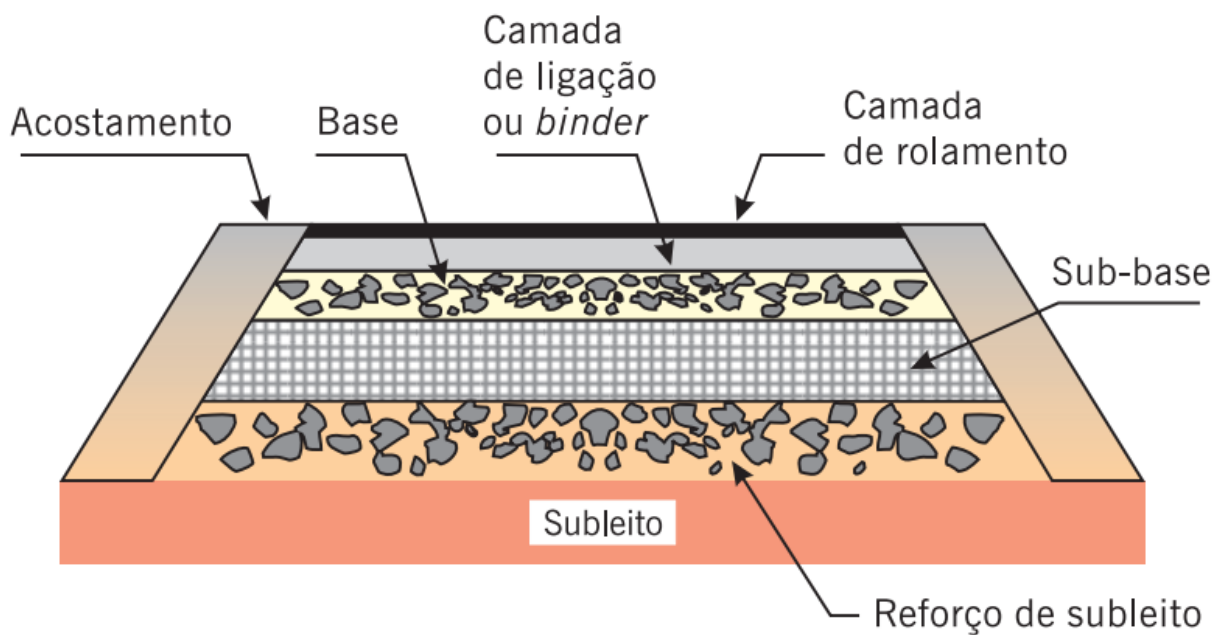
Também, conforme colocado por Bernucci et al.(2008), um pavimento é considerado asfáltico quando sua mistura é constituída por agregados e ligantes asfálticos em sua maior parte. Esse tipo de estrutura também é conhecido como pavimento flexível, pois, segundo Garcia (2010), o que faz ela ser flexível é o fato de ter, sobre uma base granular, um revestimento betuminoso. Assim sendo, o mesmo autor cita as camadas que constituem um pavimento flexível, o qual é representado na figura 2:

- a) o subleito que é um material consolidado ou compactado que serve como fundação para a estrutura;

- b) o reforço do subleito o qual é usado para reforçar esse terreno anteriormente descrito, diminuindo as pressões transmitidas para ele;
- c) a sub-base que complementa a base deixando assim o custo menor e facilitando a execução;
- d) a base a qual alivia as tensões transmitidas pelo tráfego para as camadas inferiores;
- e) o revestimento que é uma camada impermeável e mais nobre que as restantes, pois recebe de forma direta os esforços produzidos.

Essa última camada citada, o revestimento asfáltico, pode ser dividida em duas ou mais, tendo sempre uma parte em contato com o pneu diretamente, chamada camada de rolamento, e outra denominada *binder* que é uma camada intermediária ou de ligação (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 2 – Estrutura de um pavimento flexível



(fonte: BERNUCCI et al., 2008)

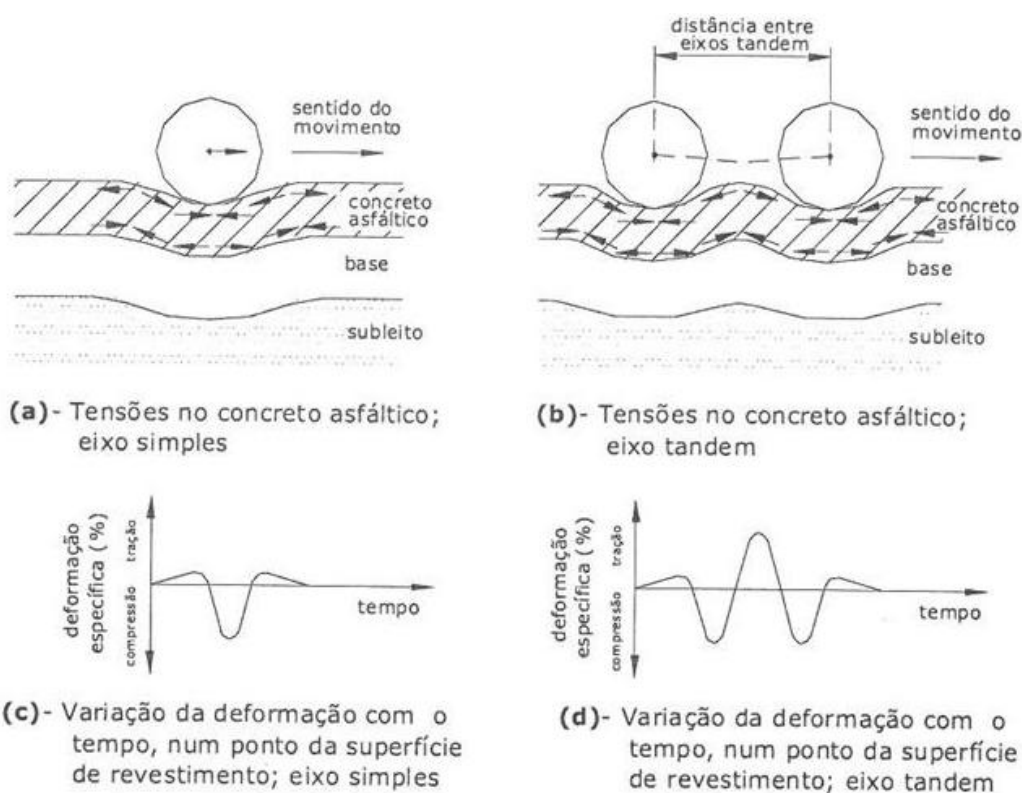
Quanto à resposta do pavimento em relação à aplicação de carga, Pinto e Preussler (2001, p. 11) explicam que “[...] todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.”. Já em relação à distribuição transversal da pista, Medina e Motta (2005) colocam que praticamente não há grande diferenciação.

3.2 TENSÕES E DEFORMAÇÕES OCORRIDAS NOS PAVIMENTOS

Pinto e Preussler (2001, p. 69) escrevem que “A ação das cargas de tráfego sobre os pavimentos flexíveis e semi-rígidos provoca deformações dos tipos permanentes e recuperáveis.”. Explicam, também, que, ao se cessar uma carga aplicada, as deformações permanentes são as que continuam presentes e as recuperáveis são as que deixam de existir. Um dos métodos para prever as tensões e deformações de um pavimento é a Teoria da Elasticidade, citam Pinto e Preussler (2001), pois as deformações ocorridas nele tem caráter instantâneo e recuperável.

Medina e Motta (2005) comentam que os pavimentos flexíveis são solicitados à flexão quando uma carga de eixo é repetida diversas vezes sobre eles, o que desencadeia um processo de trincamento, muitas vezes iniciado de baixo para cima, até emergir na superfície. Por esse motivo Pinto e Preussler (2001) relatam que, quando se calcula o número N, deve-se levar em conta as deformações elásticas. As tensões e deformações geradas ficam melhores exemplificadas com a figura 3.

Figura 3 – Tensão e deformações ocorridas em um pavimento flexível



(fonte: MEDINA; MOTTA, 2005)

Diversos parâmetros influenciam na magnitude das deformações de natureza transitória nos pavimentos, dentre eles o Departamento Nacional de Estrada de Rodagem (1998) lista a geometria do carregamento, valor da carga, pressão dos pneus e até mesmo o ponto de medida em relação à carga. Há também uma relação entre a deflexão e a espessura efetiva do revestimento conforme mostrado por Preussler (1983) no gráfico da figura 4, que apresenta o solo I na terceira camada com presença menor ou igual a 35% de silte.

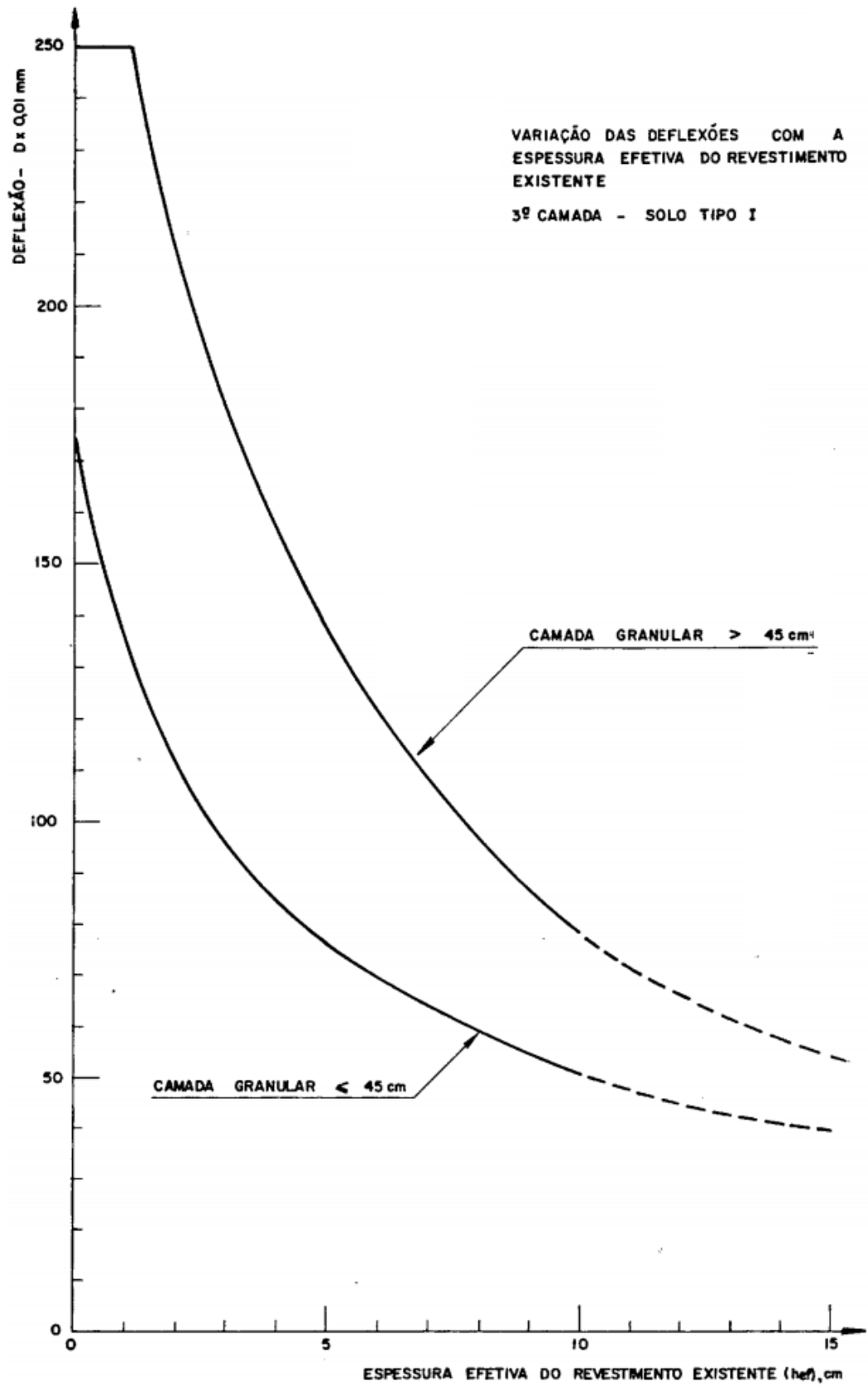
Ao aplicar uma carga em um pavimento, dependendo do tipo de eixo que está transmitindo, uma bacia de deformação é formada nas proximidades da deformação recuperável tendo sua área elipsoidal com a maior dimensão no sentido do tráfego (PINTO; PREUSSLER, 2001). A partir dessa bacia, obtêm-se, através de uma seção longitudinal, a deformada que está representada na figura 5 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM, 1998).

Na deformada, pode-se verificar a deflexão máxima recuperável (d) e o arqueamento, sendo que esses podem apresentar diferentes valores, levando essa curva a ser um parâmetro importante para avaliação estrutural segundo Pinto e Preussler (2001).

Pinto e Preussler (2001, p. 77) conceituam que “A deflexão recuperável máxima é um indicativo do comportamento global da estrutura, sendo afetada pelo subleito e pelas camadas constituintes do pavimento.”. Uma proporcionalidade linear, expõe Albano (1998), estabelece a relação entre deflexão recuperável e a carga por eixo.

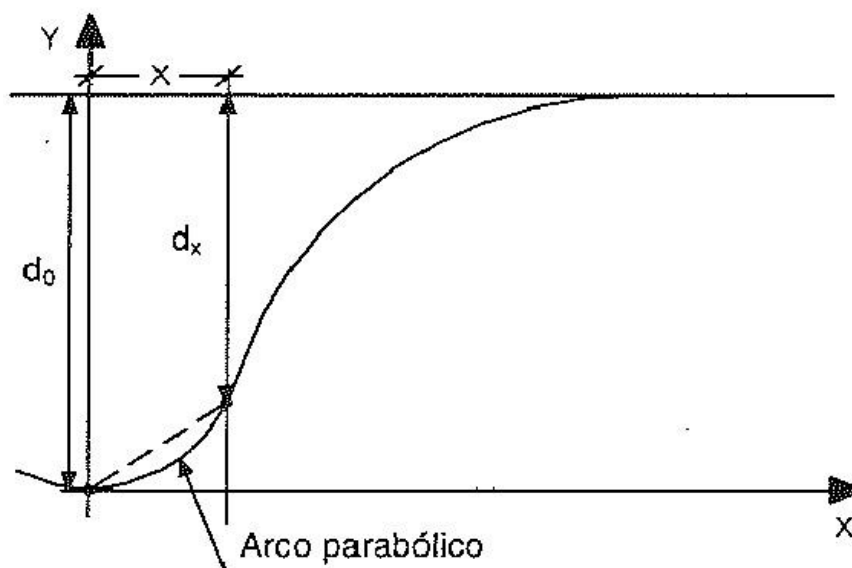
Com os parâmetros de módulo de resiliência, de critério de fadiga e de deformações permanentes, Bernucci et al. (2008) afirmam que a deflexão admissível de um pavimento pode ser determinada. Pinto e Preussler (2001) reforçam essa colocação quando apontam que a definição dessa deflexão depende da estrutura do pavimento e das suas características elásticas de suas camadas.

Figura 4 – Variação das deflexões com a espessura efetiva do revestimento existente



(fonte: PREUSSLER, 1983)

Figura 5 – Deformada e raio de curvatura



(fonte: PINTO; PREUSSLER, 2001)

Outro parâmetro que depende diretamente das características elásticas é o raio de curvatura, porém apenas na camada de revestimento e de base. Assim, Pinto e Preussler (2001) apontam a relação que, quando um pavimento tem um baixo raio de curvatura, o módulo de elasticidade desse também tem pequenos valores. O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998) define que, em concretos asfálticos, um raio de curvatura, sendo menor que 100 m, deve ser motivo de análise mais profunda.

As tensões e deformações sofridas pela camada asfáltica através do carregamento acabam gerando danos como o trincamento por fadiga, conforme indicado por Bernucci et al. (2008).

3.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Segundo Severi et al. (1999), um material consegue armazenar uma determinada energia de deformação, sendo esta uma importante característica estrutural do mesmo, pois, quando um carregamento é aplicado nele, ocorre um registro das deformações ocorridas. A partir dessa teoria, no século XIX, surge a expressão módulo de elasticidade, também conhecida como módulo de Young, baseando-se na Teoria da Elasticidade. O mesmo autor menciona também que:

[...] tal terminologia foi empregada na resistência dos materiais durante anos, quando se tratava, por exemplo, na engenharia civil, de caracterização de aços e concretos, geralmente solicitados por carregamentos estáticos; observe-se que tais materiais

apresentam características relacionadas à deformabilidade bastante conhecidas e peculiares porquanto tais deformações são de magnitude muito pequena (por exemplo, a deformação de ruptura típica do concreto é de 2,5 ‰, ou seja, 0,0025 mm/mm).

Medina e Motta (2005) registram que o engenheiro F. N. Hveem concluiu que as deformações em materiais de pavimentação destoam das de materiais convencionais que um engenheiro lida, pois nos pavimentos são muito superiores. A partir disso, Bernucci et al. (2008, p. 291) colocam que, em 1930, Hveem definiu resiliência como sendo a “[...] energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações.”. Severi et al. (1999) complementam que o mesmo engenheiro também criou o termo módulo de resiliência que é expresso pela equação:

$$MR = \sigma / \epsilon \quad \text{(equação 1)}$$

Onde:

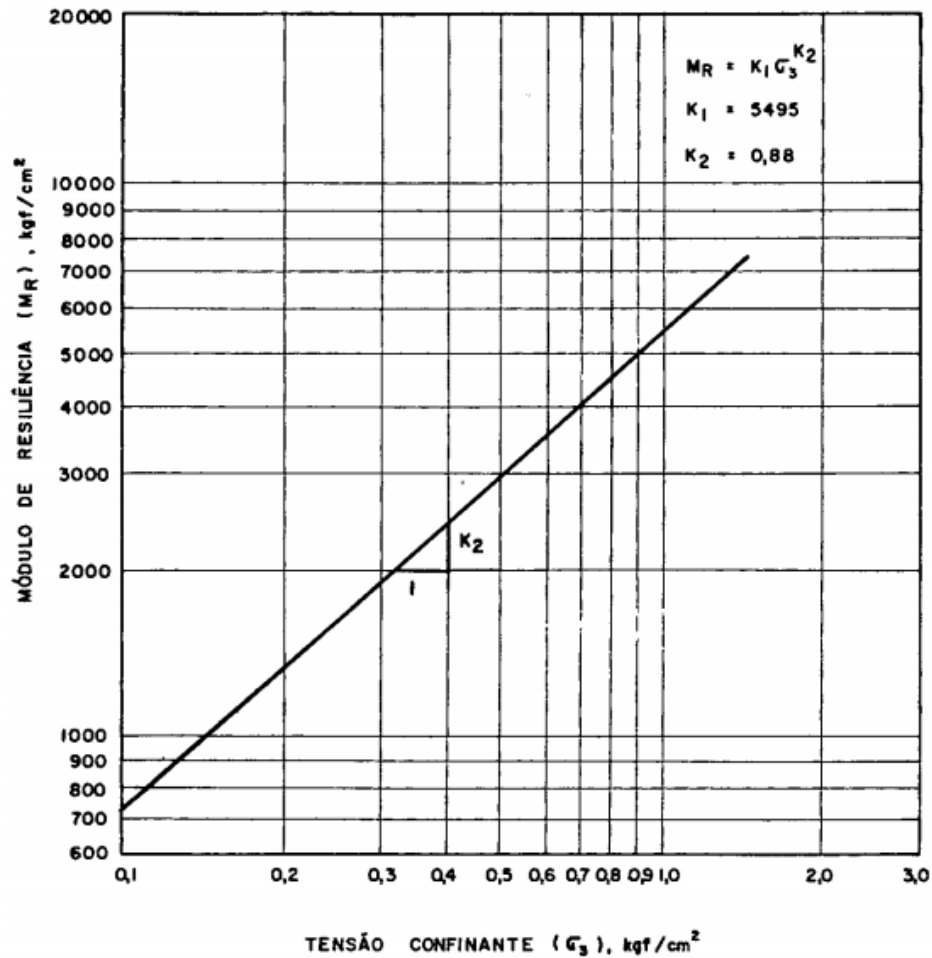
σ = tensão sofrida pelo material;

ϵ = deformação correspondente a tensão.

Um dos elementos que afetam o módulo de resiliência dos concretos asfálticos e das outras misturas betuminosas é a temperatura de serviço, pois são termo-suscetíveis como os cimentos asfálticos empregados (SEVERI et al., 1999). Já os materiais granulares são dependentes da tensão de confinamento que é diretamente proporcional ao seu módulo de resiliência, como se constata na figura 6, e inversamente proporcional a deformação, relata Severi et al. (1999). O mesmo autor aponta que a resiliência dos solos finos, diferente do material anterior, é dependente da tensão-desvio tendo uma relação inversa.

Sobre o comportamento das deformações resilientes, Preussler (1983) destaca que elas são elásticas, todavia não variam linearmente com as tensões aplicadas, uma vez que dependem de fatores que não estão incluídos na Teoria da Elasticidade. Pinto e Preussler (2001, p. 86) reafirmam as colocações anteriores quando relatam que “As deformações resilientes são elásticas no sentido de serem recuperáveis, porém não necessariamente lineares. O módulo resiliente dos materiais granulares é função crescente da tensão de confinamento (σ_3) que decresce com a profundidade do ponto considerado.”.

Figura 6 – Gráfico do módulo de resiliência versus a tensão confinante em solos granulares



(fonte: PREUSSLER, 1983)

Com base nos estudos feitos por Preussler (1983), pode-se ter uma ordem de grandeza do módulo de resiliência (M_R) para alguns materiais, sendo eles os seguintes:

- revestimento de camada existente: $M_R = 30.000 \text{ kgf/cm}^2$ com a temperatura (t) de 26° Celsius considerando 1 unidade a mais ou a menos;
- argila vermelha: $M_R = 7.000 \text{ kgf/cm}^2$;
- areia siltosa: M_R é variável em função da tensão confinante (σ_3) (...);
- silte rosa escuro: $M_R = 4.800 \text{ kgf/cm}^2$.

3.4 DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS

Como indicado por Garcia (2010), a ação do tráfego com suas cargas repetitivas é a principal causa de defeitos estruturais em pavimentos flexíveis, levando ao trincamento, ao afundamento ou a deformações permanentes ou elásticas. Esse mesmo autor reforça que a

principal causa de deformações em pavimentos são as cargas por eixo, porém também deve-se analisar a espessura das camadas, os materiais e as condições climáticas.

Os tipos de trincamento que podem ocorrer ficam bem explicados por Diaz et al. (2012, p. 103, tradução nossa):

O trincamento por fadiga se manifesta inicialmente como pequenas ranhuras longitudinais nas vias de circulação, que logo se propagam rapidamente pela superfície do pavimento formando padrões do tipo couro de jacaré. O trincamento superficial por sua vez é o resultado de uma deformação permanente em cada uma das capas que pertencem ao pavimento, e se manifesta como um afundamento canalizado na via de circulação dos veículos.

Garcia (2010) ressalta que, quando as trincas se tornam visíveis na superfície, os danos se tornam maiores, pois possibilitam a penetração de água e o aumento da umidade interna da estrutura.

O Departamento Nacional de Estrada de Rodagem (1998) comenta que, a partir de diferentes pesquisas, o comportamento para o trincamento de misturas asfálticas leva a seguinte equação:

$$N = k \cdot (\epsilon_t)^{-n} \quad \text{(equação 2)}$$

Onde:

N = quantidade de repetições de aplicação da carga até começar o trincamento por fadiga;

ϵ_t = máxima deformação específica de tração gerada pela aplicação de carga no pavimento;

k, n = constantes em função da rigidez e do teor asfáltico do revestimento obtido em laboratório.

A maioria dos tipos de degradação apresentados são formados pelo processo de fadiga, sendo esse item melhor explicado a seguir.

3.4.1 Fadiga

Conforme relatado por Baburamani (1999, p. 2, tradução nossa):

A abordagem mecanística considera fadiga como um processo de deterioração que ocorrem em dois diferentes estágios: começo dos danos (fissuração) e crescimento dos danos. A abordagem da energia dissipada é baseada no conhecimento reológico de materiais viscoelásticos. O desenvolvimento e acumulação de danos é avaliado em termos de energia dissipada por ciclo, mudança na energia dissipada e acúmulo de energia dissipada.

Bernucci et al. (2008) salientam que os danos ocorridos por esse processo de repetição da carga são não-lineares, produzindo em grandezas diferentes a cada ciclo.

Alguns conceitos de fadiga ficam bem definidos por Pinto e Preussler (2001):

- a) ensaio de fadiga: solicitação de um material até que ele chegue ao estado de ruptura ou estável;
- b) duração de vida: quantidade de vezes que uma carga precisa solicitar o pavimento para leva-lo à ruína;
- c) resistência à fadiga: tensão e deformação que estão relacionadas com uma duração de vida.

As ações mecânicas, assim como as térmicas, causam fadiga sendo de grande importância para a definição da vida útil do material, destacam Bernucci et al. (2008). Pinto e Preussler (2001, p. 110) confirmam esses danos, relatando que:

No nosso país, o principal defeito dos pavimentos flexíveis é o trincamento por fadiga do revestimento provocado pela repetição das cargas de tráfego. Por outro lado, a resiliência das camadas granulares é relativamente elevada para baixos níveis de tensões confinantes atuantes, contribuindo bastante para o aumento da deformabilidade elástica e, assim, acelerando o processo de degradação por fadiga dos revestimentos betuminosos [...].

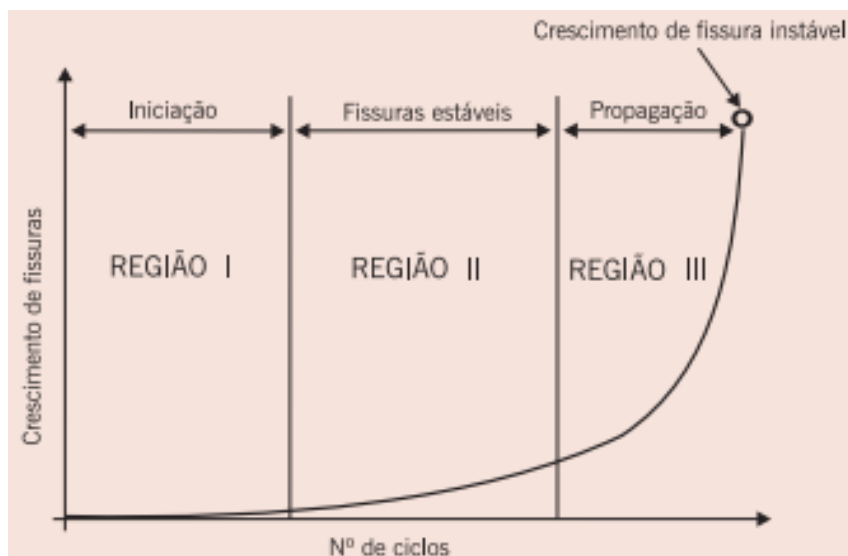
Baburamani (1999, p. 2, tradução nossa) reafirma a colocação acima quando relata que “As características da fadiga do asfalto são, portanto, importantes parâmetros do projeto estrutural do pavimento. A tensão deformação na base da camada de asfalto é assumida no processo mecânico do projeto como sendo o parâmetro que controla a fissuração por fadiga.”.

A figura 7 representa as fases que ocorrem durante um processo de fadiga, sendo essas definidas da seguinte forma por Bernucci et al. (2008):

- a) região I: ocorrem as primeiras transformações, aparecem microfissuras, aumenta a densidade dos deslocamentos e os danos irreversíveis iniciam-se, sendo caracterizada assim pela mudança microestrutural;
- b) região II: as microfissuras acabam gerando as macrofissuras que predominam nessa fase;

- c) região III: a estrutura atinge de forma rápida o colapso, pelo aumento das microfissuras.

Figura 7 – Estágios do processo de fadiga



(fonte: BERNUCCI et al., 2008)

Baburamani (1999) menciona que a reação das misturas asfálticas pode variar quando ocorrem deslocamentos, assim o modo como se aplica a carga acaba influenciando as análises de fadiga no material em questão. Ressalta, também, que se tem desenvolvido diversos testes laboratoriais que avaliam as características da fadiga em revestimentos asfálticos, sendo usadas as deformações, a dissipação de energia ou até os mecanismos de fratura.

Como meio de avaliação do efeito da fadiga nos pavimentos flexíveis usa-se o parâmetro vida de fadiga, o qual é exposto abaixo.

3.4.2 Vida de Fadiga

Preussler (1983) define vida de fadiga através de dois termos distintos, sendo eles a vida de fratura (N_f), a qual representa o número de repetições de carga até atingir a fratura completa do pavimento, e a vida de serviço (N_s) que é o número de aplicações necessário para reduzir a rigidez do pavimento em questão. O autor elenca também os fatores que afetam a vida de fadiga, sendo os mais relevantes:

- a) fatores de carga: magnitude do carregamento, frequência e duração de tempo entre as aplicações de carga, acúmulo de tensões repetidas;

- b) fatores de mistura: propriedades dos agregados;
- c) fatores ambientais: temperatura e umidade;
- d) módulo de resiliência e o índice de vazios.

Baburamani (1999, p. 16, tradução nossa) apresenta também outra definição de vida de fadiga que complementa a informação anterior:

A vida de fadiga de um pavimento de asfalto pode ser definida em função da magnitude do tráfego, expresso como o número de eixos padrões equivalentes [...] que o pavimento pode suportar antes de ocorrer falhas em termos de trincamento em uma certa percentagem da área onde o trilho de roda é observado.

A análise do carregamento pelo tráfego que vai determinar a tolerância quanto ao nível de fissuração, o qual varia entre 10 a 45% segundo Baburamani (1999).

Esse mesmo autor aponta a possível relação empírica entre variáveis da mistura de asfalto, rigidez e vida de fadiga, porém essa ligação era usada para misturas locais nas quais os métodos de ensaios e as condições eram específicos. Hoje em dia, aponta o autor, a vida de fadiga está relacionada com a tensão deformação e com a rigidez de flexão. Analisando alguns fatores que influenciam na rigidez do pavimento e na vida de fadiga, Preussler (1983) apresenta o quadro 1.

Quadro 1 – Fatores que afetam a rigidez e o comportamento à fadiga de concretos asfálticos

FATOR	VARIACÃO DO FATOR	EFEITO DE VARIAÇÃO DO FATOR		
		Na Rigidez	Na vida de fadiga em tensão controlada	Na vida de fadiga em deformação controlada
Penetração do asfalto	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce
Teor de asfalto	Aumenta	Aumenta ^a	Aumenta ^a	Aumenta ^b
Tipo de agregado	Aumenta rugosidade e angularidade	Aumenta	Aumenta	Decresce
Granulometria do agregado	Aberta e densa	Aumenta	Aumenta	Decresce ^d
Índice de vazios	Decresce	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Temperatura	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce

^a Existência de um teor ótimo para a vida de fadiga máxima

^b Poucos estudos

^d Poucos estudos

(fonte: adaptado de PREUSSLER, 1983)

4 APLICAÇÃO DE CARGAS EM PAVIMENTOS E FATORES RELEVANTES

A transmissão das cargas de um veículo para o pavimento se dá através de suas rodas, assim sendo a configuração desse é extremamente importante para a análise de respostas dessa estrutura quando submetida a tensões. Apresenta-se, em vista disso, as configurações e classificações dos veículos.

O excesso de carga é o fator mais prejudicial para as rodovias atualmente. Com isso, um bom conhecimento dos processos que isso gera, assim como as suas consequências, é de grande importância. Com a necessidade de compreender melhor esse mecanismo foram desenvolvidos ensaios e softwares sendo o programa EverStress FE um deles. Conhecendo as reações ocorridas, é necessário utilizar métodos para analisá-los. O fator de equivalência de carga é um dos métodos utilizados no Brasil, onde quantifica a deterioração do pavimento.

Compreendendo a relevância desses tópicos, explicou-se a seguir cada um deles.


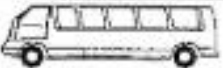





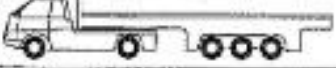
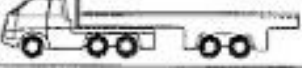
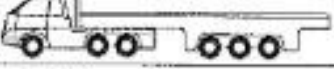
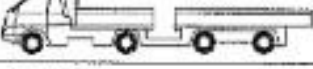

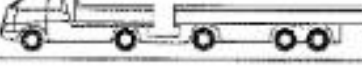
4.1 TIPOS DE EIXOS DE VEÍCULOS DE CARGA

Medina e Motta (2005) trazem no quadro 2 os veículos rodoviários apresentados segundo o DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem). Indicam que esses veículos podem ser classificados conforme listados abaixo:

- a) automóveis;
- b) ônibus;
- c) caminhões leves os quais contem dois eixos simples de rodas simples;
- d) caminhões médios que tem o eixo dianteiro simples de rodas simples e o eixo traseiro simples com rodas duplas;
- e) caminhões pesados apresentando dois eixos sendo o traseiro um tandem duplo;
- f) reboques;
- g) semi-reboques.

Os mesmos autores ressaltam ainda que os dois últimos itens citados utilizam o eixo tandem triplo e estão cada vez mais em uso.

Quadro 2 – Classificação dos veículos

Classe	Símbolo	Configuração	Descrição
1			Automóvel
2	2c		Ônibus
3			Utilitário
4	2c		Caminhão
5	3c		Caminhão
6	2s1		Semi-reboque
7	2s2		Semi-reboque
8	2s3		Semi-reboque
9	3s2		Semi-reboque
10	3s3		Semi-reboque
11	2c2		Reboque
12	4c		Caminhão
13	2c3		Reboque

(fonte: MEDINA; MOTTA, 2005)

De forma resumida, Medina e Motta (2005) apresentam os pesos máximos por eixo permitidos no Brasil. Assim, para os eixos:

- a) simples de rodas simples podem apresentar até 6,0 tf;
- b) simples de rodas duplas são permitidos até 10,0 tf;
- c) tandem duplo tem o limite de 17,0 tf;
- d) tandem triplo são delimitados à 25,5 tf.

Essas cargas estão explicitadas, conforme a Resolução 210 do Contran, posteriormente.

4.2 EXCESSO DE CARGA APLICADA AOS PAVIMENTOS

Albano (1998) destaca que os danos internos são um dos mais importantes nos pavimentos, pois, além da sua difícil percepção, eles podem gerar inúmeros outros defeitos se a estrutura estiver danificada. Explica que o excesso de carga nos veículos faz com que diversos problemas ocorram antecipadamente, e que esses efeitos indesejáveis podem ser tanto a deterioração só do revestimento asfáltico quanto da estrutura inteira.

Um dos fatores para quantificar os danos causados pelo excesso de carga é o Fator de Equivalência de Carga, que será explicado no a seguir. Analisando, então, por esse parâmetro, Albano (1998) registrou que o valor do FEC chega a ser 750% maior que o unitário quando aplicado as condições mais críticas num pavimento, que seriam a de carga de eixo de 120 kN e a pressão de inflação de 620 kPa. Assim, pôde concluir que o fator que mais prejudica os pavimentos é o excesso de carga por eixo.

A legislação referente ao excesso de carga vem se adequando ao longo dos anos, sendo que a primeira Resolução do Contran foi a n. 12 em 1998. Brasil (2006) relata que essa Resolução foi revogada pela de n. 210, em 2006, que ainda continua em vigor, porém com alteração das resoluções n. 284, 326 e da deliberação 105/10. O mesmo documento referido anteriormente menciona que essa Resolução “Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres e dá outras providências.”.

A Resolução n. 210 delimita no segundo artigo o valor máximo de peso bruto total e do transmitido por eixo de veículo nas estradas públicas. Nesse artigo, tem-se as cargas permitidas considerando o limite da capacidade máxima de tração (BRASIL, 2006, p. 2-3). Outros pesos são delimitados na Resolução n. 210, no artigo 2, conforme listados abaixo (BRASIL, 2006, p. 3-4):

[...]

b) peso bruto por eixo isolado de dois pneumáticos: 6 t;

c) peso bruto por eixo isolado de quatro pneumáticos: 10 t;

d) peso bruto por conjunto de dois eixos direcionais, com distância entre eixos de no mínimo 1,20 metros, dotados de dois pneumáticos cada: 12 t;

e) peso bruto por conjunto de dois eixos em tandem, quando à distância entre os dois planos verticais, que contenham os centros das rodas, for superior a 1,20m e inferior ou igual a 2,40m: 17 t;

- f) peso bruto por conjunto de dois eixos não em tandem, quando à distância entre os dois planos verticais, que contenham os centros das rodas, for superior a 1,20m e inferior ou igual a 2,40m: 15 t;
- g) peso bruto por conjunto de três eixos em tandem, aplicável somente a semi-reboque, quando à distância entre os três planos verticais, que contenham os centros das rodas, for superior a 1,20m e inferior ou igual a 2,40m: 25,5t;
- h) peso bruto por conjunto de dois eixos, sendo um dotado de quatro pneumáticos e outro de dois pneumáticos interligados por suspensão especial, quando à distância entre os dois planos verticais que contenham os centros das rodas for inferior ou igual a 1,20m (9 t) ou superior a 1,20m e inferior ou igual a 2,40m (13,5 t).

Os artigos 3 e 5 também são relevantes para a delimitações de excesso de carga, sendo eles (BRASIL, 2006, p. 4):

Art. 3º Os limites de peso bruto por eixo e por conjunto de eixos, estabelecidos no artigo anterior, só prevalecem se todos os pneumáticos, de um mesmo conjunto de eixos, forem da mesma rodagem e calçarem rodas no mesmo diâmetro.

[...]

Art. 5º Não será permitido registro e o licenciamento de veículos com peso excedente aos limites fixado nesta Resolução.

A Resolução limita claramente as cargas para os tipos de eixos utilizados, tendo ainda outras resoluções que limitam o excesso de carga permitido, nas quais até junho de 2014 era permitido 7,5% sobre a carga legal e atualmente é possível chegar até 10%. Várias pesquisas atuais, no entanto, destacam a falta de conscientização de transportadores que excedem esses limites.

4.3 FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA

Segundo Albano (2005), "O tráfego que se desloca sobre o pavimento é o carregamento a ser considerado nos métodos de dimensionamento sejam eles empíricos ou mecânicos.", sendo assim é de extrema importância conseguir modelá-lo, para isso usa-se o número N.

Para fins de estudos, conseqüentemente, a *ASSHTO Road Test* definiu um eixo padrão sendo ele composto por um eixo simples de rodado duplo com carga de 8,2tf e com pressão de inflação dos pneus 80 psi (ALBANO, 2005). Esse eixo padrão é utilizado como meio de conformizar então as cargas, assim surgiu o Fator de Equivalência de Carga - FEC - que

calcula os efeitos nos pavimentos flexíveis gerados pelo excesso de carga, segundo Albano (1998).

Segundo Núñez¹ (2012), o FEC pode ser representado pela equação 3 onde "[...] Np e Ni são os números de aplicação das cargas de eixo Cp e Ci correspondentes a um mesmo estado de degradação."

$$FEC = \frac{Np}{Ni} = \left(\frac{Ci}{Cp}\right)^n \quad (\text{equação 3})$$

O expoente n da equação é dependente do tipo de eixo que está aplicando a carga e da magnitude dessa, porém também varia de acordo com o dano considerado, explica Núñez (2012). Ressalta também que o DNIT assume para "n" os valores encontrados pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* - ASSHTO, que são aproximadamente 4, e pelo *US Army Corps of Engineers* - USACE, que variam entre 3,35 e 6,25. Essas potências, porém, geram resultados bem distinguíveis, podendo chegar até 50% de discrepância, segundo o mesmo autor. Com isso ele enfatiza que "Isto reflete o caráter puramente empírico desses Fatores de Equivalência, que, como todo resultado de modelagem estatística, são válidos apenas para o universo no qual foram obtidos."

Núñez (2012) explica que esses fatores são ainda utilizados em diversos países, pois para chegar-se a um valor mais realista seria necessário ensaiar cada tipo de pavimento, considerando os diferentes subleitos, as condições climáticas e a drenagem, o que é bem difícil de executar-se. Expõe, portanto, que os dimensionamentos de pavimentos tem se direcionado para métodos mecânicos-empíricos e uso do conceito de espectro de carga, o qual leva em consideração as respostas estruturais dos pavimentos quando são submetidos a aplicação de carga.

¹ Estudo elaborado pela empresa S&T Engenharia, Arquitetura e Meio Ambiente fornecido pelo professor Washington P. Núñez elaborado em 2012, sendo titulado de Efeitos da Tolerância na Carga por Eixo no Desempenho de Pavimentos Flexíveis.

² Relatório de análise das propriedades de materiais granulares feito no Lapav em 2007, fornecido pelo prof.

4.4 PROGRAMA EVERSTRESS FE

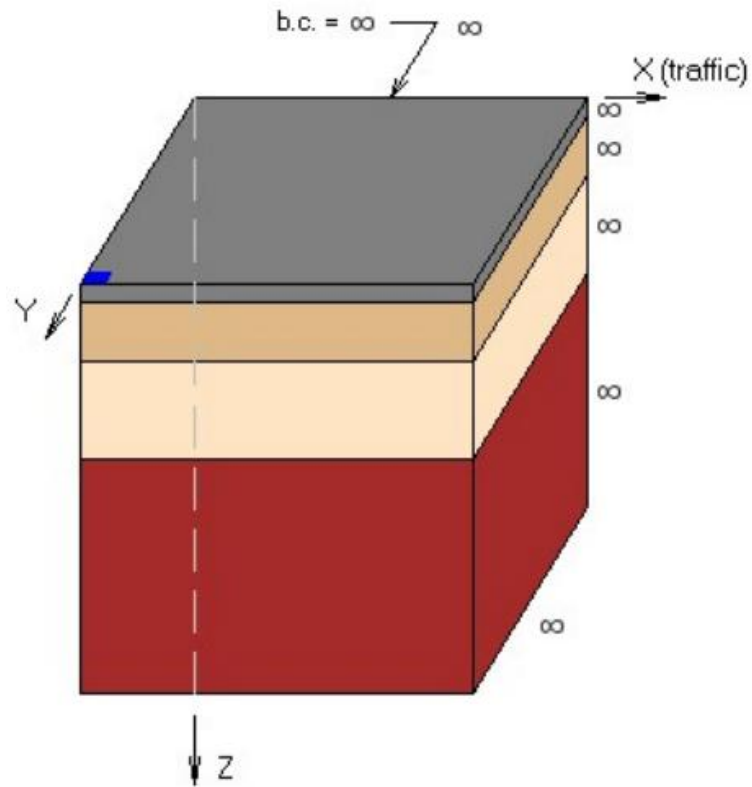
O programa Everstress FE é uma das ferramentas utilizadas para a análise desse tipo de estrutura. Por meio computacional, é simulado uma situação real de aplicação de carga em um pavimento, gerando as diversas reações ocorridas nesse, porém de modo teórico. Programas como esse são muito utilizados quando não é possível ou viável ser aplicado um procedimento de campo.

Davids (2009, p. 1, tradução nossa) define que o “EverStressFE versão 1.0 [...] é um pacote tridimensional de elementos finitos de fácil uso baseado em um software para a análise de sistemas de pavimento asfáltico submetido a várias combinações de carga de roda/eixo.”. Complementa que esse programa ainda apresenta uma interface gráfica muito qualificada que usa a geração de malhas automáticas associada a ferramentas de visualização de forma fácil e prática.

Abaixo seguem algumas das principais características do programa em questão citadas por Davids (2009):

- a) possibilita o uso de modelos com até quatro camadas representativas dos materiais de pavimentação, ilustradas na figura 8, presumindo que esses são linearmente elásticos;
- b) permite usar diferentes condições de contorno, como um domínio finito associado a deslocamentos fixos ou um domínio infinito com elementos infinitos;
- c) consegue modelar os vínculos entre as camadas, aplicando assim os diferentes graus de cisalhamentos inter-camadas. Analisa as interfaces completamente ligadas, como as parcialmente ligadas e também as completamente descoladas;
- d) especifica o sistema de rodas, podendo usar até 4, que seriam os eixos tandem com pneu duplo;
- e) modela espacialmente a distribuição do contato das pressões de pneu, tornando a pesquisa mais realista, pois se pode carregar arquivos personalizados com pressões de contato;
- f) plota mapas de cores que apresentam a quantidade de parâmetros de saída, mostrando esses em 2D com a profundidade indicada a partir da superfície;
- g) divulgação das deformações críticas após uma simulação.

Figura 8 – Camadas apresentadas no programa Everstress FE



(fonte: DAVIDS, 2009)

5 OBTENÇÃO DE DADOS E CÁLCULO DAS DEFORMAÇÕES

Através da vasta bibliografia brasileira é possível coletar dados de diferentes solos e pavimentos das regiões do Brasil, bem como suas propriedades. Baseado nisso, apresenta-se a seguir as estruturas representativas do Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste com seus materiais e respectivas propriedades.

Com a finalidade de gerar as tensões e deformações possíveis ocorridas pela aplicação de carga nessas estruturas, precisou-se ajustar alguns parâmetros dos pavimentos estudados a fim de se obter resultados mais realistas. Tendo a entrada de dados selecionada, pôde-se fazer o cálculo dessas reações pelo programa EverStress FE, sendo suas etapas também apresentadas no presente capítulo.

5.1 ESTRUTURAS REPRESENTATIVAS DE CADA REGIÃO

O Brasil tem sua composição geológica bem diversificada, sendo essa a explicação para a diversidade de materiais utilizados nas camadas de um pavimento. Para um solo ou rocha ter seu uso considerado economicamente viável em uma rodovia, deve estar localizado em um ponto próximo e de fácil acesso a construção. Cada região brasileira, portanto, acaba priorizando certos materiais frente a outros.

Conforme relatado pelo professor orientador desse trabalho, Washington Núñez, os materiais predominantes encontrados nos subleitos são solos argilosos e arenosos, tendo suas propriedades variáveis de acordo com o solo que o originou, seu processo de formação, entre outros fatores. No Norte, porém, o pedregulho laterítico é abundante, sendo encontrado, além do subleito, nas demais camadas dos pavimentos, como é exposto posteriormente. Pontuando isso, as regiões ficaram definidas como os seguintes materiais para estudo:

- a) Sul: solo argiloso e arenoso, macadame seco e brita graduada simples - BGS;
- b) Sudeste: solo argiloso, arenoso e laterítico e BGS;
- c) Centro-Oeste: solo argiloso e arenoso, macadame hidráulico, pedregulho laterítico e BGS;
- d) Norte: solo argiloso e pedregulho laterítico;

e) Nordeste: solo argiloso e arenoso e solo-brita.

Dentre as diferentes estruturas de pavimentos flexíveis, uma propriedade mostra-se comum a todos, o revestimento constituído por materiais betuminosos. Com isso, definiu-se para essa o uso de concreto betuminoso usinado a quente, CBUQ.

5.1.1 Parâmetros Gerais das Estruturas

Ao verificar os pavimentos das diferentes regiões, nota-se que as estruturas são similares, sendo constituídas pela sub-base, logo acima do subleito, após encontra-se a base e por fim o revestimento o qual é dividido em duas camadas quando essa é muito espessa, *binder* e capa. As espessuras dessas camadas também não apresentam grande variância, portanto se definiu que todas as seções analisadas teriam a mesma estrutura em relação a camadas e suas espessuras. O coeficiente de poisson (ν) é um parâmetro que depende da razão de deformabilidade dos materiais, em vista disso assumiu-se os valores mais indicados na literatura. Esse dado de entrada foi adotado 0,30 para o revestimento. Já para a base e a sub-base, apesar dos materiais serem diferentes nas seções, essa propriedade não apresenta grandes variações, logo se adotou 0,35. O programa utilizado apresenta uma limitação quando se usa o número máximo de camadas permitidas, 4, o coeficiente em questão pode ser registrado como no máximo 0,35, portanto como o subleito apresenta valores de 0,4 - 0,45, adotou-se o valor máximo já referido.

O subleito é considerado como infinito, para isso adotou-se dimensão de 1 m para a entrada no programa, pois nessa profundidade geralmente não se encontra mais tensões consideráveis quando há uma aplicação de carga. A base e a sub-base possuem a mesma espessura de 20 cm, porém como o programa EverStress FE permite apenas 4 camadas de estudo, a entrada de valor das duas foi considerada como uma já que os materiais utilizados em geral tem propriedades semelhantes. O revestimento asfáltico tem uma grande importância na redução da carga que chega nas demais camadas, logo analisou-se 4 espessuras - 5, 10, 15 e 20 - sendo as três últimas divididas em binder e capa conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Camadas e espessuras definidas como padrão para as estruturas

Camada	Espessura (cm)			
Capa	5	5	10	15
<i>Binder</i>	-	5	5	5
Base			20	
Sub-base			20	
Subleito			20	

(fonte: elaborado pela autora)

A distribuição da carga aos pavimentos se dá através das rodas, as quais tem sua configuração definida pelo tipo de eixo. Dentre os tipos de eixos existentes, o eixo simples de rodas simples, ESRS, e o eixo simples de rodas duplas, ESRD, são os mais danosos a essa estrutura e estão sempre presentes nos veículos de carga, por conseguinte são os dois tipos de eixo analisados no presente estudo, adotando a separação entre o eixo das rodas do ESRD de 35 cm. A pressão de enchimento dos pneus, assim como o contato deles com o revestimento, também é um parâmetro que influencia nos efeitos que as cargas causam aos pavimentos, porém como o enfoque desse trabalho é no excesso de carga, esses dados de entrada foram fixados, o primeiro em 560 kPa (aproximadamente 80 psi), e o segundo feito através do formato circular.

Como elemento principal do estudo, a carga por eixo teve seu valor base, 6 e 10 tnf, conforme Brasil (2006) delimita pelo tipo de eixo utilizado. Já as porcentagens acima dessas partiram de 7,5%, pois é o valor especificado por Brasil (2010) como o valor máximo tolerado sendo completada por Brasil (2014), onde aumentou a possibilidade dessa porcentagem ser 10%, logo esse foi o segundo valor analisado. O registro nas balanças de diversas rodovias tem apresentado números maiores, como já apontado anteriormente, logo se aplicou excessos acima do tolerado para ver o real dano causado atualmente, tendo os valores finais escolhidos apresentados na tabela 2. Com a finalidade de analisar o fator de equivalência de carga acrescentou-se, ainda, o ESRD com 8,2 tnf.

Tabela 2 – Cargas aplicadas por tipo de eixo

Tipo de Eixo	Cargas Aplicadas		% em relação a legalizada
	(tnf)	(kN)	
ESRS	6,00	29,43	0,0
	6,45	31,64	7,5
	6,60	32,37	10,0
	7,20	35,32	20,0
	7,80	38,26	30,0
ESRD	10,00	24,53	0,0
	10,75	26,24	7,5
	11,00	26,98	10,0
	12,00	29,43	20,0
	13,00	31,88	30,0

(fonte: elaborado pela autora)

5.1.2 Módulo de Resiliência e Definição das Estruturas

O módulo de resiliência é um dos parâmetros mais importantes para definição do comportamento dos materiais. Para uma abordagem mais realista, pesquisou-se esse dado nas bibliografias provenientes de cada região que apresentam estudos dos materiais definidos anteriormente. Esse parâmetro é estudado através da adequação de modelos pré-definidos para cada material específico, pois, como previamente explicado, ele é dependente das tensões desvio ou confinantes. O programa utilizado nesse estudo, porém, não permite a entrada dos modelos representantes das camadas utilizadas, mas sim um módulo definido.

Em vista disso, fez-se um estudo dessas tensões geradas no ponto médio das camadas a partir do uso das equações de Boussinesq, onde se utiliza a equação 3 para encontrar o valor da tensão-desvio (σ_d) e a equação 4 para a tensão confinante (σ_3).

$$\sigma_d = \sigma_0 \left[1 - \frac{1}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2} \right)^3} \right] \quad \text{(equação 4)}$$

$$\sigma_3 = \sigma_0 \left[\frac{1 + 2\nu}{2} - \frac{1 + \nu}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{z}\right)^2} \right)} + \frac{1}{2 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{z}\right)^2} \right]^3} \right] \quad (\text{equação 5})$$

Sendo:

$$a = \sqrt{\frac{C_{\text{roda}}}{\pi \times p_{\text{pneu}}}} \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

$\sigma_0 = p_{\text{pneu}}$ = pressão do pneu, (kgf/cm²);

a = raio de atuação da carga (cm²);

z = profundidade de análise (cm);

ν = coeficiente de Poisson;

C_{roda} = carga por roda (kgf/cm²).

A profundidade de análise foi considerada na metade da camada, porém como a espessura do revestimento é variável, fixou-se esse valor como 10 cm, pois simulando com os quatro valores, conforme a tabela 3, nota-se que a variação não é significativa. Fazendo os devidos ajustes, calculou-se a carga por roda através da carga por eixo já definida, assim como a pressão do pneu e os coeficientes de Poisson. Na tabela 4, pôde-se determinar as tensões a serem consideradas, contudo quando resulta em valores negativos ou menores que os ensaiados nas pesquisas analisadas, desconsidera-se o valor e usa-se a tensão mais baixa ensaiada, portanto na base/ sub-base determinou-se a tensão desvio de 0,14 MPa e no subleito de 0,013 MPa, com as tensões confinantes com o menor valor testado.

Tabela 3 – Simulação das tensões através da equação de Boussinesq considerando diferentes espessuras de revestimento

C_{roda} (kgf/cm ²)	P_{pneus} (kgf/cm ²)	a (cm)	Camada	ν	z (cm)	σ_d (kgf/cm ²)	σ_d (MPa)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_3 (MPa)
3000	5,6	13,06	Revestimento	0,3	2,5	5,563	0,556	3,130	0,3130
					5	5,344	0,534	2,005	0,2005
					7,5	4,908	0,491	1,200	0,1200
					10	4,341	0,434	0,683	0,0683
			Base/ Sub-base	0,35	25	1,700	0,170	0,009	0,0009
					30	1,283	0,128	-0,013	-0,0013
					35	0,994	0,099	-0,020	-0,0020
					40	0,789	0,079	-0,021	-0,0021
					Subleito	0,35	100	0,140	0,014
			110	0,116			0,012	-0,005	-0,0005
			120	0,098			0,010	-0,005	-0,0005
			130	0,084			0,008	-0,004	-0,0004

(fonte: elaborado pela autora)

O módulo de resiliência do CBUQ utilizado no revestimento, contudo, tem o mesmo valor para todas as seções, sendo 5.000 MPa para a capa e 3.000 MPa para o *binder*, quando houver. Os demais materiais tem essa propriedade definida para cada camada, conforme registrado na sequência.

Tabela 4 – Tensões desvio e confinantes geradas pela equação de Boussinesq

C_{roda} (kgf/cm ²)	P_{pneus} (kgf/cm ²)	a (cm)	Camada	ν	z (cm)	σ_d (kgf/cm ²)	σ_d (MPa)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_3 (MPa)
3000	5,6	13,06	Base/ Sub-base	0,35	30	1,283	0,128	-0,013	-0,001
			Subleito	0,35	110	0,116	0,012	-0,005	-0,001
3225	5,6	13,54	Base/ Sub-base	0,35	30	1,359	0,136	-0,010	-0,001
			Subleito	0,35	110	0,125	0,012	-0,006	-0,001
3300	5,6	13,70	Base/ Sub-base	0,35	30	1,384	0,138	-0,009	-0,001
			Subleito	0,35	110	0,128	0,013	-0,006	-0,001
3600	5,6	14,30	Base/ Sub-base	0,35	30	1,482	0,148	-0,005	-0,000
			Subleito	0,35	110	0,139	0,014	-0,006	-0,001
3900	5,6	14,89	Base/ Sub-base	0,35	30	1,575	0,158	0,001	0,000
			Subleito	0,35	110	0,150	0,015	-0,007	-0,001
2500	5,6	11,92	Base/ Sub-base	0,35	30	1,105	0,111	-0,018	-0,002
			Subleito	0,35	110	0,097	0,010	-0,005	-0,000
2687,5	5,6	12,36	Base/ Sub-base	0,35	30	1,174	0,117	-0,017	-0,002
			Subleito	0,35	110	0,104	0,010	-0,005	-0,000
2750	5,6	12,50	Base/ Sub-base	0,35	30	1,196	0,120	-0,016	-0,002
			Subleito	0,35	110	0,107	0,011	-0,005	-0,001
3000	5,6	13,06	Base/ Sub-base	0,35	30	1,283	0,128	-0,013	-0,001
			Subleito	0,35	110	0,116	0,012	-0,005	-0,001
3250	5,6	13,59	Base/ Sub-base	0,35	30	1,368	0,137	-0,010	-0,001
			Subleito	0,35	110	0,126	0,013	-0,006	-0,001

(fonte: elaborado pela autora)

5.1.2.1 Estruturas Representativas da Região Sul

Conforme já exposto os solos que foram selecionados para essa região, as estruturas representativas estão determinadas a seguir.

5.1.2.1.1 Estrutura 1

Com a seleção do subleito arenoso para essa estrutura, encontrou-se análises de dois materiais granulares do Rio Grande do Sul, RS, feitas no Laboratório de Pavimentação da UFRGS², Lapav, as quais apresentam os modelos representantes do módulo de resiliência desses materiais e aplicando as tensões definidas anteriormente, em MPa, gerou-se os valores apresentados na tabela 5.

² Relatório de análise das propriedades de materiais granulares feito no Lapav em 2007, fornecido pelo prof. Washington Núñez

Tabela 5 – Módulos de resiliência de solos arenosos da região Sul (Lapav)

Ensaio	Modelo	MR (MPa)
MR7	$MR = 275,6 * (\theta / p_{atm})^{30,41}$	216,55
MR6	$MR = 346,4 * (\theta / p_{atm})^{0,3023}$	267,59

(fonte: elaborado pela autora)

Sendo:

$$\theta = \sigma_d + 3\sigma_3 \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, MPa;

 p_{atm} = pressão atmosférica; 0,101 MPa.

A fim de coletar mais dados, repetindo o mesmo procedimento, utilizou-se os resultados gerados por Medina e Preussler³ (1980 apud MEDINA; MOTTA, 2005) que estudaram diferentes solos provenientes das regiões Sul e Sudeste, então se selecionou apenas os arenosos que estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Módulos de resiliência de solos arenosos da região Sul

Solo	Modelo	MR (MPa)
6	$MR = 2032 * \sigma_3^{0,41}$	307,56
7	$MR = 1314 * \sigma_3^{0,51}$	125,49
8	$MR = 1535 * \sigma_3^{0,79}$	40,37
9	$MR = 200 * \sigma_3^{0,46}$	24,05

(fonte: elaborado pela autora)

Como a análise do subleito feita, estudou-se a base e a sub-base, que como relatado anteriormente, tem seus dados de entrada juntos, logo o mesmo material, que dessa estrutura é o macadame seco. Para esse material, entretanto, não se encontrou modelos, pois como

³ MEDINA, J.; PREUSSLER, E. S. Características resilientes de solos em estudo de pavimentos. **Solos e Rochas**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p. 3-26, 1980.

notificado pelo próprio prof. orientador, não é um material muito estudado, porém se adota o valor de 300 MPa no RS.

Observando os resultados encontrados, determinou-se a estrutura 1 representativa da região Sul conforme a figura 9.

Figura 9 – Estrutura 1 representativa da região Sul

	<p>CBUQ</p> <p>5 - 20 cm</p> <p>MR: 5.000 e 3.000 MPa</p>
	<p>BGS</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 300 MPa</p>
	<p>Macadame Seco</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 300 MPa</p>
	<p>Solo Arenoso</p> <p>~</p> <p>MR: 205 MPa</p>

(fonte: elaborado pela autora)

5.1.2.1.2 Estrutura 2

Como o subleito é argiloso, através dos estudos de Rodrigues (1997) sobre solos do Rio Grande do Sul, se obteve alguns módulos de resiliência para esses. Na tabela 7, apresenta-se os modelos gerados pelo autor e os resultados obtidos com aplicação das mesmas tensões anteriores, porém tendo sua entrada em kPa.

Tabela 7 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Sul

Solo	Modelo	MR (MPa)
A	$MR = 3402,3 * \sigma_d^{0,630}$	675,54
C	$MR = 2161,0 * \sigma_d^{0,652}$	406,37

(fonte: elaborado pela autora)

Como base/ sub-base, o material selecionado foi BGS, tendo ensaios também ensaios de solos do RS feitos no Lapav⁴, sendo seus resultados expostos na tabela 8.

Tabela 8 – Módulos de resiliência de BGS da região Sul (Lapav)

Material	Modelo	MR (MPa)
Brita	$MR = 64,04 * (\theta/p_{atm})^{0,8657}$	100,51

(fonte: elaborado pela autora)

Como outra fonte de dados, o trabalho de Marodin (2010) também apresentou o modelo utilizado para a BGS analisada em seus estudos, sendo exposto na tabela 9.

Tabela 9 – Módulos de resiliência de BGS da região Sul





Material	Modelo	MR (MPa)
BGS	$MR = 220 * (\theta/p_{atm})^{0,64}$	307,00

(fonte: elaborado pela autora)

Analisando os valores apresentados nas bibliografias referidas, definiu-se a estrutura 2, representada na figura 10.

⁴ Relatório de análise das propriedades de uma brita feito no Lapav em 2006, fornecido pelo prof. Washington Núñez

Figura 10 – Estrutura 2 representativa da região Sul

	<p>CBUQ</p> <p>5 - 20 cm</p> <p>MR: 5.000 e 3.000 MPa</p>
	<p>BGS</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 263 MPa</p>
	<p>BGS</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 263 MPa</p>
	<p>Solo Argiloso</p> <p>~</p> <p>MR: 494 MPa</p>

(fonte: elaborado pela autora)

5.1.2.2 Estruturas Representativas da Região Sudeste

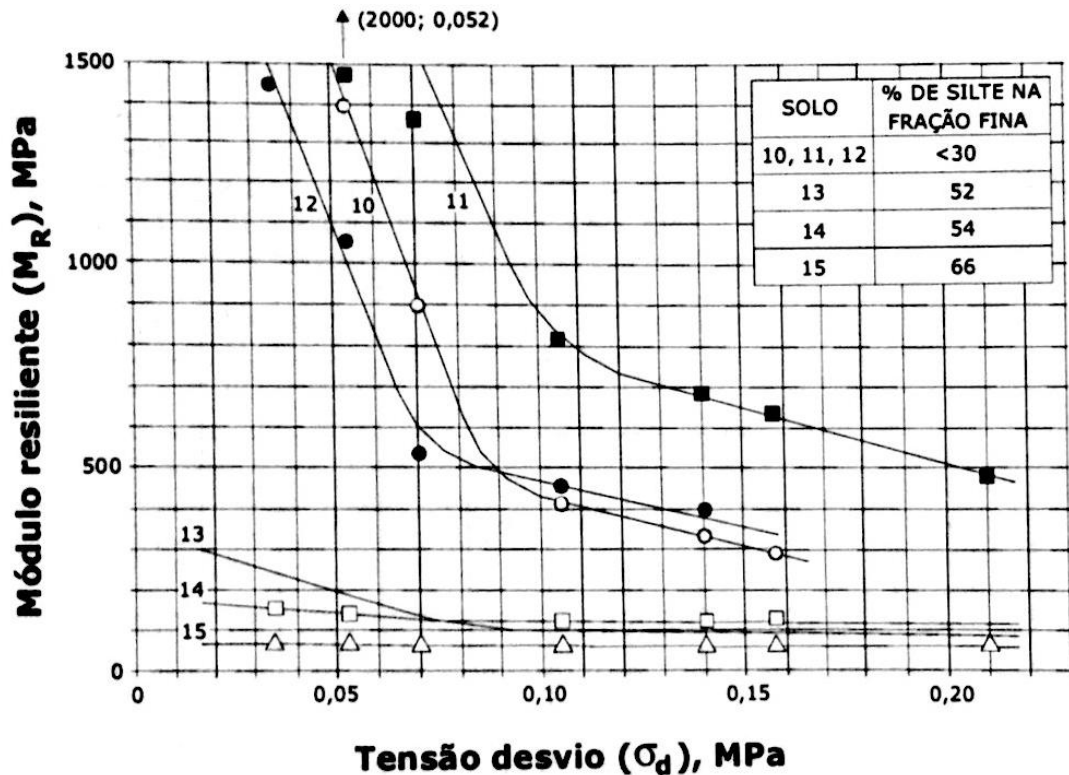
As seções representativas foram baseadas nos materiais já apresentados anteriormente e são determinadas abaixo.

5.1.2.2.1 Estrutura 3

Através do mesmo estudo citado anteriormente de Medina e Preussler⁵ (1980 apud MEDINA; MOTTA, 2005), coletou-se dados para o subleito de solo argiloso da região Sudeste, sendo apresentado na figura 11. Um resumo dos solos que se enquadram nas especificações dessa estrutura com seus respectivos módulos de resiliência para a tensão desvio adequada é expresso na tabela 10.

⁵ MEDINA, J.; PREUSSLER, E. S. Características resilientes de solos em estudo de pavimentos. **Solos e Rochas**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p. 3-26, 1980.

Figura 11 – Gráfico do módulo de resiliência contra tensões desvios de solos argilosos e siltosos



(fonte: MEDINA; MOTTA, 2005)

Tabela 10 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Sudeste

Solo	Origem	MR (MPa)
11	BR040RJ	-
12	BR040RJ	1100,00
13	BR116MG	191,00
15	BR381SP	70,00

(fonte: elaborado pela autora)

Como os valores são bem variáveis, em função do material origem do solo, buscou-se mais uma referência em Castro (2002), o qual examinou solos de Minas Gerais, estando expressos na tabela 11.

Tabela 11 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Sudeste provenientes de Minas Gerais

Amostra	Modelo	MR (MPa)
4	$MR = 59,10 * \sigma_d^{-0,63}$	911,60
7	$MR = 105,20 * \sigma_d^{-0,50}$	930,71
13	$MR = 93,30 * \sigma_d^{-0,50}$	832,63
16	$MR = 47,70 * \sigma_d^{-0,64}$	765,08
17	$MR = 39,3 * \sigma_d^{-0,70}$	814,44

(fonte: elaborado pela autora)

Já para o material de base/ sub-base, areias argilosas lateríticas, foi baseado nos estudos de Severi et al. (1999), onde apresenta valores de módulo de resiliência para os solos ensaiados, conforme tabela 12.




Tabela 12 – Módulos de resiliência de areias argilosas lateríticas da região Sudeste

Local	Via	MR (MPa)
Araraquara	Bueno	200
São Carlos	Broa	270
Ourinhos	J. América	220
	Fatec	270
Ibaté- Usina	c/ recape	230
	s/ recape	300
Paulínia	José Losano	170
	Via F	220

(fonte: elaborado pela autora)

Tendo em vistas os módulos de resiliência encontrados, definiu-se a estrutura 3 representativa da região Sudeste de acordo com a figura 12.

Figura 12 – Estrutura 3 representativa da região Sudeste

	CUBQ 5 - 20 cm MR: 5.000 e 3.000 MPa
	Areia Argilosa Laterítica 20 cm MR: 235 MPa
	Areia Argilosa Laterítica 20 cm MR: 235 MPa
	Solo Argiloso ~ MR: 577 MPa

(fonte: elaborado pela autora)

5.1.2.2.2 Estrutura 4

Dentre os diversos solos estudados por Castro (2002), o solo arenoso é o que trouxe os parâmetros necessários para a definição do subleito dessa estrutura representativa, pois esse é o material selecionado para essa camada. Na tabela 13, apresenta-se os valores encontrados aplicando as tensões pré-definidas.

Tabela 13 – Módulos de resiliência de solos arenosos da região Sudeste

Amostra	Modelo	MR (MPa)
1	$MR = 148,90 * \sigma_d^{-0,33}$	693,26
2	$MR = 124,10 * \sigma_d^{-0,34}$	583,14
6	$MR = 210,2 * \sigma_d^{-0,43}$	1522,76

(fonte: elaborado pela autora)

Para o material de base/ sub-base tem-se BGS, a qual teve seu módulo definido através do trabalho de Espinosa⁶ (1987 apud MEDINA; MOTTA, 2005), onde seus modelos estão apresentados na tabela 14 que com a aplicação das tensões selecionadas geraram tais módulos de resiliência.

Tabela 14 – Módulos de resiliência de BGS da região Sudeste

Amostra	Modelo	MR (MPa)
1	$MR = 953 * (\theta/p_{atm})^{0,397}$	503,04
2	$MR = 1498 * (\theta/p_{atm})^{0,454}$	721,41
3	$MR = 1505 * (\theta/p_{atm})^{0,639}$	538,14
4	$MR = 1045 * (\theta/p_{atm})^{0,555}$	427,75
5	$MR = 567 * (\theta/p_{atm})^{0,261}$	372,52
6	$MR = 610 * (\theta/p_{atm})^{0,308}$	371,58
7	$MR = 628 * (\theta/p_{atm})^{0,326}$	371,62

(fonte: elaborado pela autora)

Analisando os módulos encontrados de cada material, a estrutura 4 representativa da região Sudeste fica definida pela figura 13.

⁶ ESPINOSA, V. R. P. **Ensaio triaxiais de carga repetida de uma brita**. 1987. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1987.

Figura 13 – Estrutura 4 representativa da região Sudeste

	<p>CBUQ</p> <p>5 - 20 cm</p> <p>MR: 5.000 e 3.000 MPa</p>
	<p>BGS</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 390 MPa</p>
	<p>BGS</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 390 MPa</p>
	<p>Solo Arenoso</p> <p>~</p> <p>MR: 638 MPa</p>

(fonte: elaborado pela autora)

5.1.2.3 Estruturas Representativas da Região Centro-Oeste

Com os materiais já definidos anteriormente para essa região, apresenta-se as estruturas representativas no item seguinte.

5.1.2.3.1 Estrutura 5

Cardoso (1995) fez uma pesquisa vasta em diferentes pavimentos brasileiros e como há pouca bibliografia referente à região em questão, compilou-se os resultados do autor tanto para solos argilosos, material do subleito dessa estrutura, como para macadame hidráulico, da base/ sub-base. Contudo, o autor não apresenta os modelos com que trabalhou, apresentando apenas os números encontrados através de retroanálise, sendo esses expostos pelas tabelas 15 e 16.

Bezzera Neto (2004) também apresenta estudos de solos argilosos de Campo Grande, logo, para uma observação mais completa, utilizou-se esses dados, conforme tabela 17.

Tabela 15 – Módulos de resiliência de solos argilosos do Brasil

Local	MR (MPa)		
	Mínimo	Máximo	Médio
4	107,95	294,41	176,64
5	78,51	323,85	186,46
6	363,10	1216,88	893,03
7	68,69	1138,37	598,63
8	15,70	98,14	49,07
12	22,57	39,25	29,44
18	39,25	137,39	58,88

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 16 – Módulos de resiliência de macadame hidráulico do Brasil

Local	MR (MPa)		
	Mínimo	Máximo	Médio
4	264,97	716,39	500,49
5	255,15	922,47	510,30
6	4,91	5495,58	1079,49
7	68,69	618,25	264,97

(fonte: elaborado pela autora)





Tabela 17 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Centro-Oeste

Solo	Modelo	MR (MPa)
Argiloso	$MR = 87 * \sigma_d^{-0,43}$	563,02

(fonte: elaborado pela autora)

Analisando esses resultados apresentados para os materiais representativos da região Centro-Oeste, sua estrutura fica definida pela figura 14.

Figura 14 – Estrutura 5 representativa da região Centro-Oeste

	<p>CBUQ</p> <p>5 - 20 cm</p> <p>MR: 5.000 e 3.000 MPa</p>
	<p>BGS</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 590 MPa</p>
	<p>Macadame Hidráulico</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 590 MPa</p>
	<p>Solo Argiloso</p> <p>~</p> <p>MR: 407 MPa</p>

(fonte: elaborado pela autora)

5.1.2.3.2 Estrutura 6

O subleito dessa estrutura representativa é de solo arenoso e considerando a falta já apontada no item anterior, usou-se os dados de Bezerra Neto (2004), apresentados na tabela 18, assim como os estudos de Cardoso (1995), contidos na tabela 19, porém com os módulos de resiliência apropriados para o material em questão.

Tabela 18 – Módulos de resiliência de solos arenosos da região Centro-Oeste

Solo	Modelo	MR (MPa)
Arenoso	$MR = 798 * \sigma_d^{0,29}$	107,65

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 19 – Módulos de resiliência de solos arenosos do Brasil

Local	MR (MPa)		
	Mínimo	Máximo	Médio
9	58,88	215,90	127,58
10	73,60	471,05	225,71
11	58,88	490,68	19,63
13	39,25	98,14	73,60
14	49,07	83,42	68,69
15	53,97	274,78	112,86
16	68,69	176,64	103,04

(fonte: elaborado pela autora)

Para o material da base/ sub-base, escolheu-se pedregulho laterítico, sendo suas propriedades obtidas a partir também dos estudos de Cardoso (1995), apresentados na tabela 20. Como meio de comparação, analisou-se os resultados de Santos⁷ (1998 apud MEDINA; MOTTA, 2005) onde relata que é pertinente considerar o módulo de resiliência desse material em um intervalo de 250 a 700 MPa para a camada de base e de 300 a 550 MPa para a camada de sub-base.

Tabela 20 – Módulos de resiliência de pedregulhos lateríticos do Brasil


Local	MR (MPa)		
	Mínimo	Máximo	Médio
9	58,88	171,74	98,14
10	78,51	480,86	206,08
11	58,88	83,42	68,69
J	19,63	824,34	255,15

(fonte: elaborado pela autora)

⁷ SANTOS, J. de D. G. **Contribuição ao estudo de solos lateríticos granulares como camada de pavimento**. 1998. 353 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

Tendo essas propriedades levantadas, formou-se a estrutura 6 representativa da região Centro-Oeste, como representado na figura 15.

Figura 15 – Estrutura 6 representativa da região Centro-Oeste

	<p>CUBQ</p> <p>5 - 20 cm</p> <p>MR: 5.000 e 3.000 MPa</p>
	<p>Pedregulho Laterítico</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 365 MPa</p>
	<p>Pedregulho Laterítico</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 365 MPa</p>
	<p>Solo Arenoso</p> <p>~</p> <p>MR: 106 MPa</p>

(fonte: elaborado pela autora)

5.1.2.4 Estruturas Representativas da Região Norte

Para essa região, mostra-se, a seguir, suas as estruturas representativas, conforme os materiais já definidos previamente.

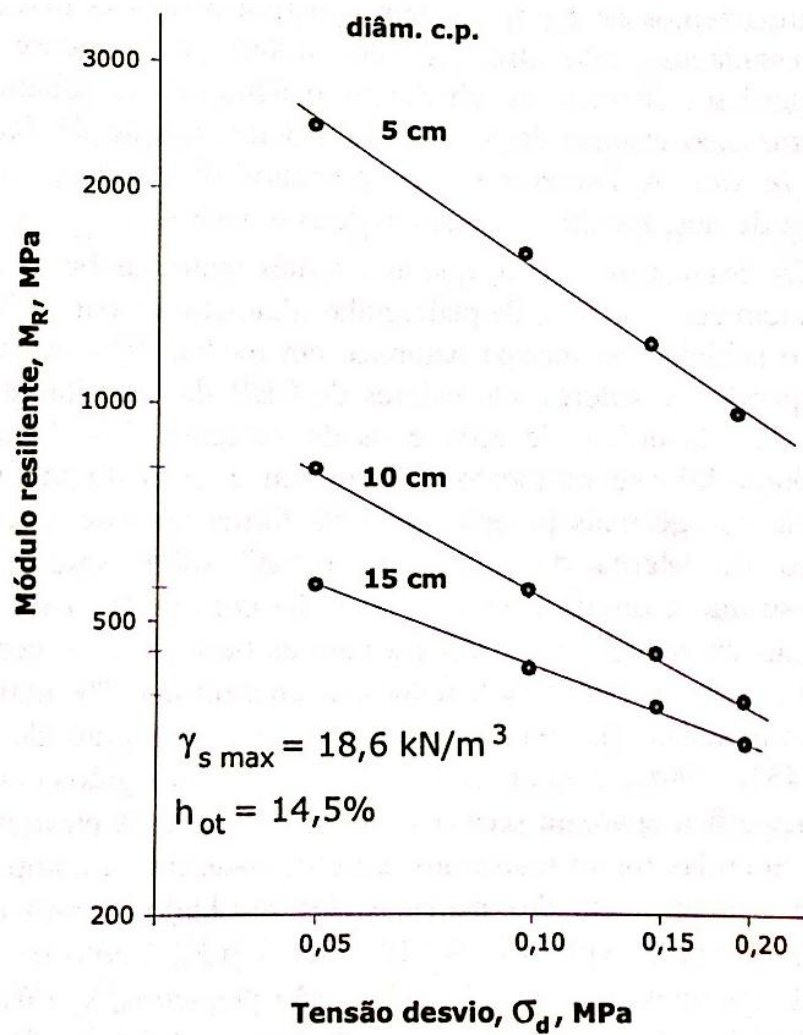
5.1.2.4.1 Estrutura 7

Sendo o pedregulho laterítico um material encontrado em abundância nessa região, essa estrutura representativa tem todas as suas camadas constituídas por esse material. Motta⁸ (1991 apud MEDINA; MOTTA, 2005) ensaia esse tipo de solo originário de Rondônia e

⁸ MOTTA, L. M. G. da. **Métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis**: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. 1991. 366 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

Roraima, de onde o módulo de resiliência para a camada de base/ sub-base foi analisado, sendo considerado o diâmetro de 10 cm, conforme a figura 16.

Figura 16 – Gráfico de módulo de resiliência contra tensão desvio com aplicação de energia modificada



(fonte: MEDINA; MOTTA, 2005)

Em seus estudos, Souza (2007) gerou modelos de módulo de resiliência para solos lateríticos do Pará usados em base e sub-base, sendo eles apresentados na tabela 21 com resultados gerados pelas tensões pré-estimadas.

Tabela 21 – Módulos de resiliência de pedregulhos lateríticos da região Norte

Camada	Modelo	MR (MPa)
Base	$MR = 970,99 * \sigma_d^{0,1543}$	447,11
Sub-base	$MR = 876,72 * \sigma_d^{0,1539}$	431,58

(fonte: elaborado pela autora)

Cavalcante et al. (2007) apresenta resultados gerados a partir de solos do Ceará e, considerando a falta de dados da região Norte, usou-se esse trabalho para a estimativa da propriedade do subleito, que estão presentes na tabela 22



Tabela 22 – Módulos de resiliência de pedregulhos lateríticos

σ_d (Mpa)	MR (MPa)	σ_d (Mpa)	MR (MPa)
0,02	336,41	0,07	261,83
0,04	266,73	0,13	208,64
0,06	221,59	0,20	198,33
0,03	288,91	0,10	264,97
0,07	247,99	0,20	238,76
0,10	175,37	0,30	242,79
0,05	275,37	0,13	310,30
0,10	193,13	0,27	282,92
0,15	185,67	0,40	268,60

(fonte: elaborado pela autora)

Observando todos os módulos levantados da bibliografia referida, formou-se a estrutura 7 representativa da região Norte, como mostra a figura 17.

Figura 17 – Estrutura 7 representativa da região Norte

	CUBQ 5 - 20 cm MR: 5.000 e 3.000 MPa
	Pedregulho Laterítico 20 cm MR: 440 MPa
	Pedregulho Laterítico 20 cm MR: 440 MPa
	Pedregulho Laterítico ~ MR: 233 MPa

(fonte: elaborado pela autora)

5.1.2.4.2 Estrutura 8

Por ser pedregulho laterítico seu material de base/ sub-base, como na estrutura 7, o módulos de resiliência foi considerado o mesmo, 440 MPa. Já para o subleito, tem-se o solo argiloso, o qual teve seu módulo de resiliência referido no material estudado por Rebelo et al. (2014) originário de Coari, AM, exposto na tabela 23.





Com seus módulos conhecidos, pode-se definir a estrutura 8 representativa da região Norte, conforme figura 18.

Tabela 23 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Norte

Cura (dias)	Corpo de Prova	Modelo	MR (Mpa)
0	com aeração	$MR=512,6*\sigma_3^{0,1988}*\sigma_d^{-0,0253}$	229,03
	sem aeração	$MR=419,2*\sigma_3^{0,3754}*\sigma_d^{-0,0657}$	98,98
7	com aeração	$MR=1305*\sigma_3^{0,1263}*\sigma_d^{0,117}$	438,88
	sem aeração	$MR=1133*\sigma_3^{0,153}*\sigma_d^{0,1553}$	285,32

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 18 – Estrutura 8 representativa da região Norte

	CUBUQ 5 - 20 cm MR: 5.000 e 3.000 MPa
	Pedregulho Laterítico 20 cm MR: 440 MPa
	Pedregulho Laterítico 20 cm MR: 440 MPa
	Solo Argiloso ~ MR: 362 MPa

(fonte: elaborado pela autora)

5.1.2.5 Estruturas Representativas da Região Nordeste

Por último, tem-se a região Nordeste, onde suas estruturas representativas são apresentadas abaixo, utilizando os materiais já previamente selecionados.

5.1.2.5.1 Estrutura 9

Em suas pesquisas, Araújo (2009) analisou solos argilosos do Ceará e como o subleito dessa estrutura representativa é do mesmo material, utilizou-se seus resultados, presentes na tabela 24, para definição do módulo de resiliência.

Tabela 24 – Módulos de resiliência de solos argilosos da região Nordeste

Amostra	Modelo	MR (MPa)
A	$MR = 136,3 * \sigma_d^{-0,13}$	239,71
B	$MR = 179,8 * \sigma_d^{-0,1}$	277,58

(fonte: elaborado pela autora)

Já a base/ sub-base tem seu material em solo-brita, o qual tem seu módulo de resiliência examinado através dos resultados de Benevides (2000), os quais estão apresentados na tabela 25, sendo esse solo também de origem do Ceará com a proporção de 60% - 40%.





Tabela 25 – Módulos de resiliência de solo-brita da região Nordeste

Trecho	Modelo	MR (MPa)
CE-060-Pajuçara- Pacatuba	$MR = 968,57 * \sigma_3^{0,3021}$	297,08
Ce-040-Messejana-Aquiraz	$MR = 1111,6 * \sigma_3^{0,4429}$	196,55
BR-116-Fortaleza - Pacajús	$MR = 1430,3 * \sigma_3^{0,6259}$	123,61

(fonte: elaborado pela autora)

Com os módulos de resiliência baseado nas informações anteriores, estimou-se a estrutura 9 representativa da região Nordeste de acordo com a figura 19.

Figura 19 – Estrutura 9 representativa da região Nordeste

	CUBQ 5 - 20 cm MR: 5.000 e 3.000 MPa
	Solo-brita 20 cm MR: 233 MPa
	Solo-brita 20 cm MR: 233 MPa
	Solo Argiloso ~ MR: 254 MPa

(fonte: elaborado pela autora)

5.1.2.5.2 Estrutura 10

Como a base/ sub-base dessa estrutura representativa também é de solo-brita, o módulo de resiliência foi estimado no mesmo valor anterior, 233 MPa, dadas tais referências. O subleito, por outro lado, tem seu material de solo arenoso, logo se buscou esse parâmetro na pesquisa de Sant'ana (2009) com solos originários do Maranhão, sendo esses resultados adequados à estrutura em questão e formaram a tabela 26.

Assim com ambos os módulos de resiliência estudados, definiu-se a estrutura 10 representativa da região Nordeste, apresentada na figura 20.

Tabela 26 – Módulos de resiliência de solo arenoso da região Nordeste

Amostra	Modelo	MR (MPa)
90	$MR = 24,8 * \sigma_3^{0,5248}$	119,46
160	$MR = 114,8 * \sigma_3^{0,2558}$	247,03
227	$MR = 39,2 * \sigma_3^{0,4673}$	158,95
278	$MR = 15,2 * \sigma_3^{0,6229}$	98,23
335	$MR = 37,6 * \sigma_3^{0,4812}$	158,94
449	$MR = 37,0 * \sigma_3^{0,4706}$	151,52

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 20 – Estrutura 10 representativa da região Nordeste

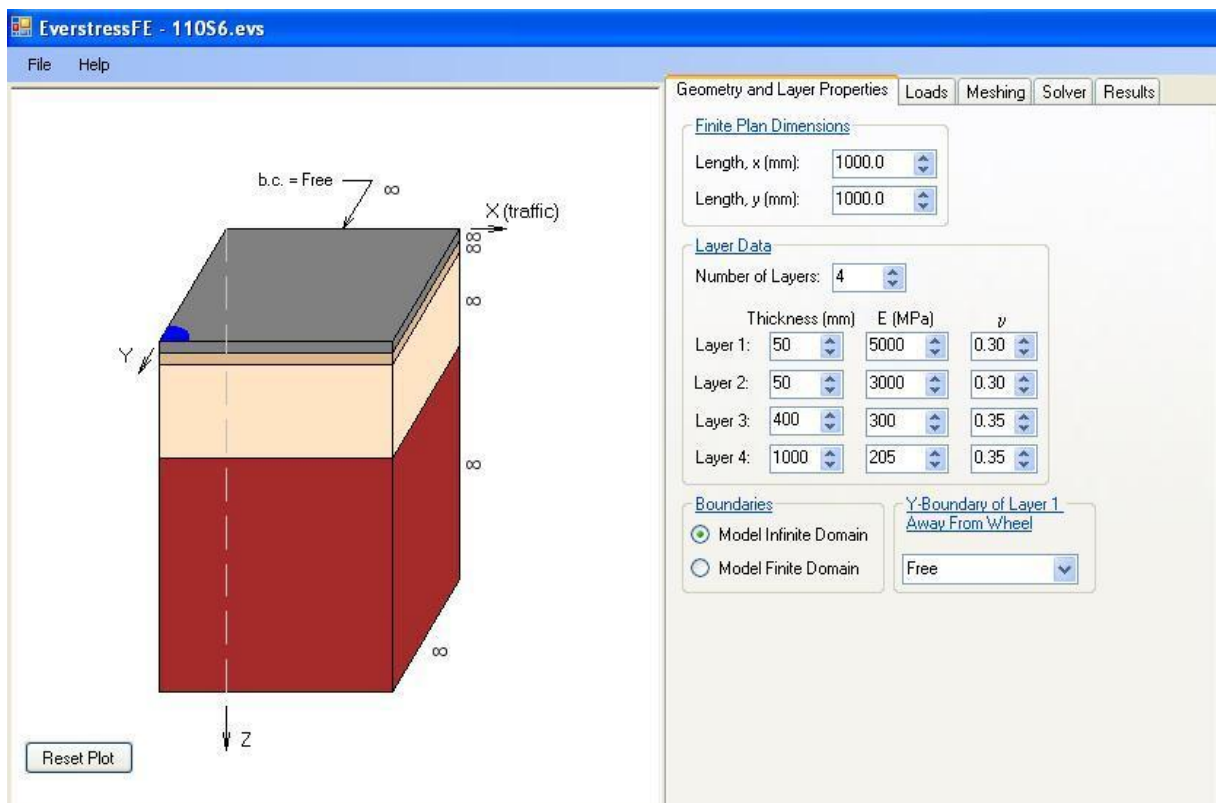
	<p>CBUQ</p> <p>5 - 20 cm</p> <p>MR: 5.000 e 3.000 MPa</p>
	<p>Solo-brita</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 233 MPa</p>
	<p>Solo-brita</p> <p>20 cm</p> <p>MR: 233 MPa</p>
	<p>Solo Arenoso</p> <p>~</p> <p>MR: 115 MPa</p>

(fonte: elaborado pela autora)

5.2 CÁLCULO DE DEFORMAÇÕES PELO PROGRAMA EVERSTRESS FE

Contendo as características de cada estrutura bem definida, assim como demais parâmetros necessários, iniciou-se a geração das tensões e deformação causadas pela aplicação das cargas pré-definidas. Primeiramente o programa solicita dados de entrada, conforme a figura 21, sobre a geometria e propriedades das camadas da estrutura analisada, como o número de camadas, sendo quatro o número máximo permitido, a espessura, o módulos de resiliência e o coeficiente de Poisson para cada uma.

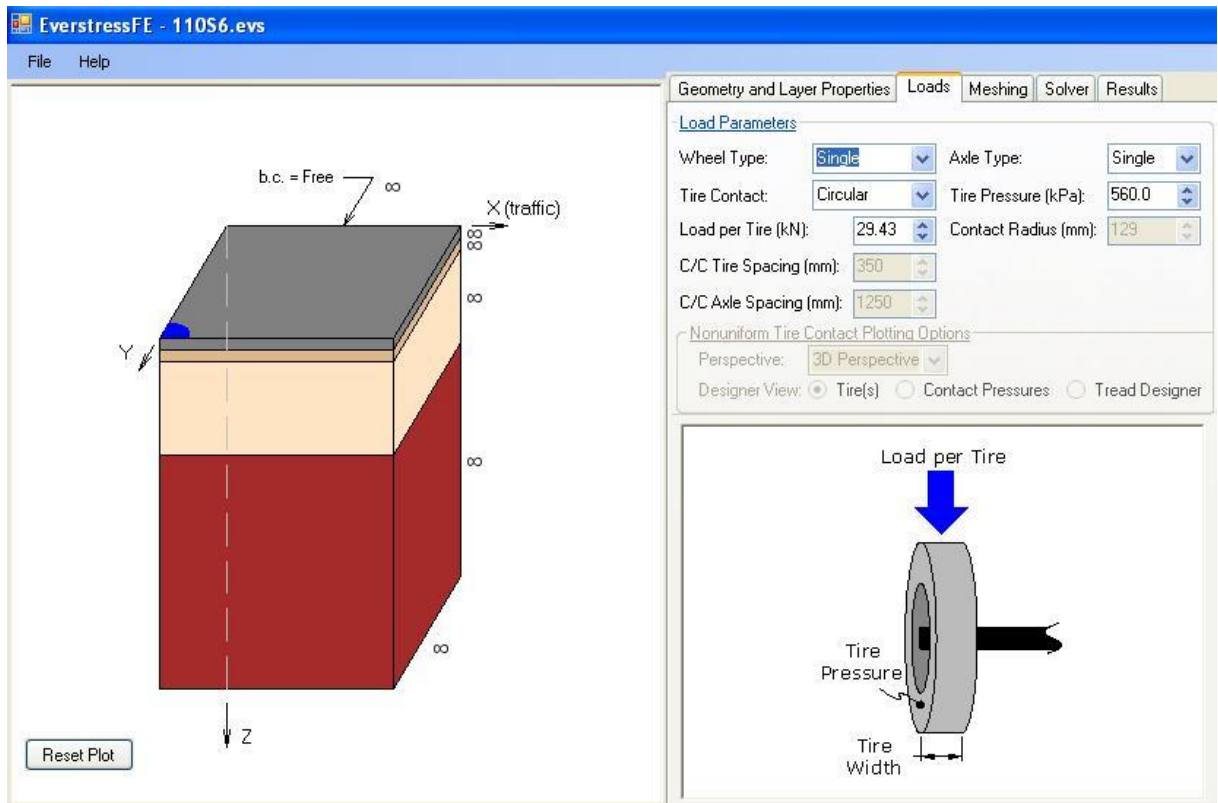
Figura 21 – Parâmetros de geometria e propriedades das camadas no EverStress FE



(fonte: EVERSTRESS FE, 2014)

Após, tem-se a entrada de dados relacionados à carga aplicada, como mostrado na figura 22, sendo eles o tipo de eixo, que nesse estudo é sempre simples, o tipo de rodas, simples ou dupla, o formato do contato do pneu, circular, a pressão do pneu, fixada em 560 kPa, e carga por pneu.

Figura 22 – Parâmetros de carga aplicada no EverStress FE

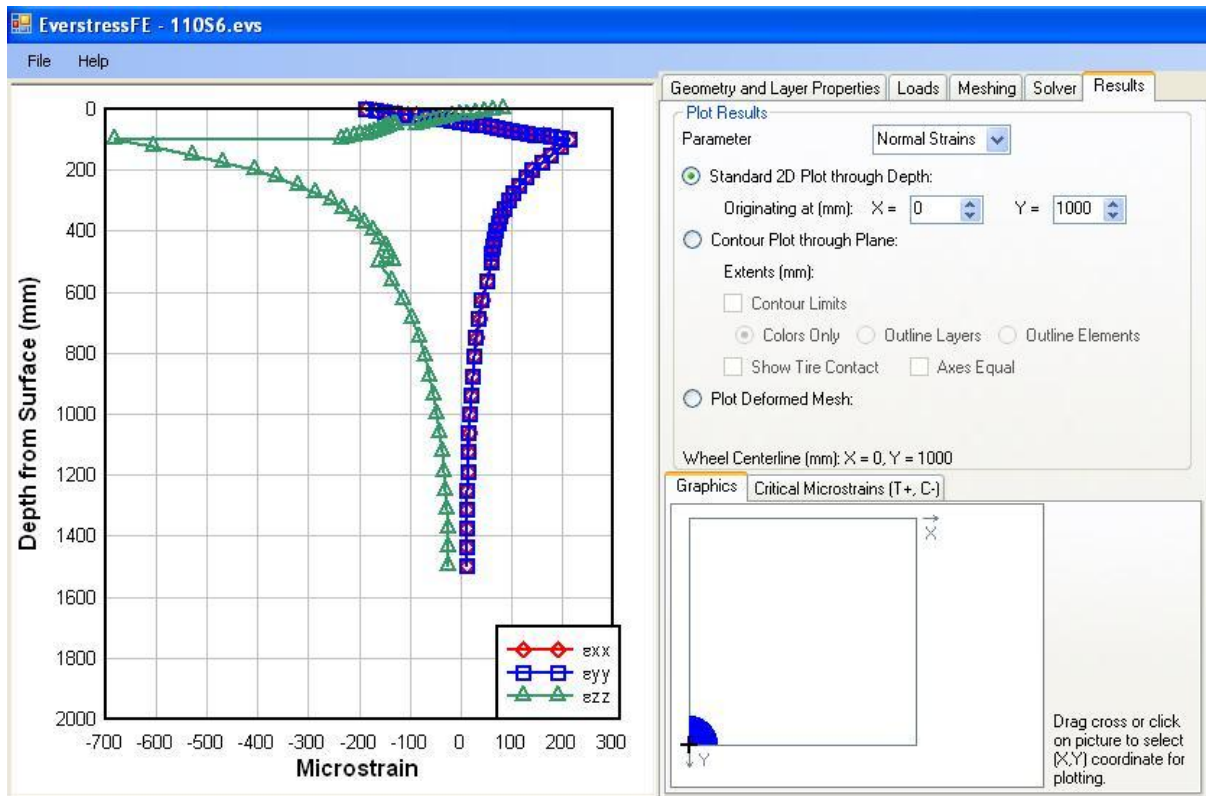


(fonte: EVERSTRESS FE, 2014)

Existe a possibilidade também de modificar a malha de análise, entretanto os dados padrões já atendem as necessidades do presente estudo, logo se mantiveram os mesmos.

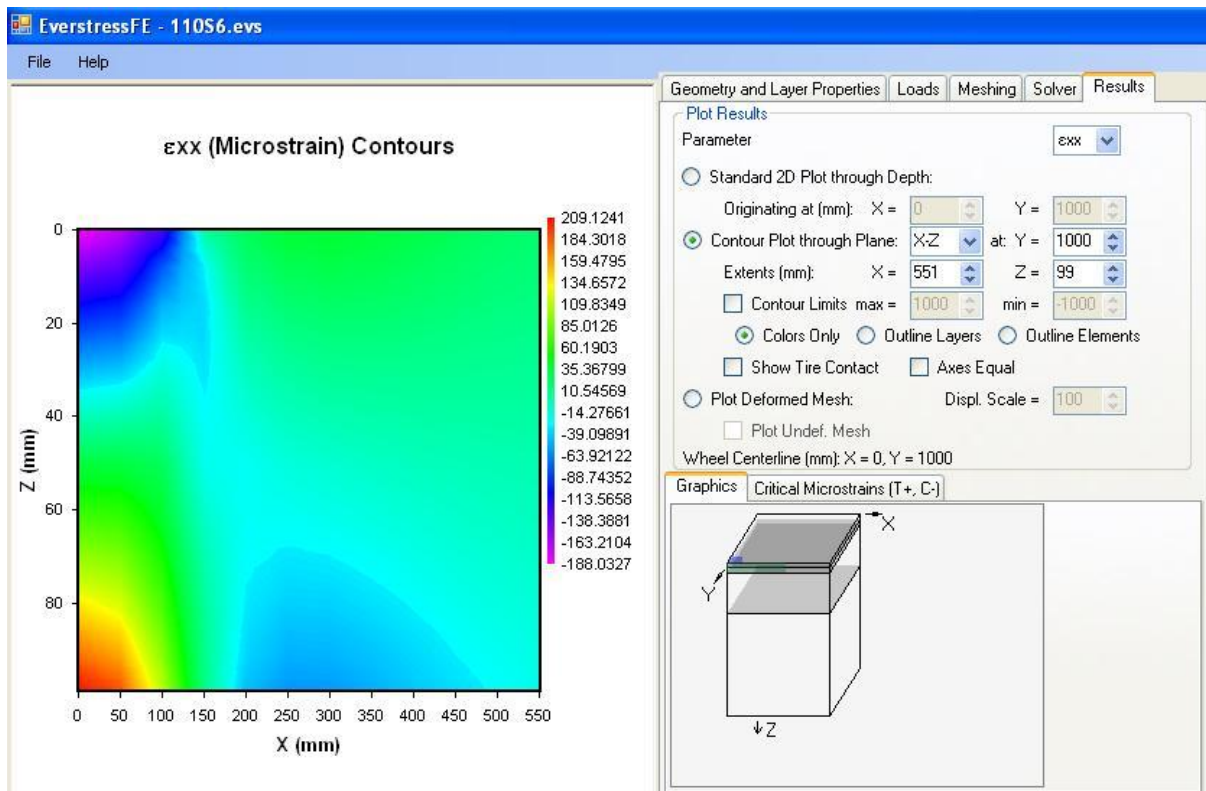
Com esses parâmetros definidos, roda-se o programa, gerando assim diferentes respostas de saída tanto gráficos como numéricos. Nesse trabalho, utilizou-se apenas os resultados de tensões normais, expressos no gráfico da figura 23, porém como se necessita de uma maior precisão, usou-se a saída numérica referente a esse gráfico, conforme a figura 24. Desse modo, variando o parâmetro entre ϵ_{xx} e ϵ_{yy} , na profundidade imediatamente antes do fim da última camada asfáltica, tem-se as tensões referentes à deformação resiliênte, estando localizado abaixo do pneu no ESRS e verificando o ponto de maior deformação gerada, entre os pneus ou abaixo, em ESRD. Esses dois valores são sempre o máximo expresso no gráfico por intensidade de cor que é apresentado, considerando sempre as tensões de tração que são as positivas.

Figura 23 – Saída em gráfico 2D no EverStress FE



(fonte: EVERSTRESS FE, 2014)

Figura 24 – Saída gráfica e numérica no EverStress FE



(fonte: EVERSTRESS FE, 2014)

Para cada estrutura teve-se a variação da espessura da camada asfáltica entre 5 e 20 cm e para cada uma dessas hipóteses aplicou-se cargas, partindo da legal até o excesso de 30% da mesma, em ESRS e ESRD. Com isso, gerou-se as planilhas presentes no apêndice A, que apresentam os dados de cada hipótese testada e as respostas de saída obtidas. No apêndice B, encontra-se os resultados encontrados também para o eixo padrão.

6 APLICAÇÃO DO MODELO DE VIDA DE FADIGA E ANÁLISE DE RESULTADOS

Para a avaliação dos efeitos gerados pela aplicação da carga legal e seus excedentes é necessário um meio de normalização dos resultados já obtidos. O mecanismo que é utilizado no presente estudo é a vida de fadiga, onde se usa as tensões horizontais obtidas na posição imediatamente anterior ao fim da camada asfáltica como entrada no modelo, gerando, assim, número de aplicações necessário para diminuir a rigidez do pavimento. Então, fez-se análises e comparação do ocorrido nas estruturas estudadas em relação à carga padrão e aos excessos aplicados, assim como a comparação dessa com o eixo padrão, sendo esses procedimentos explicados a seguir.

6.1 MODELO DE VIDA DE FADIGA

Dentre os diversos modelos de vida de fadiga, o método mecanístico da República da África do Sul foi o aplicado nesse trabalho, pois, além de considerar a tensão gerada, ainda tem como meio de análise o nível de serviço das rodovias, de A a D, e o módulo de resiliência da camada asfáltica, de 1.000 a 8.000 MPa, segundo Theyse et al. (1996). Esse método fica definido pela equação 6, sendo suas variáveis A e B determinadas nesse estudo através da classe B de rodovia e do módulo de resiliência de 5.000 MPa para espessuras do revestimento de 5 cm e de 3.000 Mpa para as demais, já que é o módulo da camada na profundidade da análise das tensões. Esses parâmetros são delineados através da tabela 27, conforme indicado por Theyse et al. (1996).

$$N_f = 10^{A\left(1 - \frac{\log \varepsilon_h}{B}\right)} \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

N_f = vida de fadiga;

ε_h = tensão horizontal, (μs);

A, B = variáveis dependentes do módulo de resiliência e da classe da rodovia.

Tabela 27 – Variáveis do modelo de vida de fadiga do método mecanístico da Republica da África do Sul

Módulo de Resiliência (MPa)	Categoria da Rodovia	A	B
3000	A	15,78	3,334
	B	16,11	3,403
	C	16,26	3,435
	D	16,68	3,524
5000	A	15,52	3,317
	B	15,73	3,362
	C	15,83	3,383
	D	16,10	3,441

(fonte: adaptado de THEYSE et al., 1996)

No modelo definido, aplicou-se as tensões já calculadas, gerando assim a vida de fadiga do pavimento dada a carga aplicada. Para fazer uma melhor comparação das reações de aplicação de cargas com excesso em relação à carga legal, normalizou-se esses resultados, sendo apresentados nas planilhas do apêndice A. Essa normalização ocorreu também em função do eixo padrão podendo assim analisar o fator de equivalência gerado, estando as planilhas geradas no apêndice B.

6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

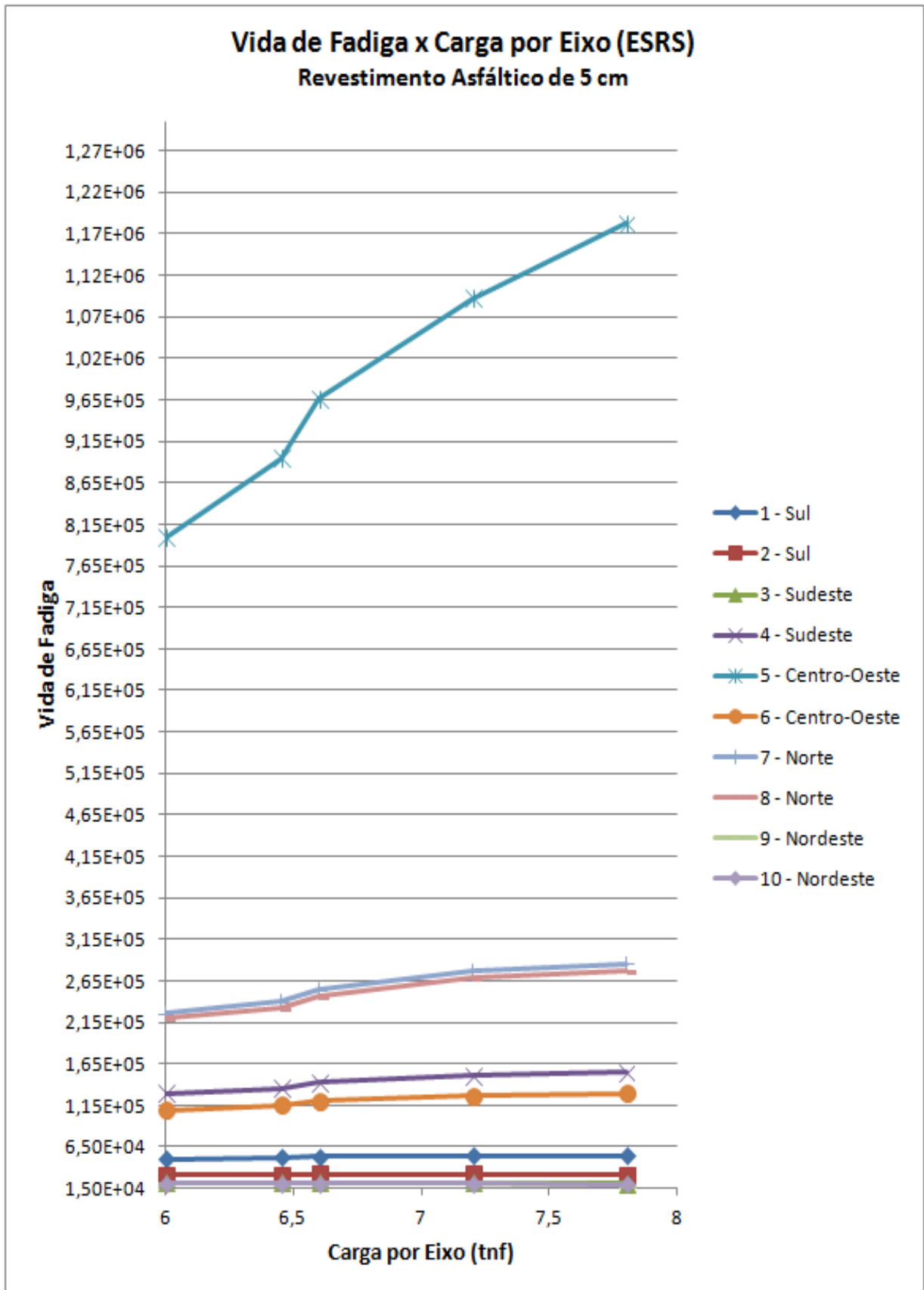
O trabalho objetiva analisar os efeitos causados pelo excesso de carregamento nos veículos de carga usando a vida de fadiga como parâmetro para isso. Gerou-se, portanto, uma série de gráficos nos quais se pôde avaliar diferentes pontos nessa pesquisa.

Considerando que se estudou as dez estruturas com a variação da espessura do revestimento asfáltico de cada uma delas, apresenta-se os resultados da vida de fadiga contra a carga aplicada para cada espessura de revestimento, podendo assim se ter uma visão geral dos comportamentos. Através das figuras 25 a 32, percebe-se que as estruturas reagiram de forma diferente umas das outras, como a estrutura 5 que apresenta a maior vida de fadiga perante as demais e a estrutura 10 a menor, ocorrendo isso para todas as espessuras de revestimento. O fato de umas estruturas serem mais duráveis que outras está fortemente relacionado com o módulo de resiliência dos materiais, sendo a combinação desses muito importante.

Comparando os resultados entre as diferentes espessuras, percebe-se a relação que quanto mais espessa a camada asfáltica maior é a vida de fadiga, pois as tensões que chegam ao ponto inferior do revestimento são menores, considerando que o trajeto pelo CBUQ é maior.

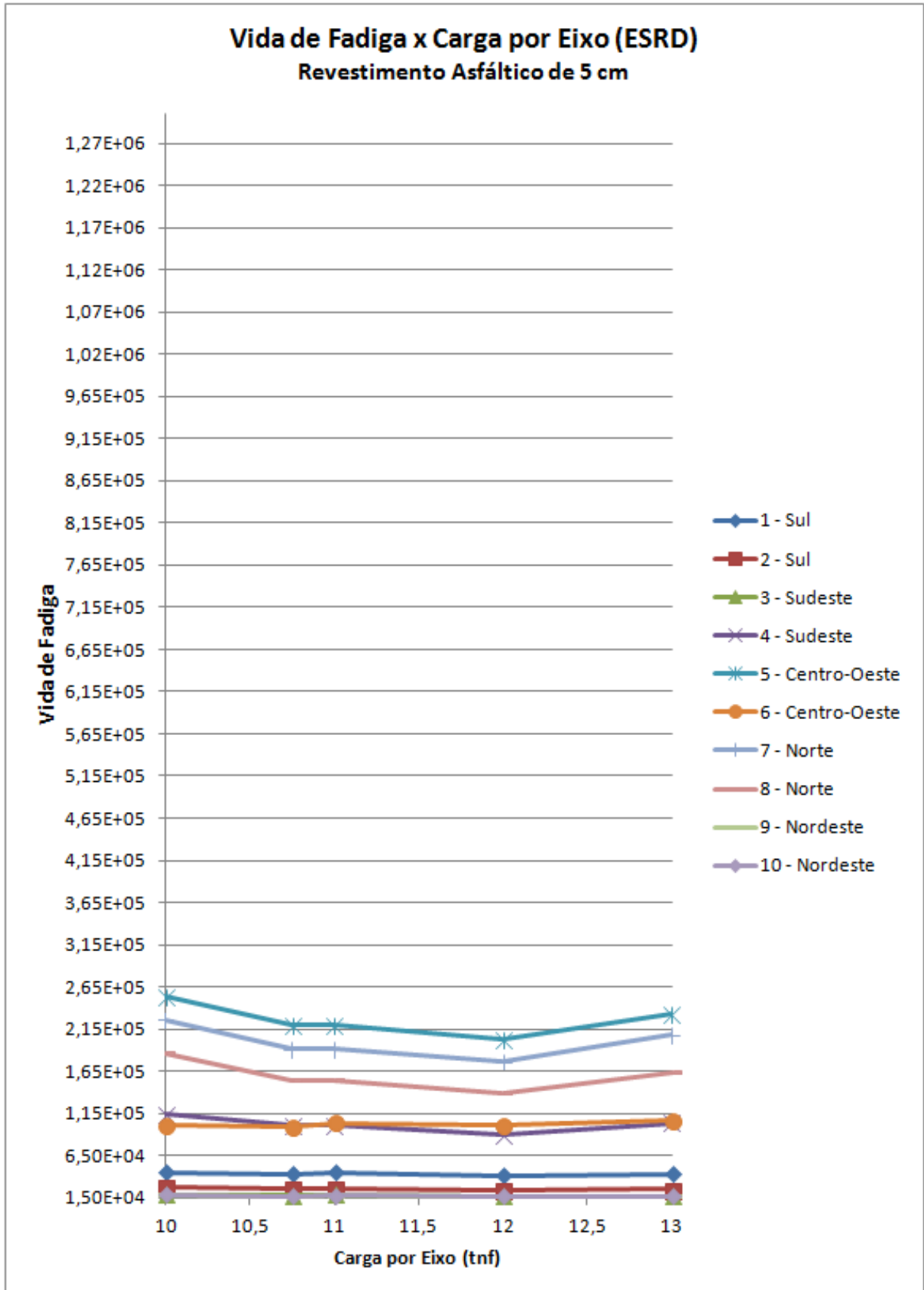
Já o efeito entre os dois tipos de eixos analisados apresentou relação diferente para cada espessura da camada asfáltica. Para o pavimento com 5 cm de revestimento, o ESRS não danificou a estrutura com o aumento da carga e até apresentou um aumento relativo na vida de fadiga, enquanto o ESRD deteriorou, porém bem pouco. Com a camada asfáltica de 10 cm, os dois tipos de eixos apresentaram decaimento no parâmetro analisado e em relação da aplicação da carga legal não apresenta um comportamento padrão, porém, quando há um excesso de carga, para aplicação através do ESRD os valores são menores que os ocorridos para ESRS. Nos pavimentos com 15 cm e 20 cm de revestimento, o ESRS apresentou valores maiores para a vida de fadiga, mesmo com a aplicação do excesso de carga.

Figura 25 – Gráficos da vida de fadiga *versus* carga aplicada por ESRS para revestimento de 5 cm



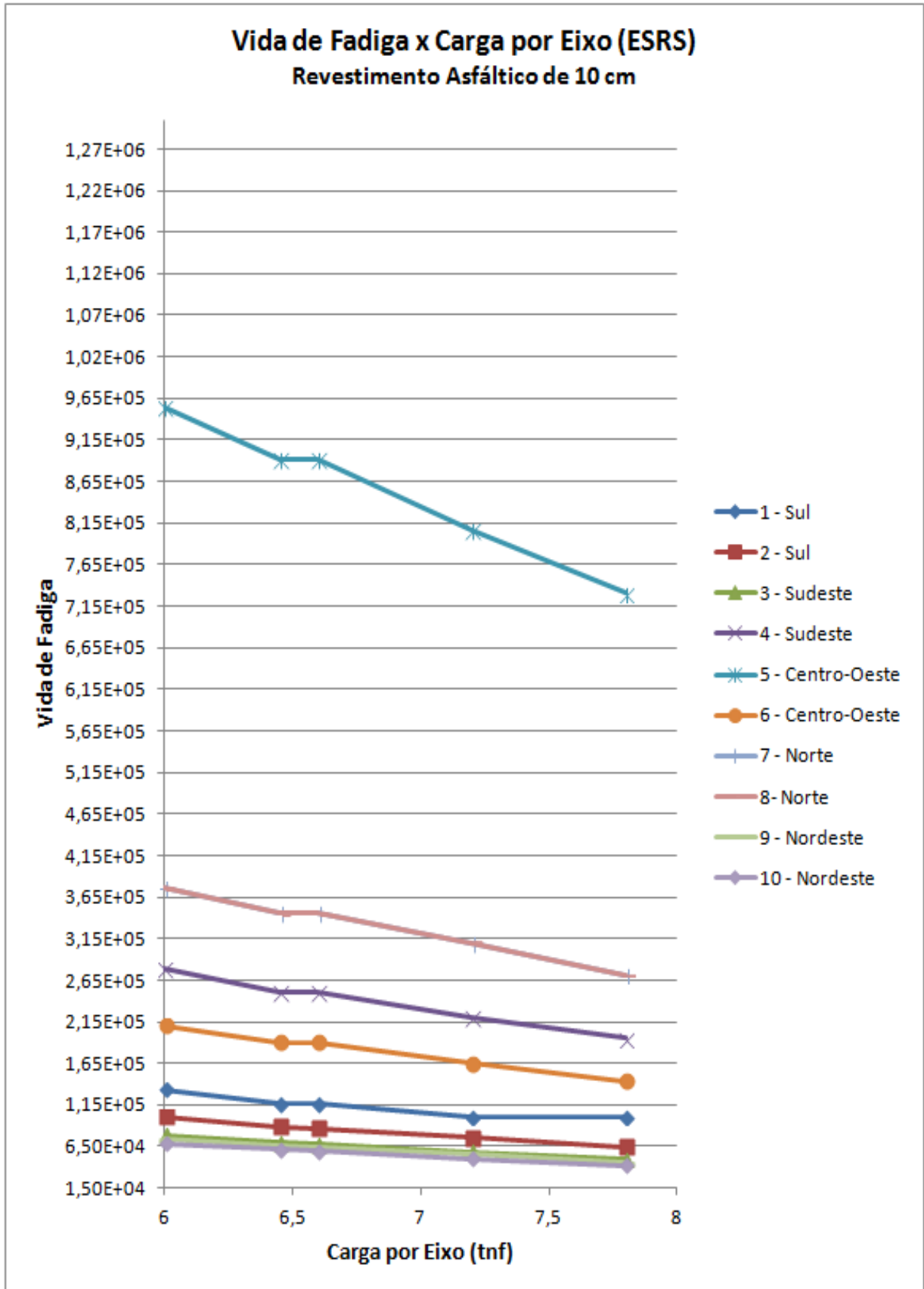
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 26 – Gráficos da vida de fadiga *versus* carga aplicada por ESRD para revestimento de 5 cm



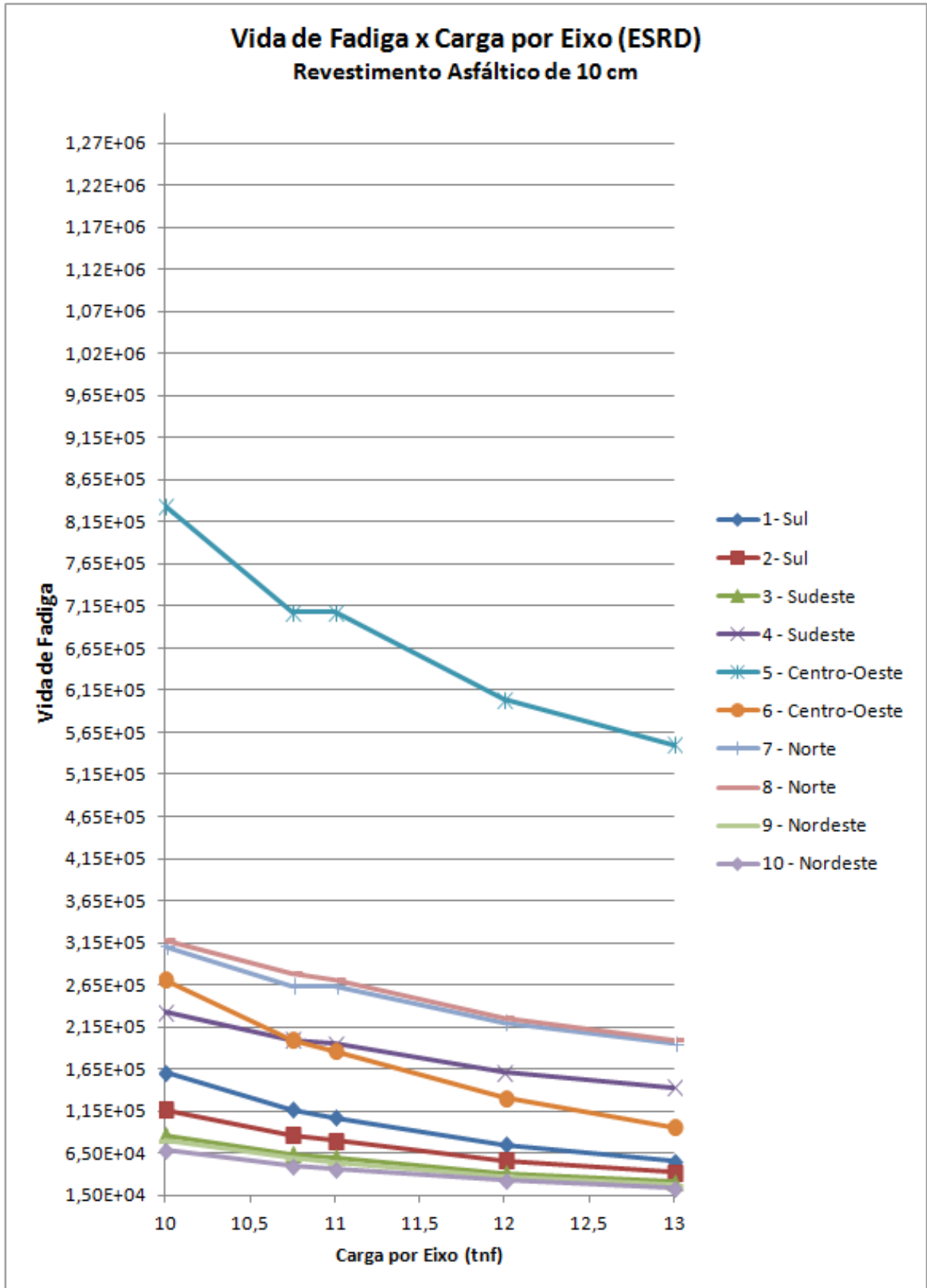
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 27 – Gráficos da vida de fadiga *versus* carga aplicada por ESRS para revestimento de 10 cm



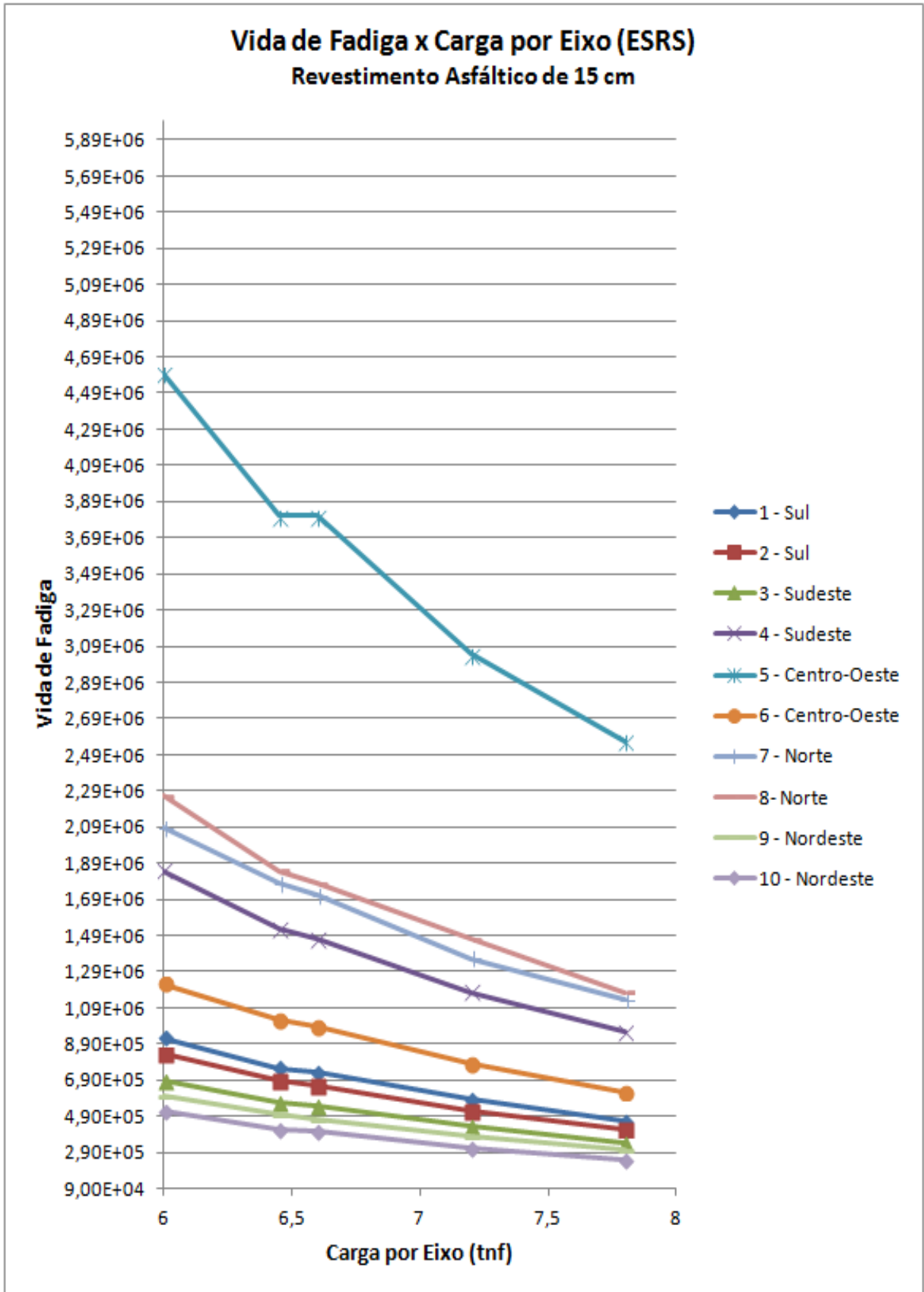
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 28 – Gráficos da vida de fadiga *versus* carga aplicada por ESRD para revestimento de 10 cm



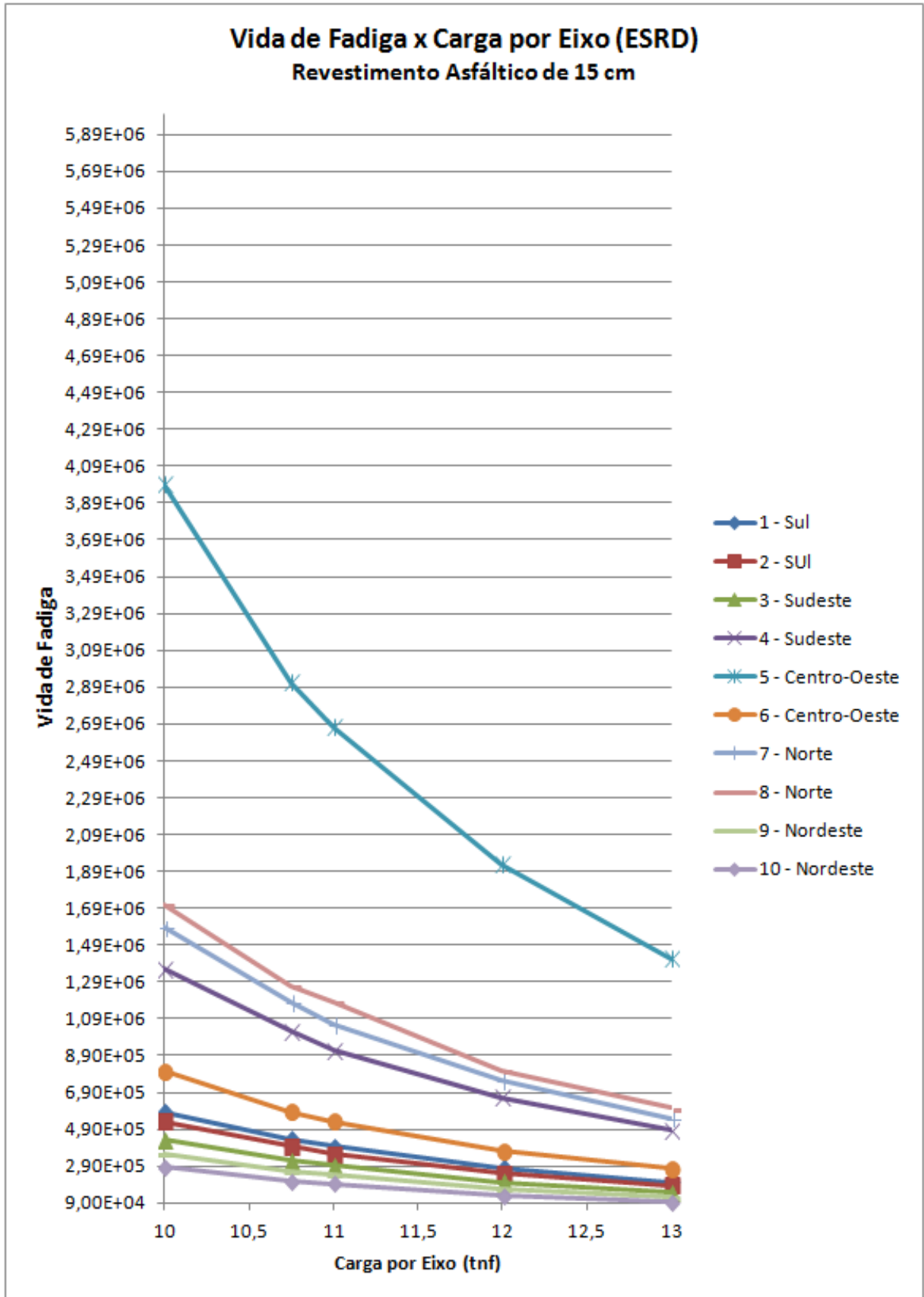
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 29 – Gráficos da vida de fadiga *versus* carga aplicada por ESRS para revestimento de 15 cm



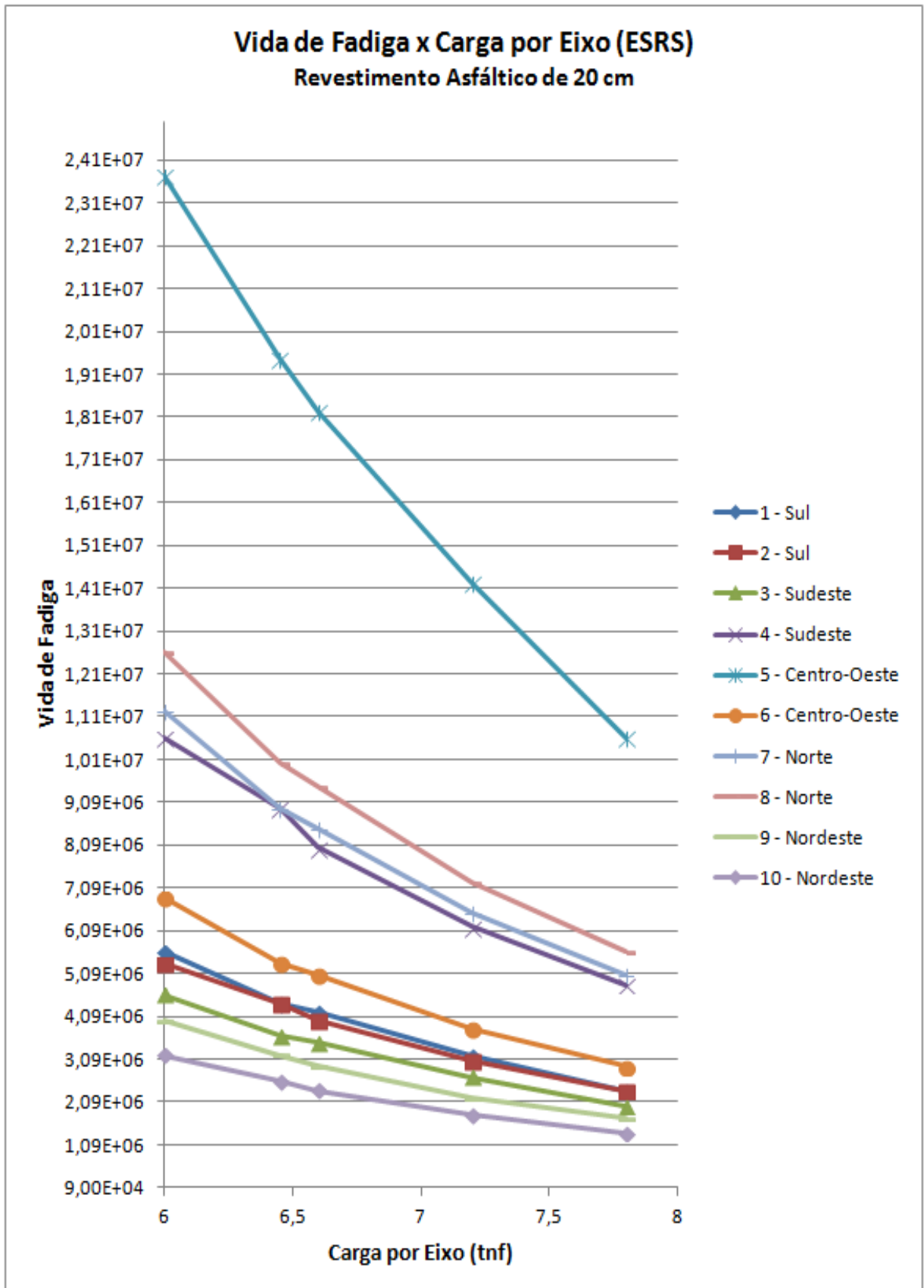
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 30– Gráficos da vida de fadiga *versus* carga aplicada por ESRD para revestimento de 15 cm



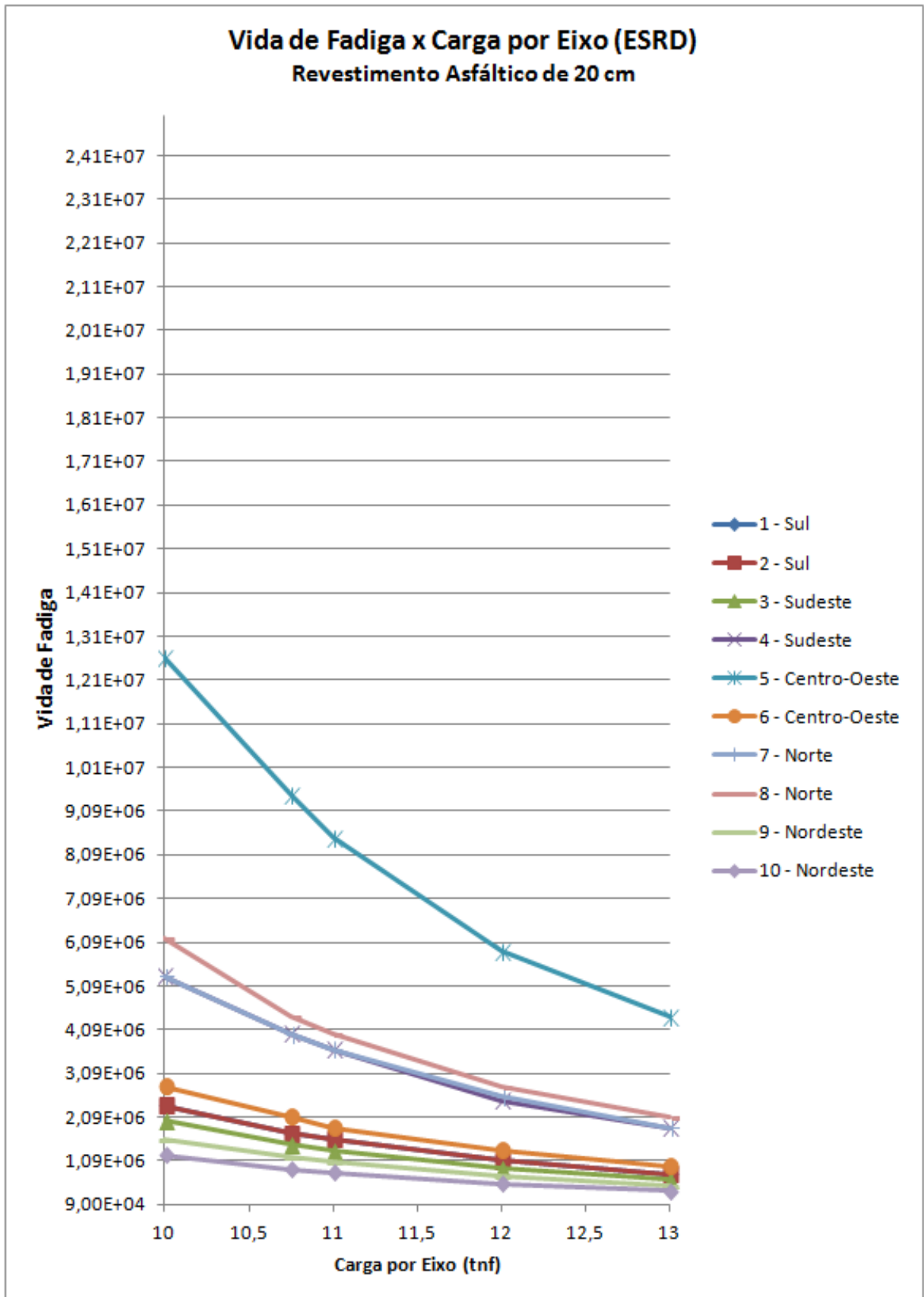
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 31 – Gráficos da vida de fadiga *versus* carga aplicada por ESRS para revestimento de 20 cm



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 32 – Gráficos da vida de fadiga *versus* carga aplicada por ESRD para revestimento de 20 cm

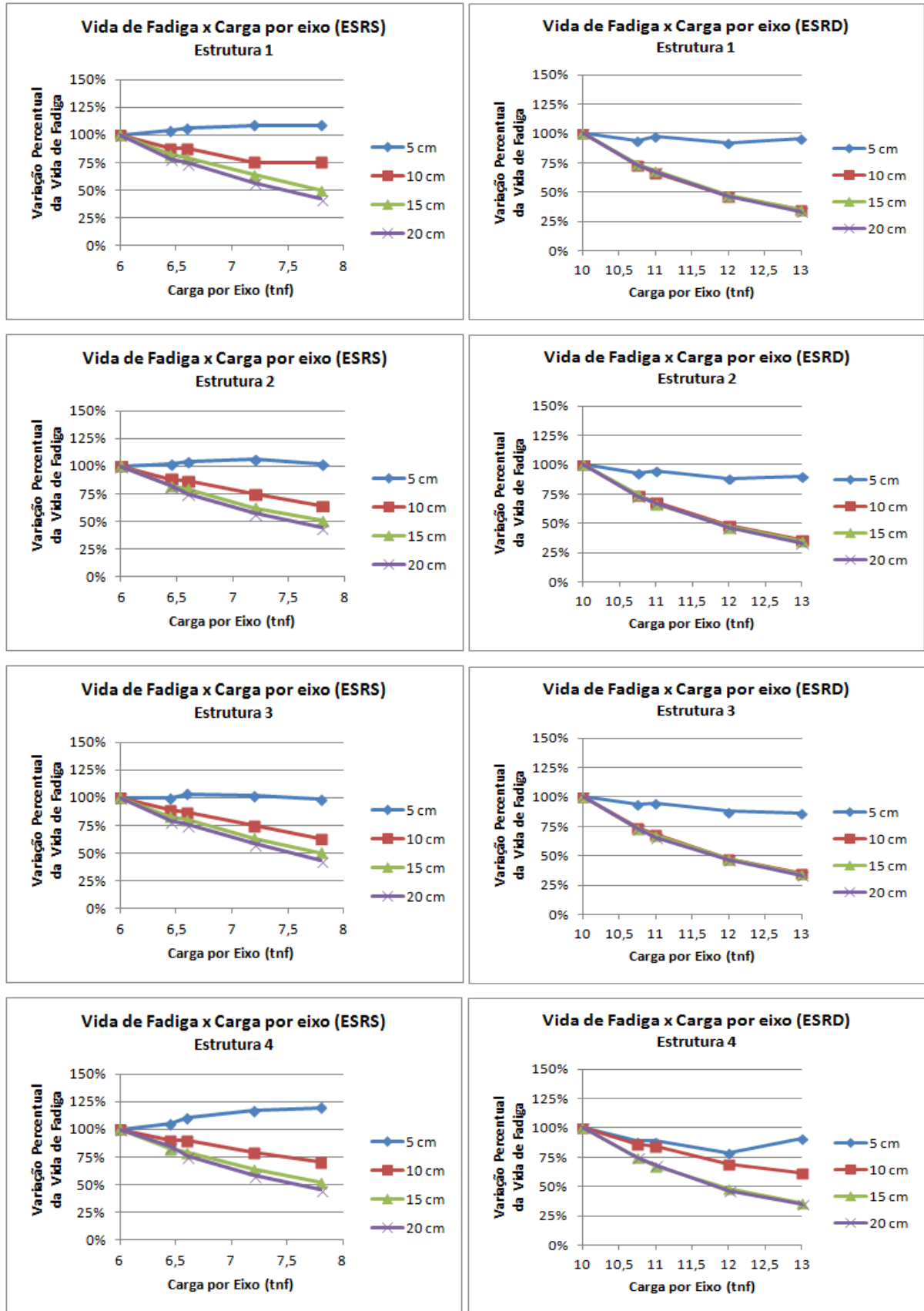


(fonte: elaborado pela autora)

Normalizando os valores gerados pelo excesso de carga com o valor gerado pela carga legal, sendo esse último considerado 100% de vida de fadiga, os demais apresentam então a variação ocorrida em relação a esse ponto. Com uma análise geral, destaca-se que o ESRD apresenta uma redução maior na vida de fadiga que o ESRS.

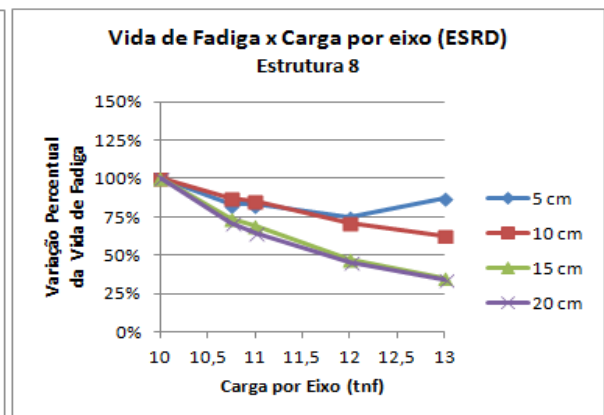
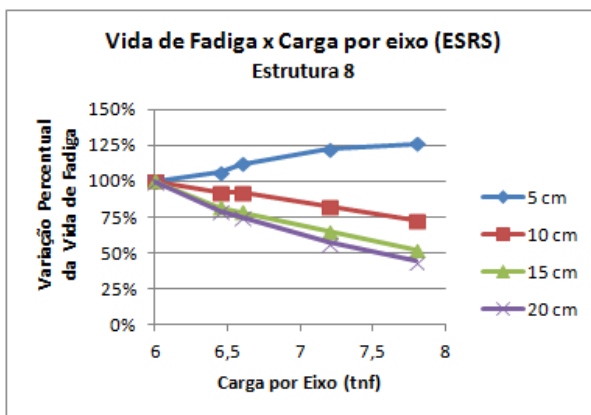
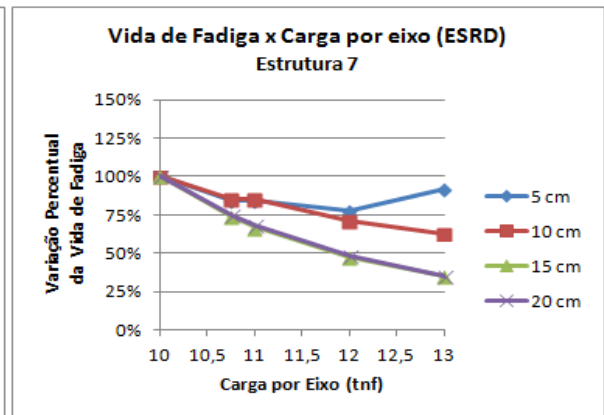
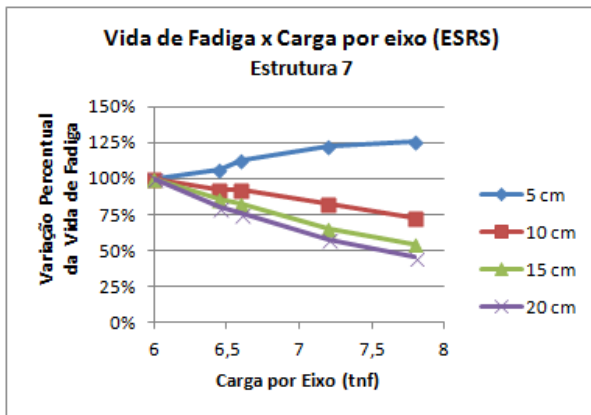
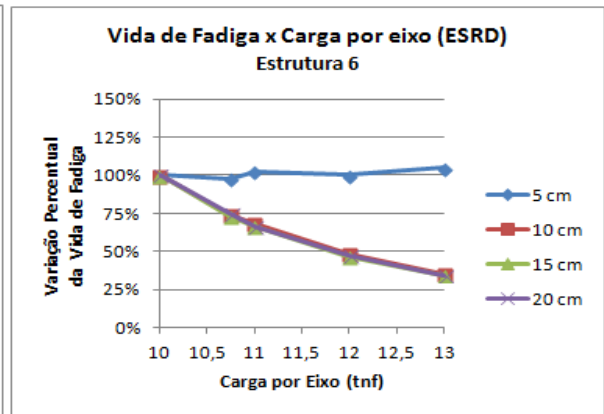
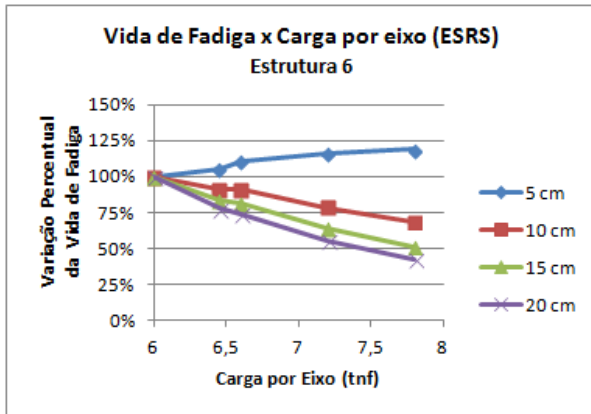
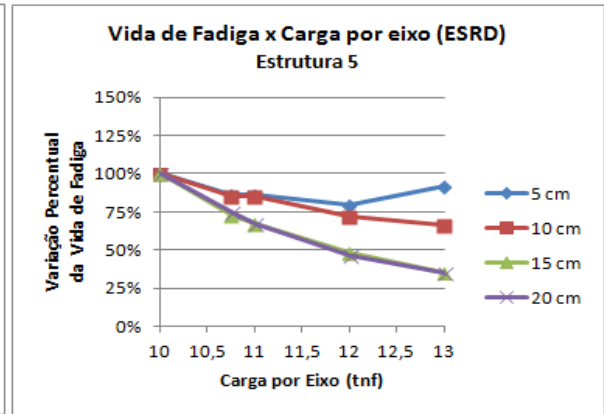
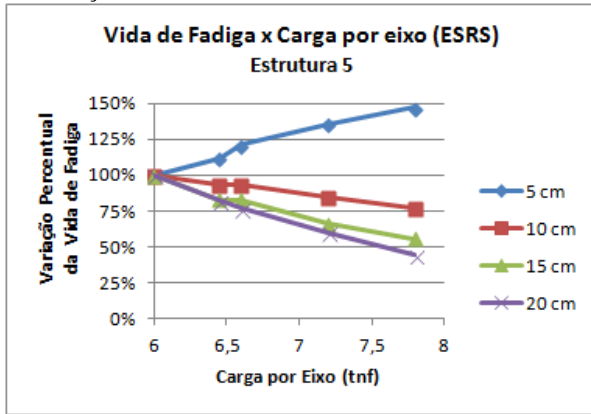
Perante a figura 33, percebe-se que para ESRS a aplicação de carregamento em excesso gera uma relação direta onde a diminuição da vida de fadiga é maior quanto maior a espessura da camada de revestimento, destacando que para o revestimento de 5 cm ocorre um aumento da vida de fadiga. Nesse mesmo caso, as estruturas, independentemente dos seus materiais, comportam-se de forma semelhante, porém não são iguais. Nota-se que para ESRD a variação é irrelevante nas curvas geradas dos revestimentos de 15 cm e 20 cm., podendo ser considerada a mesma independentemente do material que todo o pavimento é constituído. Em relação ao mesmo eixo, para camadas asfálticas de 10 cm o comportamento não foi padrão, tendo em certas estruturas a mesma curva que as espessuras já comentadas e em outros uma redução menor que as mesmas. Como exceção, o revestimento de 5 cm apresenta reduções bem menores na maioria dos casos analisados.

Figura 33 – Gráficos de vida de fadiga *versus* carga aplicada por estrutura



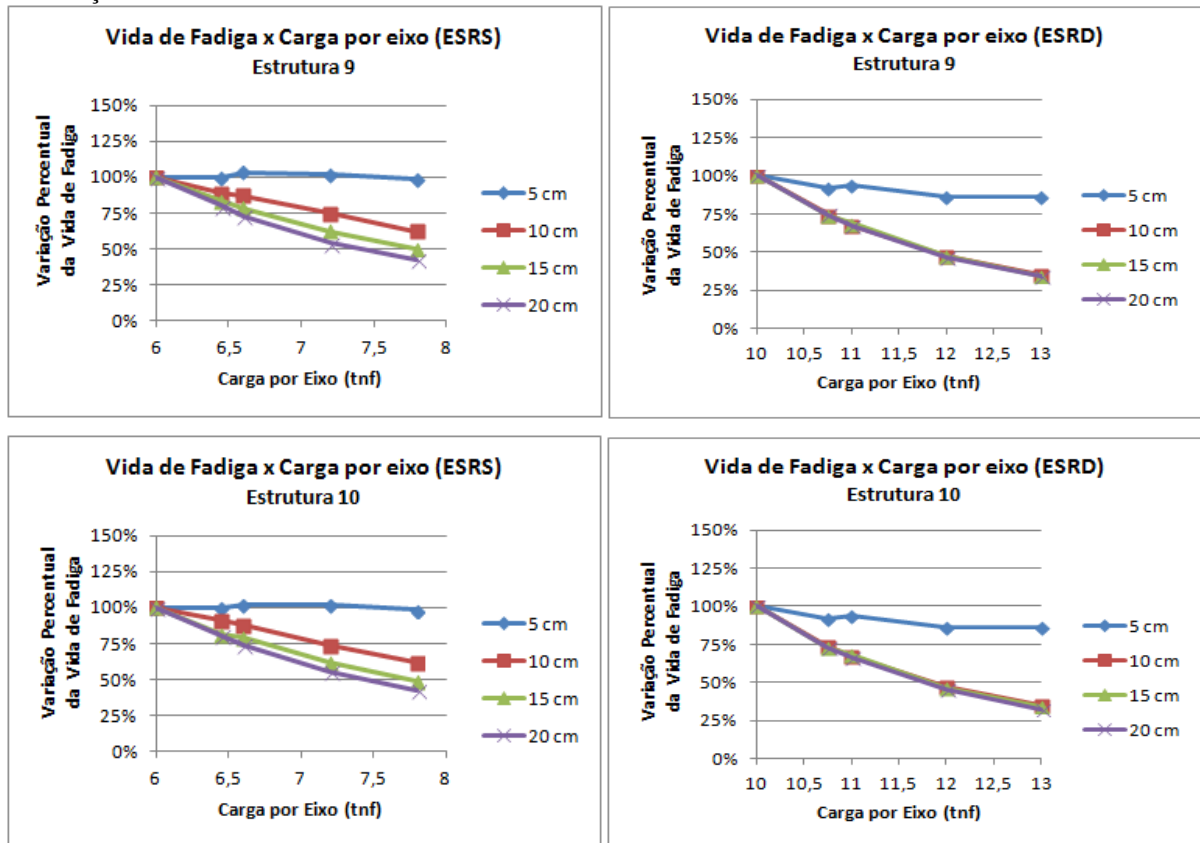
continua

continuação



continua

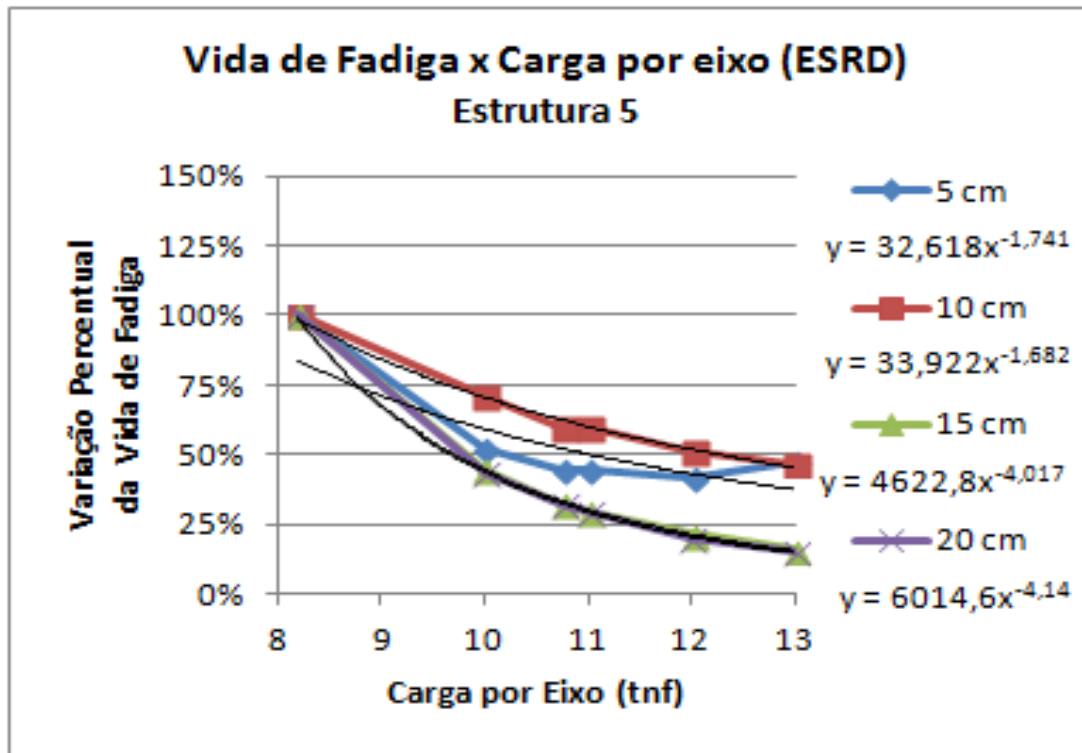
continuação



(fonte: elaborado pela autora)

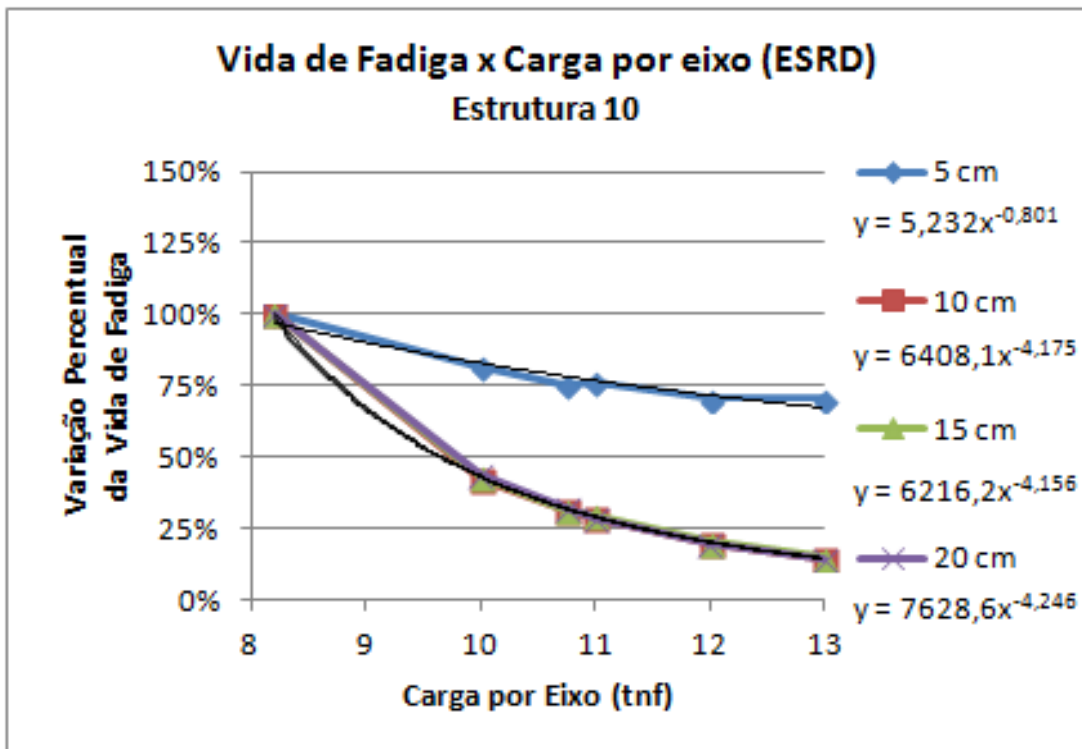
Com os resultados apresentados no apêndice B, gerou-se os gráficos das figuras 34 e 35, que apresentam a normalização dos valores de vida de fadiga calculados em função da carga legal e seus excedentes com a vida de fadiga gerada pelo eixo padrão, sendo esse o valor considerado 100%. Apresentou-se apenas os gráficos gerados para as duas estruturas com o comportamento mais extremos, a estrutura 5 e 10, nos quais se aplicou a linhas de tendência potenciais nas curvas geradas e assim descobriu-se as equações correspondentes. Através disso, fica claro que cada estrutura apresentou um fator de potência diferenciado, variando entre menos de 1 até mais de 4, contrapondo os fatores apontados pela ASSTHO e pelo USACE, os quais fixam esses valores não considerando os materiais e as espessuras dos pavimentos.

Figura 34 – Gráficos da vida de fadiga carga aplicada por ESRD na estrutura 5 com suas linhas de tendência e respectivas equações



(fonte: elaborado pela autora)

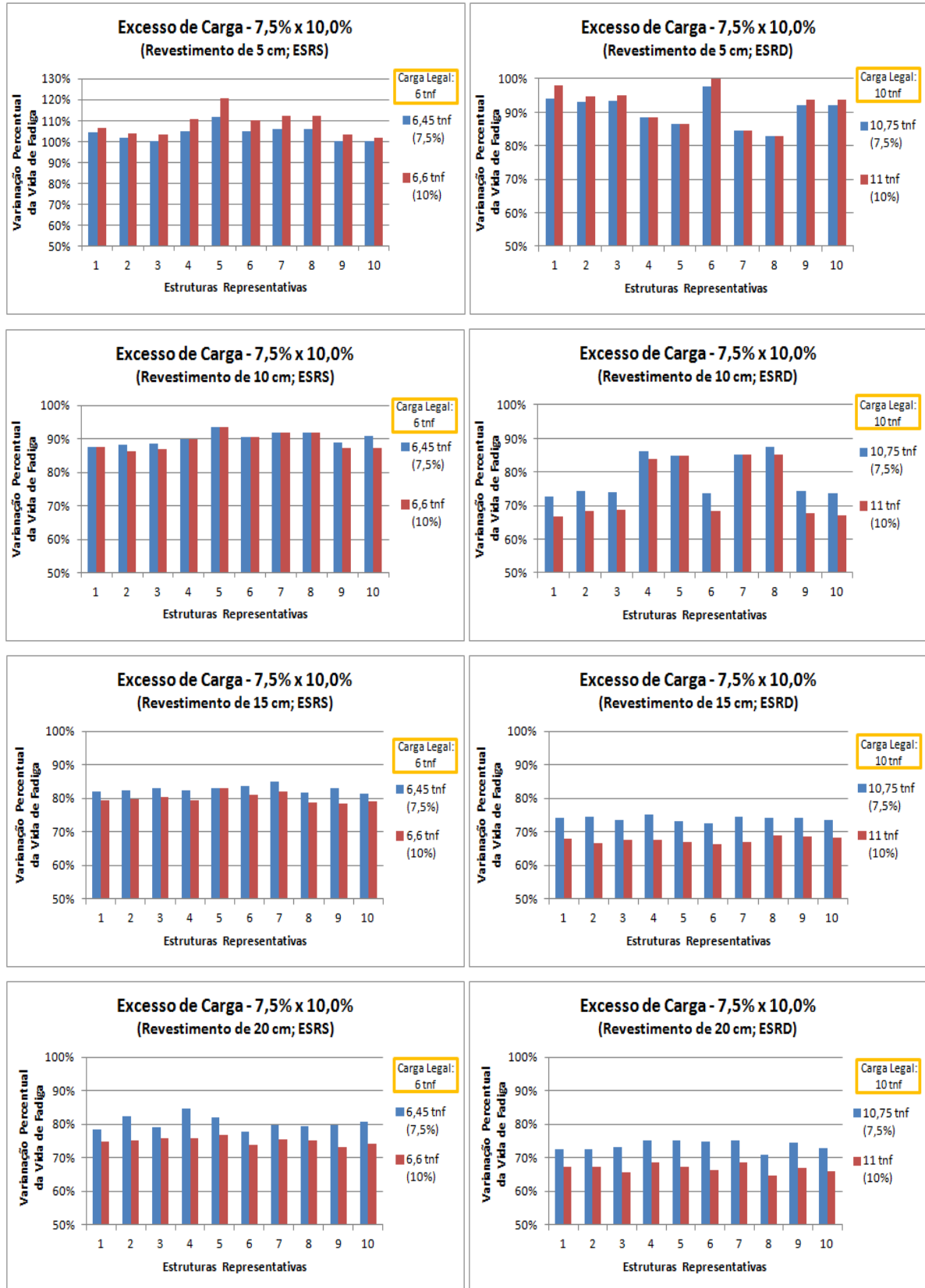
Figura 35 – Gráficos da vida de fadiga carga aplicada por ESRD na estrutura 10 com suas linhas de tendência e respectivas equações



(fonte: elaborado pela autora)

Como o excesso de carga tolerado foi modificada durante o presente trabalho de 7,5% para a possibilidade de chegar a 10% da carga legal, analisou-se também as consequências que isso gerou. Analisando isso, então, percebe-se através da figura 36 que para ESRS a diminuição da vida de fadiga com a aplicação de carga 10% excedida fica um pouco mais acentuada para o revestimento de 20 cm, tendo as espessuras de 15 cm e 10 cm valores não tão destoantes e para 5 cm tem-se o efeito benevolente. Já para ESRD essa redução é identificada em todas as espessuras de revestimentos, sendo maior quanto maior a espessura. Nota-se, entretanto, que essa redução não chega a 10%.

Figura 36 – Comparação do aumento no excesso de carga legal em relação a vida de fadiga em relação a vida de fadiga



(fonte: elaborado pela autora)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a análise feita nas duas estruturas representativas de cada região brasileira, Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste, sob aplicação da carga legal e excedentes a essa em 7,5 %, 10%, 20% e 30% através de eixos simples de rodas simples e duplas, tendo a camada de revestimento variando de 5 cm, 10 cm, 15 cm e 20 cm, chegou-se as constatações apresentadas ao longo desse capítulo, tendo o parâmetro vida de fadiga como mecanismo de análise.

Conforme observado anteriormente, aplicando-se carga nas estruturas, em função de suas camadas serem constituídas de diferentes materiais, as respostas obtidas foram distintas. Esse fato fica bem explícito através das estruturas que apresentaram os valores de vida de fadiga extremos, tendo a estrutura 5 os maiores e a estrutura 10 os menores.

A variação da espessura da camada asfáltica também foi analisada, resultando no comportamento de quanto mais espesso o revestimento asfáltico, maior é a vida de fadiga, independente do tipo de eixo que está aplicando a carga. Analisou-se também esse fator, tipo de eixo, o qual apresentou um padrão não definido quando se trata de uma visão global, porém sendo caracterizado sim como relevante na análise. Ao se normaliza os valores, entretanto, nota-se claramente que o ESRD é mais prejudicial para a vida de fadiga considerando o excesso de carga e apresenta um comportamento padrão para as maiores espessuras, porém para 5 cm e 10 cm apresenta reduções da vida de fadiga menores. Já para ESRS, quanto maior a espessura da camada asfáltica, maior é a redução ocorrida nesse parâmetro, sendo a camada asfáltica de 5 cm uma exceção, pois apresenta um aumento na vida de fadiga.

A Resolução 210 do Contran delimita as cargas permitidas por tipo de eixo, onde a Resolução 365 regulamenta a tolerância sobre essa, sendo que antes de 2014 era permitido o excesso de 7,5% e depois da Resolução 489 apontou-se a possibilidade de chegar até 10% (BRASIL, 2014). Com isso analisou-se o que esse aumento gera em relação aos pavimentos flexíveis. Observou-se, portanto, que independente do tipo de eixo nota-se que quanto maior a espessura do revestimento, maior é a redução ocorrida na vida de fadiga, entretanto essa diferença não chega a chegando a 10%. Uma consideração a parte é o revestimento de 5 cm, onde isso não

se aplica quando se trata de ESRS, pois há um aumento da vida de fadiga com a aplicação de carga.

Os valores de vida de fadiga gerados pelo eixo padrão também foram calculados e normalizando em relação às outras cargas aplicadas por ESRD, nota-se que o fator potencial gerado é variado para cada estrutura analisada. Considerando isso e todas as outras análises feitas fica claro que são diversos os fatores que influenciam na resposta do pavimento em relação à aplicação de carga, mas o principal deles é a composição de sua estrutura. Isso mostra que para cada uma delas dever-se-ia considerar um fator de equivalência de carga diferente. Ressalta-se assim que os valores apresentados pela ASSHTO e pelo USACE não são válidos para outros pavimentos principalmente em países diferentes, pois esses FECs foram calculados em pavimentos específicos, com seus climas e umidade local. Sugere-se, portanto, o uso de diferentes métodos que tem sido estudado atualmente, como os que consideram o conceito de espectro de carga.

Através desse trabalho, então, observa-se a necessidade de adequar os projetos de pavimentos flexíveis, aumentando sua capacidade de carga, levando em conta os interesses dos transportadores, tendo em vista que isso influencia diretamente na economia do país, pois é o modal mais utilizado atualmente. Outra forma de melhora na situação da infraestrutura de transportes do Brasil seria a ampliação da malha de outros modais, viabilizando assim o transporte de um volume maior de carga, mitigando, portanto, a deterioração dos pavimentos.

Como sugestões para trabalhos futuros, indica-se, além da utilização de módulos de resiliência calculados através dos modelos gerados por análise de campo, a análise de forma mais específica do comportamento distinto ocorrido para o revestimento de 5 cm. Em adição seria interessante fazer análises através de métodos que analisam a deformação permanente, considerando que tal parâmetro é outro mecanismo importante de degradação dos pavimentos flexíveis brasileiros.

REFERÊNCIAS

ALBANO, J. F. **Efeitos da variação da carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento.** 1998. 138 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ALBANO, J. F. **Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos.** 2005. 232 f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ARAÚJO, A. F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará.** 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

BABURAMANI, P. **Asphalt fatigue life prediction models: a literature review.** Vermont South, Australia: ARRB Transport Research Ltd, Apr., 1999. Research Report ARR 334. Disponível em:
<<http://www.arrb.com.au/admin/file/content13/c6/ARR%20334%20Asphalt%20fatigue.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2013

BENEVIDES, S. A. de S. e. **Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos: empírico do DNER e do resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do estado do Ceará.** 2000. 176 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e em Engenharia de Transportes) – Coordenação dos Programas de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobras; Adeba, 2008.

BEZERRA NETO, R. S. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empíricos do DNER e mecanísticos e propostas de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS).** 2004. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. **Resolução n. 210**, de 13 de novembro de 2006. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres e dá outras providências. Brasília, 2006.

_____. Conselho Nacional de Trânsito. **Resolução n. 365**, de 24 de novembro de 2010. Fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Brasília, 2010.

_____. Conselho Nacional de Trânsito. **Resolução n. 489**, de 05 de junho de 2014. Fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Brasília, 2014.

CARDOSO, S. H. Faixas de módulos dinâmicos (elásticos) obtidos por retroanálise durante sete anos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: [s. n.], 1995. p. 378-401.

CASTRO, B. A. C. de. **Caracterização geotécnica de solos da região central de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias.** 2002. 230 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação do Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

CAVALCANTE, F. P.; MACÊDO, J. A. G. de; MACÊDO, R. M.; MUNIZ, M.; SOUZA, A. M. S.; CAVALCANTE, C. de M. B. Avaliação funcional e estrutural por ensaios destrutivos e não-destrutivos da rodovia BR-116/CE. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 38., 2007, Manaus. **Anais...** Manaus: [s. n.], 2007. Não paginado.

DAVIDS, W. G. **EverStressFE1.0 software for 3D finite-element:** analysis of flexible pavement structures – summary of features and capabilities. Orono: University of Maine, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos.** Rio de Janeiro, 1998.

DIAZ, R.; ECHAVEGUREN, T.; VARGAS-TEJEDA, S. Camiones de alto tonelaje y su impacto en ciclo de vida de pavimentos asfálticos. **Revista de la construcción**, Santiago, v. 11, n. 1, p. 101-118, 2012.

GARCIA, F. H. **Modelagem matemática dos efeitos do carregamento na degradação de pavimentos flexíveis.** 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2010.

MARODIN, E. E. **Alternativa de dimensionamento para o pavimento da BR-448:** análise mecânica com aplicação de BGTC. 2010. 72 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia de Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MEDINA, J. de.; MOTTA, L. M. G. da. **Mecânica dos pavimentos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Imagemaker Interactive, 2005.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária:** conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro: Copiarte, 2001.

PREUSSLER, E. S. **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço.** 1983. 268 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1983.

REBELO, E. de P.; FERREIRA, M. R. P.; FROTA, C. A. da.; Comportamento da mistura solo-emulsão para o sistema viário de Urucu (Coari - AM). **Engevista**, v. 16, n. 2, p. 180-190, jun. 2014.

RODRIGUES, M. R. de. **Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul.** 1997. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

SANT'ANA, W. C. **Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão.** 2009. 342 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SCHWENK, L.M.; CRUZ, C. B. M. Conflitos socioeconômicos-ambientais relativos ao avanço do cultivo da soja em áreas de influência dos eixos de integração e desenvolvimento no Estado de Mato Grosso. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 4, p. 501-511, 2008. Disponível em:
<<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/5305/5305>>. Acesso em: 6 out. 2013.

SEVERI, A. A.; BALBO, J.T.; RODOLFO, M. P.; SESTINI, V. M.; PRIETO, V. Verificação à fadiga de revestimentos asfálticos e bases cimentadas. In: SIMPÓRIO INTERNACIONAL DE RODOVIAS DE BAIXO DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO, 3., 1999, Belém. **Anais...** São Paulo: DER/SP; LMP-EPUSP, 1999. Não paginado. Disponível em:
<<http://sites.poli.usp.br/ptr/lmp/download/DER.PDF>>. Acesso em: 17 nov. 2013.

SOUZA, J. B. de Q. **Comportamento de misturas asfálticas a quente com agregados provenientes de jazidas de seixo no estado do Pará.** 2007. 403 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

THEYSE, H. L.; BEER, M. de; RUST, F. C. Overview of the South African Mechanistic Pavement Design Analysis Method. In: ANNUAL TRANSPORTATION RESEARCH BOARD MEETING, 75., 1996, Washington. **Anais...** Washington: Transportation Research Board, 1996. p. 1-40.

**APÊNDICE A - Planilha de entrada e saída de dados do programa
EverStress FE em relação à carga legal**

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base	Subleito (MPa)	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E_d (10^{-6}) 49 mm	Vida de Fad South Africa	Normalização N(x%)/N(0%)
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(MPa)							
1	50	5000	-	-	300	205	S	6	29,43	228	4,99E+04	100%
1	50	5000	-	-	300	205	S	6,45	31,64	226	5,20E+04	104%
1	50	5000	-	-	300	205	S	6,6	32,37	225	5,31E+04	106%
1	50	5000	-	-	300	205	S	7,2	35,32	224	5,42E+04	109%
1	50	5000	-	-	300	205	S	7,8	38,26	224	5,42E+04	109%
1	50	5000	-	-	300	205	D	10	24,53	233	4,51E+04	100%
1	50	5000	-	-	300	205	D	10,75	26,36	236	4,24E+04	94%
1	50	5000	-	-	300	205	D	11	26,98	234	4,42E+04	98%
1	50	5000	-	-	300	205	D	12	29,43	237	4,16E+04	92%
1	50	5000	-	-	300	205	D	13	31,88	235	4,33E+04	96%
2	50	5000	-	-	263	494	S	6	29,43	253	3,06E+04	100%
2	50	5000	-	-	263	494	S	6,45	31,64	252	3,12E+04	102%
2	50	5000	-	-	263	494	S	6,6	32,37	251	3,18E+04	104%
2	50	5000	-	-	263	494	S	7,2	35,32	250	3,24E+04	106%
2	50	5000	-	-	263	494	S	7,8	38,26	252	3,12E+04	102%
2	50	5000	-	-	263	494	D	10	24,53	258	2,80E+04	100%
2	50	5000	-	-	263	494	D	10,75	26,36	262	2,60E+04	93%
2	50	5000	-	-	263	494	D	11	26,98	261	2,65E+04	95%
2	50	5000	-	-	263	494	D	12	29,43	265	2,47E+04	88%
2	50	5000	-	-	263	494	D	13	31,88	264	2,51E+04	90%
3	50	5000	-	-	235	577	S	6	29,43	274	2,11E+04	100%
3	50	5000	-	-	235	577	S	6,45	31,64	274	2,11E+04	100%
3	50	5000	-	-	235	577	S	6,6	32,37	272	2,18E+04	103%
3	50	5000	-	-	235	577	S	7,2	35,32	273	2,15E+04	102%
3	50	5000	-	-	235	577	S	7,8	38,26	275	2,07E+04	98%
3	50	5000	-	-	235	577	D	10	24,53	280	1,91E+04	100%
3	50	5000	-	-	235	577	D	10,75	26,36	284	1,78E+04	94%
3	50	5000	-	-	235	577	D	11	26,98	283	1,81E+04	95%
3	50	5000	-	-	235	577	D	12	29,43	288	1,67E+04	88%
3	50	5000	-	-	235	577	D	13	31,88	289	1,64E+04	86%
4	50	5000	-	-	390	638	S	6	29,43	186	1,29E+05	100%
4	50	5000	-	-	390	638	S	6,45	31,64	184	1,36E+05	105%
4	50	5000	-	-	390	638	S	6,6	32,37	182	1,43E+05	111%
4	50	5000	-	-	390	638	S	7,2	35,32	180	1,51E+05	117%
4	50	5000	-	-	390	638	S	7,8	38,26	179	1,55E+05	120%
4	50	5000	-	-	390	638	D	10	24,53	191	1,14E+05	100%
4	50	5000	-	-	390	638	D	10,75	26,36	196	1,01E+05	89%
4	50	5000	-	-	390	638	D	11	26,98	196	1,01E+05	89%
4	50	5000	-	-	390	638	D	12	29,43	201	8,99E+04	79%
4	50	5000	-	-	390	638	D	13	31,88	195	1,04E+05	91%
5	50	5000	-	-	590	407	S	6	29,43	126	8,00E+05	100%
5	50	5000	-	-	590	407	S	6,45	31,64	123	8,95E+05	112%
5	50	5000	-	-	590	407	S	6,6	32,37	121	9,66E+05	121%
5	50	5000	-	-	590	407	S	7,2	35,32	118	1,09E+06	136%
5	50	5000	-	-	590	407	S	7,8	38,26	116	1,18E+06	147%
5	50	5000	-	-	590	407	D	10	24,53	161	2,54E+05	100%
5	50	5000	-	-	590	407	D	10,75	26,36	166	2,20E+05	87%
5	50	5000	-	-	590	407	D	11	26,98	166	2,20E+05	87%
5	50	5000	-	-	590	407	D	12	29,43	169	2,02E+05	80%
5	50	5000	-	-	590	407	D	13	31,88	164	2,33E+05	92%

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base	Subleito (MPa)	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E_d (10^{-6}) 49 mm	Vida de Fad South Africa	Normalização N(x%)/N(0%)
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(MPa)							
6	50	5000	-	-	365	106	S	6	29,43	193	1,09E+05	100%
6	50	5000	-	-	365	106	S	6,45	31,64	191	1,14E+05	105%
6	50	5000	-	-	365	106	S	6,6	32,37	189	1,20E+05	110%
6	50	5000	-	-	365	106	S	7,2	35,32	187	1,26E+05	116%
6	50	5000	-	-	365	106	S	7,8	38,26	186	1,29E+05	119%
6	50	5000	-	-	365	106	D	10	24,53	196	1,01E+05	100%
6	50	5000	-	-	365	106	D	10,75	26,36	197	9,88E+04	98%
6	50	5000	-	-	365	106	D	11	26,98	195	1,04E+05	102%
6	50	5000	-	-	365	106	D	12	29,43	196	1,01E+05	100%
6	50	5000	-	-	365	106	D	13	31,88	194	1,06E+05	105%
7	50	5000	-	-	440	233	S	6	29,43	165	2,26E+05	100%
7	50	5000	-	-	440	233	S	6,45	31,64	163	2,40E+05	106%
7	50	5000	-	-	440	233	S	6,6	32,37	161	2,54E+05	112%
7	50	5000	-	-	440	233	S	7,2	35,32	158	2,77E+05	122%
7	50	5000	-	-	440	233	S	7,8	38,26	157	2,86E+05	126%
7	50	5000	-	-	440	233	D	10	24,53	165	2,26E+05	100%
7	50	5000	-	-	440	233	D	10,75	26,36	171	1,92E+05	85%
7	50	5000	-	-	440	233	D	11	26,98	171	1,92E+05	85%
7	50	5000	-	-	440	233	D	12	29,43	174	1,77E+05	78%
7	50	5000	-	-	440	233	D	13	31,88	168	2,08E+05	92%
8	50	5000	-	-	440	362	S	6	29,43	166	2,20E+05	100%
8	50	5000	-	-	440	362	S	6,45	31,64	164	2,33E+05	106%
8	50	5000	-	-	440	362	S	6,6	32,37	162	2,47E+05	112%
8	50	5000	-	-	440	362	S	7,2	35,32	159	2,69E+05	122%
8	50	5000	-	-	440	362	S	7,8	38,26	158	2,77E+05	126%
8	50	5000	-	-	440	362	D	10	24,53	172	1,86E+05	100%
8	50	5000	-	-	440	362	D	10,75	26,36	179	1,55E+05	83%
8	50	5000	-	-	440	362	D	11	26,98	179	1,55E+05	83%
8	50	5000	-	-	440	362	D	12	29,43	183	1,39E+05	75%
8	50	5000	-	-	440	362	D	13	31,88	177	1,63E+05	87%
9	50	5000	-	-	233	254	S	6	29,43	276	2,04E+04	100%
9	50	5000	-	-	233	254	S	6,45	31,64	276	2,04E+04	100%
9	50	5000	-	-	233	254	S	6,6	32,37	274	2,11E+04	103%
9	50	5000	-	-	233	254	S	7,2	35,32	275	2,07E+04	102%
9	50	5000	-	-	233	254	S	7,8	38,26	277	2,01E+04	98%
9	50	5000	-	-	233	254	D	10	24,53	281	1,88E+04	100%
9	50	5000	-	-	233	254	D	10,75	26,36	286	1,73E+04	92%
9	50	5000	-	-	233	254	D	11	26,98	285	1,76E+04	94%
9	50	5000	-	-	233	254	D	12	29,43	290	1,62E+04	86%
9	50	5000	-	-	233	254	D	13	31,88	290	1,62E+04	86%
10	50	5000	-	-	233	115	S	6	29,43	276	2,04E+04	100%
10	50	5000	-	-	233	115	S	6,45	31,64	276	2,04E+04	100%
10	50	5000	-	-	233	115	S	6,6	32,37	275	2,07E+04	102%
10	50	5000	-	-	233	115	S	7,2	35,32	275	2,07E+04	102%
10	50	5000	-	-	233	115	S	7,8	38,26	277	2,01E+04	98%
10	50	5000	-	-	233	115	D	10	24,53	281	1,88E+04	100%
10	50	5000	-	-	233	115	D	10,75	26,36	286	1,73E+04	92%
10	50	5000	-	-	233	115	D	11	26,98	285	1,76E+04	94%
10	50	5000	-	-	233	115	D	12	29,43	290	1,62E+04	86%
10	50	5000	-	-	233	115	D	13	31,88	290	1,62E+04	86%

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base (MPa)	Subleito (MPa)	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E _d (10 ⁻⁶) 99 mm	Vida de Fad South Africa	Normalização N(x%)/N(0%)
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)								
1	50	5000	50	3000	300	205	S	6	29,43	209	1,34E+05	100%
1	50	5000	50	3000	300	205	S	6,45	31,64	215	1,17E+05	87%
1	50	5000	50	3000	300	205	S	6,6	32,37	215	1,17E+05	87%
1	50	5000	50	3000	300	205	S	7,2	35,32	222	1,01E+05	75%
1	50	5000	50	3000	300	205	S	7,8	38,26	222	1,01E+05	75%
1	50	5000	50	3000	300	205	D	10	24,53	201	1,61E+05	100%
1	50	5000	50	3000	300	205	D	10,75	26,36	215	1,17E+05	73%
1	50	5000	50	3000	300	205	D	11	26,98	219	1,07E+05	67%
1	50	5000	50	3000	300	205	D	12	29,43	236	7,52E+04	47%
1	50	5000	50	3000	300	205	D	13	31,88	251	5,62E+04	35%
2	50	5000	50	3000	263	494	S	6	29,43	222	1,01E+05	100%
2	50	5000	50	3000	263	494	S	6,45	31,64	228	8,86E+04	88%
2	50	5000	50	3000	263	494	S	6,6	32,37	229	8,68E+04	86%
2	50	5000	50	3000	263	494	S	7,2	35,32	236	7,52E+04	75%
2	50	5000	50	3000	263	494	S	7,8	38,26	244	6,43E+04	64%
2	50	5000	50	3000	263	494	D	10	24,53	215	1,17E+05	100%
2	50	5000	50	3000	263	494	D	10,75	26,36	229	8,68E+04	74%
2	50	5000	50	3000	263	494	D	11	26,98	233	7,99E+04	68%
2	50	5000	50	3000	263	494	D	12	29,43	251	5,62E+04	48%
2	50	5000	50	3000	263	494	D	13	31,88	267	4,20E+04	36%
3	50	5000	50	3000	235	577	S	6	29,43	234	7,83E+04	100%
3	50	5000	50	3000	235	577	S	6,45	31,64	240	6,95E+04	89%
3	50	5000	50	3000	235	577	S	6,6	32,37	241	6,81E+04	87%
3	50	5000	50	3000	235	577	S	7,2	35,32	249	5,84E+04	75%
3	50	5000	50	3000	235	577	S	7,8	38,26	258	4,93E+04	63%
3	50	5000	50	3000	235	577	D	10	24,53	229	8,68E+04	100%
3	50	5000	50	3000	235	577	D	10,75	26,36	244	6,43E+04	74%
3	50	5000	50	3000	235	577	D	11	26,98	248	5,95E+04	69%
3	50	5000	50	3000	235	577	D	12	29,43	268	4,12E+04	47%
3	50	5000	50	3000	235	577	D	13	31,88	285	3,08E+04	35%
4	50	5000	50	3000	390	638	S	6	29,43	179	2,79E+05	100%
4	50	5000	50	3000	390	638	S	6,45	31,64	183	2,51E+05	90%
4	50	5000	50	3000	390	638	S	6,6	32,37	183	2,51E+05	90%
4	50	5000	50	3000	390	638	S	7,2	35,32	188	2,21E+05	79%
4	50	5000	50	3000	390	638	S	7,8	38,26	193	1,95E+05	70%
4	50	5000	50	3000	390	638	D	10	24,53	186	2,32E+05	100%
4	50	5000	50	3000	390	638	D	10,75	26,36	192	2,00E+05	86%
4	50	5000	50	3000	390	638	D	11	26,98	193	1,95E+05	84%
4	50	5000	50	3000	390	638	D	12	29,43	201	1,61E+05	69%
4	50	5000	50	3000	390	638	D	13	31,88	206	1,43E+05	62%
5	50	5000	50	3000	590	407	S	6	29,43	138	9,54E+05	100%
5	50	5000	50	3000	590	407	S	6,45	31,64	140	8,91E+05	93%
5	50	5000	50	3000	590	407	S	6,6	32,37	140	8,91E+05	93%
5	50	5000	50	3000	590	407	S	7,2	35,32	143	8,06E+05	84%
5	50	5000	50	3000	590	407	S	7,8	38,26	146	7,31E+05	77%
5	50	5000	50	3000	590	407	D	10	24,53	142	8,34E+05	100%
5	50	5000	50	3000	590	407	D	10,75	26,36	147	7,08E+05	85%
5	50	5000	50	3000	590	407	D	11	26,98	147	7,08E+05	85%
5	50	5000	50	3000	590	407	D	12	29,43	152	6,04E+05	72%
5	50	5000	50	3000	590	407	D	13	31,88	155	5,51E+05	66%

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base (MPa)	Subleito (MPa)	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E _d (10 ⁻⁶) 99 mm	Vida de Fad South Africa	Normalização N(x%)/N(0%)
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)								
6	50	5000	50	3000	365	106	S	6	29,43	190	2,10E+05	100%
6	50	5000	50	3000	365	106	S	6,45	31,64	194	1,90E+05	91%
6	50	5000	50	3000	365	106	S	6,6	32,37	194	1,90E+05	91%
6	50	5000	50	3000	365	106	S	7,2	35,32	200	1,65E+05	78%
6	50	5000	50	3000	365	106	S	7,8	38,26	206	1,43E+05	68%
6	50	5000	50	3000	365	106	D	10	24,53	180	2,71E+05	100%
6	50	5000	50	3000	365	106	D	10,75	26,36	192	2,00E+05	74%
6	50	5000	50	3000	365	106	D	11	26,98	195	1,86E+05	68%
6	50	5000	50	3000	365	106	D	12	29,43	210	1,31E+05	48%
6	50	5000	50	3000	365	106	D	13	31,88	224	9,63E+04	36%
7	50	5000	50	3000	440	233	S	6	29,43	168	3,76E+05	100%
7	50	5000	50	3000	440	233	S	6,45	31,64	171	3,46E+05	92%
7	50	5000	50	3000	440	233	S	6,6	32,37	171	3,46E+05	92%
7	50	5000	50	3000	440	233	S	7,2	35,32	175	3,10E+05	82%
7	50	5000	50	3000	440	233	S	7,8	38,26	180	2,71E+05	72%
7	50	5000	50	3000	440	233	D	10	24,53	175	3,10E+05	100%
7	50	5000	50	3000	440	233	D	10,75	26,36	181	2,64E+05	85%
7	50	5000	50	3000	440	233	D	11	26,98	181	2,64E+05	85%
7	50	5000	50	3000	440	233	D	12	29,43	188	2,21E+05	71%
7	50	5000	50	3000	440	233	D	13	31,88	193	1,95E+05	63%
8	50	5000	50	3000	440	362	S	6	29,43	168	3,76E+05	100%
8	50	5000	50	3000	440	362	S	6,45	31,64	171	3,46E+05	92%
8	50	5000	50	3000	440	362	S	6,6	32,37	171	3,46E+05	92%
8	50	5000	50	3000	440	362	S	7,2	35,32	175	3,10E+05	82%
8	50	5000	50	3000	440	362	S	7,8	38,26	180	2,71E+05	72%
8	50	5000	50	3000	440	362	D	10	24,53	174	3,19E+05	100%
8	50	5000	50	3000	440	362	D	10,75	26,36	179	2,79E+05	87%
8	50	5000	50	3000	440	362	D	11	26,98	180	2,71E+05	85%
8	50	5000	50	3000	440	362	D	12	29,43	187	2,26E+05	71%
8	50	5000	50	3000	440	362	D	13	31,88	192	2,00E+05	63%
9	50	5000	50	3000	233	254	S	6	29,43	237	7,38E+04	100%
9	50	5000	50	3000	233	254	S	6,45	31,64	243	6,55E+04	89%
9	50	5000	50	3000	233	254	S	6,6	32,37	244	6,43E+04	87%
9	50	5000	50	3000	233	254	S	7,2	35,32	252	5,52E+04	75%
9	50	5000	50	3000	233	254	S	7,8	38,26	262	4,59E+04	62%
9	50	5000	50	3000	233	254	D	10	24,53	233	7,99E+04	100%
9	50	5000	50	3000	233	254	D	10,75	26,36	248	5,95E+04	74%
9	50	5000	50	3000	233	254	D	11	26,98	253	5,41E+04	68%
9	50	5000	50	3000	233	254	D	12	29,43	273	3,78E+04	47%
9	50	5000	50	3000	233	254	D	13	31,88	291	2,79E+04	35%
10	50	5000	50	3000	233	115	S	6	29,43	241	6,81E+04	100%
10	50	5000	50	3000	233	115	S	6,45	31,64	246	6,18E+04	91%
10	50	5000	50	3000	233	115	S	6,6	32,37	248	5,95E+04	87%
10	50	5000	50	3000	233	115	S	7,2	35,32	257	5,03E+04	74%
10	50	5000	50	3000	233	115	S	7,8	38,26	267	4,20E+04	62%
10	50	5000	50	3000	233	115	D	10	24,53	240	6,95E+04	100%
10	50	5000	50	3000	233	115	D	10,75	26,36	256	5,12E+04	74%
10	50	5000	50	3000	233	115	D	11	26,98	261	4,67E+04	67%
10	50	5000	50	3000	233	115	D	12	29,43	281	3,29E+04	47%
10	50	5000	50	3000	233	115	D	13	31,88	300	2,42E+04	35%

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base (MPa)	Subleito (MPa)	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E _d (10 ⁻⁶) 149 mm	Vida de Fad South Africa	Normalização N(x%)/N(0%)
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)								
1	100	5000	50	3000	300	205	S	6	29,43	139	9,22E+05	100%
1	100	5000	50	3000	300	205	S	6,45	31,64	145	7,55E+05	82%
1	100	5000	50	3000	300	205	S	6,6	32,37	146	7,31E+05	79%
1	100	5000	50	3000	300	205	S	7,2	35,32	153	5,86E+05	63%
1	100	5000	50	3000	300	205	S	7,8	38,26	161	4,60E+05	50%
1	100	5000	50	3000	300	205	D	10	24,53	153	5,86E+05	100%
1	100	5000	50	3000	300	205	D	10,75	26,36	163	4,34E+05	74%
1	100	5000	50	3000	300	205	D	11	26,98	166	3,98E+05	68%
1	100	5000	50	3000	300	205	D	12	29,43	179	2,79E+05	48%
1	100	5000	50	3000	300	205	D	13	31,88	191	2,05E+05	35%
2	100	5000	50	3000	263	494	S	6	29,43	142	8,34E+05	100%
2	100	5000	50	3000	263	494	S	6,45	31,64	148	6,85E+05	82%
2	100	5000	50	3000	263	494	S	6,6	32,37	149	6,64E+05	80%
2	100	5000	50	3000	263	494	S	7,2	35,32	157	5,18E+05	62%
2	100	5000	50	3000	263	494	S	7,8	38,26	164	4,22E+05	51%
2	100	5000	50	3000	263	494	D	10	24,53	156	5,34E+05	100%
2	100	5000	50	3000	263	494	D	10,75	26,36	166	3,98E+05	75%
2	100	5000	50	3000	263	494	D	11	26,98	170	3,56E+05	67%
2	100	5000	50	3000	263	494	D	12	29,43	183	2,51E+05	47%
2	100	5000	50	3000	263	494	D	13	31,88	195	1,86E+05	35%
3	100	5000	50	3000	235	577	S	6	29,43	148	6,85E+05	100%
3	100	5000	50	3000	235	577	S	6,45	31,64	154	5,68E+05	83%
3	100	5000	50	3000	235	577	S	6,6	32,37	155	5,51E+05	80%
3	100	5000	50	3000	235	577	S	7,2	35,32	163	4,34E+05	63%
3	100	5000	50	3000	235	577	S	7,8	38,26	171	3,46E+05	50%
3	100	5000	50	3000	235	577	D	10	24,53	163	4,34E+05	100%
3	100	5000	50	3000	235	577	D	10,75	26,36	174	3,19E+05	73%
3	100	5000	50	3000	235	577	D	11	26,98	177	2,94E+05	68%
3	100	5000	50	3000	235	577	D	12	29,43	191	2,05E+05	47%
3	100	5000	50	3000	235	577	D	13	31,88	204	1,50E+05	35%
4	100	5000	50	3000	390	638	S	6	29,43	120	1,85E+06	100%
4	100	5000	50	3000	390	638	S	6,45	31,64	125	1,52E+06	82%
4	100	5000	50	3000	390	638	S	6,6	32,37	126	1,47E+06	79%
4	100	5000	50	3000	390	638	S	7,2	35,32	132	1,18E+06	64%
4	100	5000	50	3000	390	638	S	7,8	38,26	138	9,54E+05	52%
4	100	5000	50	3000	390	638	D	10	24,53	128	1,36E+06	100%
4	100	5000	50	3000	390	638	D	10,75	26,36	136	1,02E+06	75%
4	100	5000	50	3000	390	638	D	11	26,98	139	9,22E+05	68%
4	100	5000	50	3000	390	638	D	12	29,43	149	6,64E+05	49%
4	100	5000	50	3000	390	638	D	13	31,88	159	4,88E+05	36%
5	100	5000	50	3000	590	407	S	6	29,43	99	4,60E+06	100%
5	100	5000	50	3000	590	407	S	6,45	31,64	103	3,81E+06	83%
5	100	5000	50	3000	590	407	S	6,6	32,37	103	3,81E+06	83%
5	100	5000	50	3000	590	407	S	7,2	35,32	108	3,05E+06	66%
5	100	5000	50	3000	590	407	S	7,8	38,26	112	2,56E+06	56%
5	100	5000	50	3000	590	407	D	10	24,53	102	3,99E+06	100%
5	100	5000	50	3000	590	407	D	10,75	26,36	109	2,92E+06	73%
5	100	5000	50	3000	590	407	D	11	26,98	111	2,67E+06	67%
5	100	5000	50	3000	590	407	D	12	29,43	119	1,92E+06	48%
5	100	5000	50	3000	590	407	D	13	31,88	127	1,41E+06	35%

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base	Subleito (MPa)	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E _d (10 ⁻⁶) 149 mm	Vida de Fad South Africa	Normalização N(x%)/N(0%)
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(MPa)							
6	100	5000	50	3000	365	106	S	6	29,43	131	1,22E+06	100%
6	100	5000	50	3000	365	106	S	6,45	31,64	136	1,02E+06	84%
6	100	5000	50	3000	365	106	S	6,6	32,37	137	9,88E+05	81%
6	100	5000	50	3000	365	106	S	7,2	35,32	144	7,80E+05	64%
6	100	5000	50	3000	365	106	S	7,8	38,26	151	6,23E+05	51%
6	100	5000	50	3000	365	106	D	10	24,53	143	8,06E+05	100%
6	100	5000	50	3000	365	106	D	10,75	26,36	153	5,86E+05	73%
6	100	5000	50	3000	365	106	D	11	26,98	156	5,34E+05	66%
6	100	5000	50	3000	365	106	D	12	29,43	168	3,76E+05	47%
6	100	5000	50	3000	365	106	D	13	31,88	179	2,79E+05	35%
7	100	5000	50	3000	440	233	S	6	29,43	117	2,08E+06	100%
7	100	5000	50	3000	440	233	S	6,45	31,64	121	1,78E+06	85%
7	100	5000	50	3000	440	233	S	6,6	32,37	122	1,71E+06	82%
7	100	5000	50	3000	440	233	S	7,2	35,32	128	1,36E+06	65%
7	100	5000	50	3000	440	233	S	7,8	38,26	133	1,14E+06	55%
7	100	5000	50	3000	440	233	D	10	24,53	124	1,58E+06	100%
7	100	5000	50	3000	440	233	D	10,75	26,36	132	1,18E+06	74%
7	100	5000	50	3000	440	233	D	11	26,98	135	1,06E+06	67%
7	100	5000	50	3000	440	233	D	12	29,43	145	7,55E+05	48%
7	100	5000	50	3000	440	233	D	13	31,88	155	5,51E+05	35%
8	100	5000	50	3000	440	362	S	6	29,43	115	2,26E+06	100%
8	100	5000	50	3000	440	362	S	6,45	31,64	120	1,85E+06	82%
8	100	5000	50	3000	440	362	S	6,6	32,37	121	1,78E+06	79%
8	100	5000	50	3000	440	362	S	7,2	35,32	126	1,47E+06	65%
8	100	5000	50	3000	440	362	S	7,8	38,26	132	1,18E+06	52%
8	100	5000	50	3000	440	362	D	10	24,53	122	1,71E+06	100%
8	100	5000	50	3000	440	362	D	10,75	26,36	130	1,27E+06	74%
8	100	5000	50	3000	440	362	D	11	26,98	132	1,18E+06	69%
8	100	5000	50	3000	440	362	D	12	29,43	143	8,06E+05	47%
8	100	5000	50	3000	440	362	D	13	31,88	152	6,04E+05	35%
9	100	5000	50	3000	233	254	S	6	29,43	152	6,04E+05	100%
9	100	5000	50	3000	233	254	S	6,45	31,64	158	5,03E+05	83%
9	100	5000	50	3000	233	254	S	6,6	32,37	160	4,74E+05	78%
9	100	5000	50	3000	233	254	S	7,2	35,32	168	3,76E+05	62%
9	100	5000	50	3000	233	254	S	7,8	38,26	176	3,02E+05	50%
9	100	5000	50	3000	233	254	D	10	24,53	170	3,56E+05	100%
9	100	5000	50	3000	233	254	D	10,75	26,36	181	2,64E+05	74%
9	100	5000	50	3000	233	254	D	11	26,98	184	2,44E+05	69%
9	100	5000	50	3000	233	254	D	12	29,43	199	1,69E+05	47%
9	100	5000	50	3000	233	254	D	13	31,88	213	1,22E+05	34%
10	100	5000	50	3000	233	115	S	6	29,43	157	5,18E+05	100%
10	100	5000	50	3000	233	115	S	6,45	31,64	164	4,22E+05	81%
10	100	5000	50	3000	233	115	S	6,6	32,37	165	4,10E+05	79%
10	100	5000	50	3000	233	115	S	7,2	35,32	174	3,19E+05	61%
10	100	5000	50	3000	233	115	S	7,8	38,26	183	2,51E+05	48%
10	100	5000	50	3000	233	115	D	10	24,53	178	2,86E+05	100%
10	100	5000	50	3000	233	115	D	10,75	26,36	190	2,10E+05	73%
10	100	5000	50	3000	233	115	D	11	26,98	193	1,95E+05	68%
10	100	5000	50	3000	233	115	D	12	29,43	209	1,34E+05	47%
10	100	5000	50	3000	233	115	D	13	31,88	223	9,84E+04	34%

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base (MPa)	Subleito (MPa)	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E _d (10 ⁻⁶) 199 mm	Vida de Fad South Africa	Normalização N(x%)/N(0%)
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)								
1	150	5000	50	3000	300	205	S	6	29,43	95	5,59E+06	100%
1	150	5000	50	3000	300	205	S	6,45	31,64	100	4,38E+06	78%
1	150	5000	50	3000	300	205	S	6,6	32,37	101	4,18E+06	75%
1	150	5000	50	3000	300	205	S	7,2	35,32	107	3,18E+06	57%
1	150	5000	50	3000	300	205	S	7,8	38,26	114	2,36E+06	42%
1	150	5000	50	3000	300	205	D	10	24,53	114	2,36E+06	100%
1	150	5000	50	3000	300	205	D	10,75	26,36	122	1,71E+06	73%
1	150	5000	50	3000	300	205	D	11	26,98	124	1,58E+06	67%
1	150	5000	50	3000	300	205	D	12	29,43	134	1,10E+06	47%
1	150	5000	50	3000	300	205	D	13	31,88	144	7,80E+05	33%
2	150	5000	50	3000	263	494	S	6	29,43	96	5,32E+06	100%
2	150	5000	50	3000	263	494	S	6,45	31,64	100	4,38E+06	82%
2	150	5000	50	3000	263	494	S	6,6	32,37	102	3,99E+06	75%
2	150	5000	50	3000	263	494	S	7,2	35,32	108	3,05E+06	57%
2	150	5000	50	3000	263	494	S	7,8	38,26	114	2,36E+06	44%
2	150	5000	50	3000	263	494	D	10	24,53	114	2,36E+06	100%
2	150	5000	50	3000	263	494	D	10,75	26,36	122	1,71E+06	73%
2	150	5000	50	3000	263	494	D	11	26,98	124	1,58E+06	67%
2	150	5000	50	3000	263	494	D	12	29,43	134	1,10E+06	47%
2	150	5000	50	3000	263	494	D	13	31,88	144	7,80E+05	33%
3	150	5000	50	3000	235	577	S	6	29,43	99	4,60E+06	100%
3	150	5000	50	3000	235	577	S	6,45	31,64	104	3,64E+06	79%
3	150	5000	50	3000	235	577	S	6,6	32,37	105	3,48E+06	76%
3	150	5000	50	3000	235	577	S	7,2	35,32	111	2,67E+06	58%
3	150	5000	50	3000	235	577	S	7,8	38,26	118	2,00E+06	44%
3	150	5000	50	3000	235	577	D	10	24,53	118	2,00E+06	100%
3	150	5000	50	3000	235	577	D	10,75	26,36	126	1,47E+06	73%
3	150	5000	50	3000	235	577	D	11	26,98	129	1,31E+06	66%
3	150	5000	50	3000	235	577	D	12	29,43	139	9,22E+05	46%
3	150	5000	50	3000	235	577	D	13	31,88	149	6,64E+05	33%
4	150	5000	50	3000	390	638	S	6	29,43	83	1,06E+07	100%
4	150	5000	50	3000	390	638	S	6,45	31,64	86	8,95E+06	85%
4	150	5000	50	3000	390	638	S	6,6	32,37	88	8,03E+06	76%
4	150	5000	50	3000	390	638	S	7,2	35,32	93	6,18E+06	58%
4	150	5000	50	3000	390	638	S	7,8	38,26	98	4,82E+06	46%
4	150	5000	50	3000	390	638	D	10	24,53	96	5,32E+06	100%
4	150	5000	50	3000	390	638	D	10,75	26,36	102	3,99E+06	75%
4	150	5000	50	3000	390	638	D	11	26,98	104	3,64E+06	68%
4	150	5000	50	3000	390	638	D	12	29,43	113	2,46E+06	46%
4	150	5000	50	3000	390	638	D	13	31,88	120	1,85E+06	35%
5	150	5000	50	3000	590	407	S	6	29,43	70	2,37E+07	100%
5	150	5000	50	3000	590	407	S	6,45	31,64	73	1,95E+07	82%
5	150	5000	50	3000	590	407	S	6,6	32,37	74	1,82E+07	77%
5	150	5000	50	3000	590	407	S	7,2	35,32	78	1,42E+07	60%
5	150	5000	50	3000	590	407	S	7,8	38,26	83	1,06E+07	45%
5	150	5000	50	3000	590	407	D	10	24,53	80	1,26E+07	100%
5	150	5000	50	3000	590	407	D	10,75	26,36	85	9,46E+06	75%
5	150	5000	50	3000	590	407	D	11	26,98	87	8,48E+06	67%
5	150	5000	50	3000	590	407	D	12	29,43	94	5,88E+06	47%
5	150	5000	50	3000	590	407	D	13	31,88	100	4,38E+06	35%

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base	Subleito	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E _d (10 ⁻⁶) 199 mm	Vida de Fad South Africa	Normalização N(x%)/N(0%)
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(MPa)							
6	150	5000	50	3000	365	106	S	6	29,43	91	6,85E+06	100%
6	150	5000	50	3000	365	106	S	6,45	31,64	96	5,32E+06	78%
6	150	5000	50	3000	365	106	S	6,6	32,37	97	5,06E+06	74%
6	150	5000	50	3000	365	106	S	7,2	35,32	103	3,81E+06	56%
6	150	5000	50	3000	365	106	S	7,8	38,26	109	2,92E+06	43%
6	150	5000	50	3000	365	106	D	10	24,53	110	2,79E+06	100%
6	150	5000	50	3000	365	106	D	10,75	26,36	117	2,08E+06	75%
6	150	5000	50	3000	365	106	D	11	26,98	120	1,85E+06	66%
6	150	5000	50	3000	365	106	D	12	29,43	129	1,31E+06	47%
6	150	5000	50	3000	365	106	D	13	31,88	138	9,54E+05	34%
7	150	5000	50	3000	440	233	S	6	29,43	82	1,12E+07	100%
7	150	5000	50	3000	440	233	S	6,45	31,64	86	8,95E+06	80%
7	150	5000	50	3000	440	233	S	6,6	32,37	87	8,48E+06	76%
7	150	5000	50	3000	440	233	S	7,2	35,32	92	6,51E+06	58%
7	150	5000	50	3000	440	233	S	7,8	38,26	97	5,06E+06	45%
7	150	5000	50	3000	440	233	D	10	24,53	96	5,32E+06	100%
7	150	5000	50	3000	440	233	D	10,75	26,36	102	3,99E+06	75%
7	150	5000	50	3000	440	233	D	11	26,98	104	3,64E+06	68%
7	150	5000	50	3000	440	233	D	12	29,43	112	2,56E+06	48%
7	150	5000	50	3000	440	233	D	13	31,88	120	1,85E+06	35%
8	150	5000	50	3000	440	362	S	6	29,43	80	1,26E+07	100%
8	150	5000	50	3000	440	362	S	6,45	31,64	84	1,00E+07	79%
8	150	5000	50	3000	440	362	S	6,6	32,37	85	9,46E+06	75%
8	150	5000	50	3000	440	362	S	7,2	35,32	90	7,22E+06	57%
8	150	5000	50	3000	440	362	S	7,8	38,26	95	5,59E+06	44%
8	150	5000	50	3000	440	362	D	10	24,53	93	6,18E+06	100%
8	150	5000	50	3000	440	362	D	10,75	26,36	100	4,38E+06	71%
8	150	5000	50	3000	440	362	D	11	26,98	102	3,99E+06	65%
8	150	5000	50	3000	440	362	D	12	29,43	110	2,79E+06	45%
8	150	5000	50	3000	440	362	D	13	31,88	117	2,08E+06	34%
9	150	5000	50	3000	233	254	S	6	29,43	102	3,99E+06	100%
9	150	5000	50	3000	233	254	S	6,45	31,64	107	3,18E+06	80%
9	150	5000	50	3000	233	254	S	6,6	32,37	109	2,92E+06	73%
9	150	5000	50	3000	233	254	S	7,2	35,32	116	2,17E+06	54%
9	150	5000	50	3000	233	254	S	7,8	38,26	122	1,71E+06	43%
9	150	5000	50	3000	233	254	D	10	24,53	124	1,58E+06	100%
9	150	5000	50	3000	233	254	D	10,75	26,36	132	1,18E+06	74%
9	150	5000	50	3000	233	254	D	11	26,98	135	1,06E+06	67%
9	150	5000	50	3000	233	254	D	12	29,43	146	7,31E+05	46%
9	150	5000	50	3000	233	254	D	13	31,88	156	5,34E+05	34%
10	150	5000	50	3000	233	115	S	6	29,43	107	3,18E+06	100%
10	150	5000	50	3000	233	115	S	6,45	31,64	112	2,56E+06	81%
10	150	5000	50	3000	233	115	S	6,6	32,37	114	2,36E+06	74%
10	150	5000	50	3000	233	115	S	7,2	35,32	121	1,78E+06	56%
10	150	5000	50	3000	233	115	S	7,8	38,26	128	1,36E+06	43%
10	150	5000	50	3000	233	115	D	10	24,53	131	1,22E+06	100%
10	150	5000	50	3000	233	115	D	10,75	26,36	140	8,91E+05	73%
10	150	5000	50	3000	233	115	D	11	26,98	143	8,06E+05	66%
10	150	5000	50	3000	233	115	D	12	29,43	155	5,51E+05	45%
10	150	5000	50	3000	233	115	D	13	31,88	166	3,98E+05	33%

**APÊNDICE B - Planilha de entrada e saída de dados do programa
EverStress FE em relação ao eixo padrão**

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base (MPa)	Subleito (MPa)	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E _d (10 ⁻⁶) 49 mm	Vida de Fad South Africa	Normalização N(x%)/N(0%)
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)								
1	50	5000	-	-	300	205	D	8,2	20,11	226	5,20E+04	100%
1	50	5000	-	-	300	205	D	10	24,53	233	4,51E+04	87%
1	50	5000	-	-	300	205	D	10,75	26,36	236	4,24E+04	82%
1	50	5000	-	-	300	205	D	11	26,98	234	4,42E+04	85%
1	50	5000	-	-	300	205	D	12	29,43	237	4,16E+04	80%
1	50	5000	-	-	300	205	D	13	31,88	235	4,33E+04	83%
2	50	5000	-	-	263	494	D	8,2	20,11	249	3,30E+04	100%
2	50	5000	-	-	263	494	D	10	24,53	258	2,80E+04	85%
2	50	5000	-	-	263	494	D	10,75	26,36	262	2,60E+04	79%
2	50	5000	-	-	263	494	D	11	26,98	261	2,65E+04	80%
2	50	5000	-	-	263	494	D	12	29,43	265	2,47E+04	75%
2	50	5000	-	-	263	494	D	13	31,88	264	2,51E+04	76%
3	50	5000	-	-	235	577	D	8,2	20,11	268	2,34E+04	100%
3	50	5000	-	-	235	577	D	10	24,53	280	1,91E+04	81%
3	50	5000	-	-	235	577	D	10,75	26,36	284	1,78E+04	76%
3	50	5000	-	-	235	577	D	11	26,98	283	1,81E+04	78%
3	50	5000	-	-	235	577	D	12	29,43	288	1,67E+04	71%
3	50	5000	-	-	235	577	D	13	31,88	289	1,64E+04	70%
4	50	5000	-	-	390	638	D	8,2	20,11	165	2,26E+05	100%
4	50	5000	-	-	390	638	D	10	24,53	191	1,14E+05	50%
4	50	5000	-	-	390	638	D	10,75	26,36	196	1,01E+05	45%
4	50	5000	-	-	390	638	D	11	26,98	196	1,01E+05	45%
4	50	5000	-	-	390	638	D	12	29,43	201	8,99E+04	40%
4	50	5000	-	-	390	638	D	13	31,88	195	1,04E+05	46%
5	50	5000	-	-	590	407	D	8,2	20,11	140	4,88E+05	100%
5	50	5000	-	-	590	407	D	10	24,53	161	2,54E+05	52%
5	50	5000	-	-	590	407	D	10,75	26,36	166	2,20E+05	45%
5	50	5000	-	-	590	407	D	11	26,98	166	2,20E+05	45%
5	50	5000	-	-	590	407	D	12	29,43	169	2,02E+05	41%
5	50	5000	-	-	590	407	D	13	31,88	164	2,33E+05	48%
6	50	5000	-	-	365	106	D	8,2	20,11	193	1,09E+05	100%
6	50	5000	-	-	365	106	D	10	24,53	196	1,01E+05	93%
6	50	5000	-	-	365	106	D	10,75	26,36	197	9,88E+04	91%
6	50	5000	-	-	365	106	D	11	26,98	195	1,04E+05	95%
6	50	5000	-	-	365	106	D	12	29,43	196	1,01E+05	93%
6	50	5000	-	-	365	106	D	13	31,88	194	1,06E+05	98%
7	50	5000	-	-	440	233	S	6	29,43	165	2,26E+05	100%
7	50	5000	-	-	440	233	D	8,2	20,11	144	4,28E+05	100%
7	50	5000	-	-	440	233	D	10	24,53	165	2,26E+05	53%
7	50	5000	-	-	440	233	D	10,75	26,36	171	1,92E+05	45%
7	50	5000	-	-	440	233	D	11	26,98	171	1,92E+05	45%
7	50	5000	-	-	440	233	D	12	29,43	174	1,77E+05	41%
7	50	5000	-	-	440	233	D	13	31,88	168	2,08E+05	49%
8	50	5000	-	-	440	362	D	8,2	20,11	149	3,65E+05	100%
8	50	5000	-	-	440	362	D	10	24,53	172	1,86E+05	51%
8	50	5000	-	-	440	362	D	10,75	26,36	179	1,55E+05	42%
8	50	5000	-	-	440	362	D	11	26,98	179	1,55E+05	42%
8	50	5000	-	-	440	362	D	12	29,43	183	1,39E+05	38%
8	50	5000	-	-	440	362	D	13	31,88	177	1,63E+05	45%
9	50	5000	-	-	233	254	D	8,2	20,11	270	2,26E+04	100%
9	50	5000	-	-	233	254	D	10	24,53	281	1,88E+04	83%
9	50	5000	-	-	233	254	D	10,75	26,36	286	1,73E+04	76%
9	50	5000	-	-	233	254	D	11	26,98	285	1,76E+04	78%
9	50	5000	-	-	233	254	D	12	29,43	290	1,62E+04	72%
9	50	5000	-	-	233	254	D	13	31,88	290	1,62E+04	72%
10	50	5000	-	-	233	115	D	8,2	20,11	269	2,30E+04	100%
10	50	5000	-	-	233	115	D	10	24,53	281	1,88E+04	82%
10	50	5000	-	-	233	115	D	10,75	26,36	286	1,73E+04	75%
10	50	5000	-	-	233	115	D	11	26,98	285	1,76E+04	76%
10	50	5000	-	-	233	115	D	12	29,43	290	1,62E+04	70%
10	50	5000	-	-	233	115	D	13	31,88	290	1,62E+04	70%

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base (MPa)	Subleito (MPa)	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E _d (10 ⁻⁶) 99 mm	Vida de Fad South Africa	Normalização N(x%)/N(0%)
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)								
1	50	5000	50	3000	300	205	D	8,2	20,11	169	3,66E+05	100%
1	50	5000	50	3000	300	205	D	10	24,53	201	1,61E+05	44%
1	50	5000	50	3000	300	205	D	10,75	26,36	215	1,17E+05	32%
1	50	5000	50	3000	300	205	D	11	26,98	219	1,07E+05	29%
1	50	5000	50	3000	300	205	D	12	29,43	236	7,52E+04	21%
1	50	5000	50	3000	300	205	D	13	31,88	251	5,62E+04	15%
2	50	5000	50	3000	263	494	D	8,2	20,11	180	2,71E+05	100%
2	50	5000	50	3000	263	494	D	10	24,53	215	1,17E+05	43%
2	50	5000	50	3000	263	494	D	10,75	26,36	229	8,68E+04	32%
2	50	5000	50	3000	263	494	D	11	26,98	233	7,99E+04	29%
2	50	5000	50	3000	263	494	D	12	29,43	251	5,62E+04	21%
2	50	5000	50	3000	263	494	D	13	31,88	267	4,20E+04	15%
3	50	5000	50	3000	235	577	D	8,2	20,11	192	2,00E+05	100%
3	50	5000	50	3000	235	577	D	10	24,53	229	8,68E+04	43%
3	50	5000	50	3000	235	577	D	10,75	26,36	244	6,43E+04	32%
3	50	5000	50	3000	235	577	D	11	26,98	248	5,95E+04	30%
3	50	5000	50	3000	235	577	D	12	29,43	268	4,12E+04	21%
3	50	5000	50	3000	235	577	D	13	31,88	285	3,08E+04	15%
4	50	5000	50	3000	390	638	D	8,2	20,11	170	3,56E+05	100%
4	50	5000	50	3000	390	638	D	10	24,53	186	2,32E+05	65%
4	50	5000	50	3000	390	638	D	10,75	26,36	192	2,00E+05	56%
4	50	5000	50	3000	390	638	D	11	26,98	193	1,95E+05	55%
4	50	5000	50	3000	390	638	D	12	29,43	201	1,61E+05	45%
4	50	5000	50	3000	390	638	D	13	31,88	206	1,43E+05	40%
5	50	5000	50	3000	590	407	D	8,2	20,11	132	1,18E+06	100%
5	50	5000	50	3000	590	407	D	10	24,53	142	8,34E+05	71%
5	50	5000	50	3000	590	407	D	10,75	26,36	147	7,08E+05	60%
5	50	5000	50	3000	590	407	D	11	26,98	147	7,08E+05	60%
5	50	5000	50	3000	590	407	D	12	29,43	152	6,04E+05	51%
5	50	5000	50	3000	590	407	D	13	31,88	155	5,51E+05	47%
6	50	5000	50	3000	365	106	D	8,2	20,11	151	6,23E+05	100%
6	50	5000	50	3000	365	106	D	10	24,53	180	2,71E+05	44%
6	50	5000	50	3000	365	106	D	10,75	26,36	192	2,00E+05	32%
6	50	5000	50	3000	365	106	D	11	26,98	195	1,86E+05	30%
6	50	5000	50	3000	365	106	D	12	29,43	210	1,31E+05	21%
6	50	5000	50	3000	365	106	D	13	31,88	224	9,63E+04	15%
7	50	5000	50	3000	440	233	D	8,2	20,11	160	4,74E+05	100%
7	50	5000	50	3000	440	233	D	10	24,53	175	3,10E+05	65%
7	50	5000	50	3000	440	233	D	10,75	26,36	181	2,64E+05	56%
7	50	5000	50	3000	440	233	D	11	26,98	181	2,64E+05	56%
7	50	5000	50	3000	440	233	D	12	29,43	188	2,21E+05	47%
7	50	5000	50	3000	440	233	D	13	31,88	193	1,95E+05	41%
8	50	5000	50	3000	440	362	D	8,2	20,11	159	4,88E+05	100%
8	50	5000	50	3000	440	362	D	10	24,53	174	3,19E+05	65%
8	50	5000	50	3000	440	362	D	10,75	26,36	179	2,79E+05	57%
8	50	5000	50	3000	440	362	D	11	26,98	180	2,71E+05	56%
8	50	5000	50	3000	440	362	D	12	29,43	187	2,26E+05	46%
8	50	5000	50	3000	440	362	D	13	31,88	192	2,00E+05	41%
9	50	5000	50	3000	233	254	D	8,2	20,11	195	1,86E+05	100%
9	50	5000	50	3000	233	254	D	10	24,53	233	7,99E+04	43%
9	50	5000	50	3000	233	254	D	10,75	26,36	248	5,95E+04	32%
9	50	5000	50	3000	233	254	D	11	26,98	253	5,41E+04	29%
9	50	5000	50	3000	233	254	D	12	29,43	273	3,78E+04	20%
9	50	5000	50	3000	233	254	D	13	31,88	291	2,79E+04	15%
10	50	5000	50	3000	233	115	D	8,2	20,11	200	1,65E+05	100%
10	50	5000	50	3000	233	115	D	10	24,53	240	6,95E+04	42%
10	50	5000	50	3000	233	115	D	10,75	26,36	256	5,12E+04	31%
10	50	5000	50	3000	233	115	D	11	26,98	261	4,67E+04	28%
10	50	5000	50	3000	233	115	D	12	29,43	281	3,29E+04	20%
10	50	5000	50	3000	233	115	D	13	31,88	300	2,42E+04	15%

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base	Subleito (MPa)	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E _d (10 ⁻⁶) 149 mm	Vida de Fad	Normalização
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(MPa)						South Africa	N(x%)/N(0%)
1	100	5000	50	3000	300	205	D	8,2	20,11	128	1,36E+06	100%
1	100	5000	50	3000	300	205	D	10	24,53	153	5,86E+05	43%
1	100	5000	50	3000	300	205	D	10,75	26,36	163	4,34E+05	32%
1	100	5000	50	3000	300	205	D	11	26,98	166	3,98E+05	29%
1	100	5000	50	3000	300	205	D	12	29,43	179	2,79E+05	20%
1	100	5000	50	3000	300	205	D	13	31,88	191	2,05E+05	15%
2	100	5000	50	3000	263	494	D	8,2	20,11	131	1,22E+06	100%
2	100	5000	50	3000	263	494	D	10	24,53	156	5,34E+05	44%
2	100	5000	50	3000	263	494	D	10,75	26,36	166	3,98E+05	33%
2	100	5000	50	3000	263	494	D	11	26,98	170	3,56E+05	29%
2	100	5000	50	3000	263	494	D	12	29,43	183	2,51E+05	21%
2	100	5000	50	3000	263	494	D	13	31,88	195	1,86E+05	15%
3	100	5000	50	3000	235	577	D	8,2	20,11	137	9,88E+05	100%
3	100	5000	50	3000	235	577	D	10	24,53	163	4,34E+05	44%
3	100	5000	50	3000	235	577	D	10,75	26,36	174	3,19E+05	32%
3	100	5000	50	3000	235	577	D	11	26,98	177	2,94E+05	30%
3	100	5000	50	3000	235	577	D	12	29,43	191	2,05E+05	21%
3	100	5000	50	3000	235	577	D	13	31,88	204	1,50E+05	15%
4	100	5000	50	3000	390	638	D	8,2	20,11	107	3,18E+06	100%
4	100	5000	50	3000	390	638	D	10	24,53	128	1,36E+06	43%
4	100	5000	50	3000	390	638	D	10,75	26,36	136	1,02E+06	32%
4	100	5000	50	3000	390	638	D	11	26,98	139	9,22E+05	29%
4	100	5000	50	3000	390	638	D	12	29,43	149	6,64E+05	21%
4	100	5000	50	3000	390	638	D	13	31,88	159	4,88E+05	15%
5	100	5000	50	3000	590	407	D	8,2	20,11	86	8,95E+06	100%
5	100	5000	50	3000	590	407	D	10	24,53	102	3,99E+06	45%
5	100	5000	50	3000	590	407	D	10,75	26,36	109	2,92E+06	33%
5	100	5000	50	3000	590	407	D	11	26,98	111	2,67E+06	30%
5	100	5000	50	3000	590	407	D	12	29,43	119	1,92E+06	21%
5	100	5000	50	3000	590	407	D	13	31,88	127	1,41E+06	16%
6	100	5000	50	3000	365	106	D	8,2	20,11	120	1,85E+06	100%
6	100	5000	50	3000	365	106	D	10	24,53	143	8,06E+05	44%
6	100	5000	50	3000	365	106	D	10,75	26,36	153	5,86E+05	32%
6	100	5000	50	3000	365	106	D	11	26,98	156	5,34E+05	29%
6	100	5000	50	3000	365	106	D	12	29,43	168	3,76E+05	20%
6	100	5000	50	3000	365	106	D	13	31,88	179	2,79E+05	15%
7	100	5000	50	3000	440	233	D	8,2	20,11	104	3,64E+06	100%
7	100	5000	50	3000	440	233	D	10	24,53	124	1,58E+06	43%
7	100	5000	50	3000	440	233	D	10,75	26,36	132	1,18E+06	32%
7	100	5000	50	3000	440	233	D	11	26,98	135	1,06E+06	29%
7	100	5000	50	3000	440	233	D	12	29,43	145	7,55E+05	21%
7	100	5000	50	3000	440	233	D	13	31,88	155	5,51E+05	15%
8	100	5000	50	3000	440	362	D	8,2	20,11	102	3,99E+06	100%
8	100	5000	50	3000	440	362	D	10	24,53	122	1,71E+06	43%
8	100	5000	50	3000	440	362	D	10,75	26,36	130	1,27E+06	32%
8	100	5000	50	3000	440	362	D	11	26,98	132	1,18E+06	30%
8	100	5000	50	3000	440	362	D	12	29,43	143	8,06E+05	20%
8	100	5000	50	3000	440	362	D	13	31,88	152	6,04E+05	15%
9	100	5000	50	3000	233	254	D	8,2	20,11	142	8,34E+05	100%
9	100	5000	50	3000	233	254	D	10	24,53	170	3,56E+05	43%
9	100	5000	50	3000	233	254	D	10,75	26,36	181	2,64E+05	32%
9	100	5000	50	3000	233	254	D	11	26,98	184	2,44E+05	29%
9	100	5000	50	3000	233	254	D	12	29,43	199	1,69E+05	20%
9	100	5000	50	3000	233	254	D	13	31,88	213	1,22E+05	15%
10	100	5000	50	3000	233	115	D	8,2	20,11	149	6,64E+05	100%
10	100	5000	50	3000	233	115	D	10	24,53	178	2,86E+05	43%
10	100	5000	50	3000	233	115	D	10,75	26,36	190	2,10E+05	32%
10	100	5000	50	3000	233	115	D	11	26,98	193	1,95E+05	29%
10	100	5000	50	3000	233	115	D	12	29,43	209	1,34E+05	20%
10	100	5000	50	3000	233	115	D	13	31,88	223	9,84E+04	15%

Estrut.	Capa		Binder		Base/ Sub-base	Subleito (MPa)	Tipo de Pneu	Carga Eixo (tn)	Carga por Pneu (kN)	E_d (10^{-6}) 199 mm	Vida de Fad South Africa	Normalização N(x%)/N(0%)
	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(MPa)							
1	150	5000	50	3000	300	205	D	8,2	20,11	96	5,32E+06	100%
1	150	5000	50	3000	300	205	D	10	24,53	114	2,36E+06	44%
1	150	5000	50	3000	300	205	D	10,75	26,36	122	1,71E+06	32%
1	150	5000	50	3000	300	205	D	11	26,98	124	1,58E+06	30%
1	150	5000	50	3000	300	205	D	12	29,43	134	1,10E+06	21%
1	150	5000	50	3000	300	205	D	13	31,88	144	7,80E+05	15%
2	150	5000	50	3000	263	494	D	8,2	20,11	96	5,32E+06	100%
2	150	5000	50	3000	263	494	D	10	24,53	114	2,36E+06	44%
2	150	5000	50	3000	263	494	D	10,75	26,36	122	1,71E+06	32%
2	150	5000	50	3000	263	494	D	11	26,98	124	1,58E+06	30%
2	150	5000	50	3000	263	494	D	12	29,43	134	1,10E+06	21%
2	150	5000	50	3000	263	494	D	13	31,88	144	7,80E+05	15%
3	150	5000	50	3000	235	577	D	8,2	20,11	99	4,60E+06	100%
3	150	5000	50	3000	235	577	D	10	24,53	118	2,00E+06	44%
3	150	5000	50	3000	235	577	D	10,75	26,36	126	1,47E+06	32%
3	150	5000	50	3000	235	577	D	11	26,98	129	1,31E+06	29%
3	150	5000	50	3000	235	577	D	12	29,43	139	9,22E+05	20%
3	150	5000	50	3000	235	577	D	13	31,88	149	6,64E+05	14%
4	150	5000	50	3000	390	638	D	8,2	20,11	80	1,26E+07	100%
4	150	5000	50	3000	390	638	D	10	24,53	96	5,32E+06	42%
4	150	5000	50	3000	390	638	D	10,75	26,36	102	3,99E+06	32%
4	150	5000	50	3000	390	638	D	11	26,98	104	3,64E+06	29%
4	150	5000	50	3000	390	638	D	12	29,43	113	2,46E+06	19%
4	150	5000	50	3000	390	638	D	13	31,88	120	1,85E+06	15%
5	150	5000	50	3000	590	407	D	8,2	20,11	67	2,92E+07	100%
5	150	5000	50	3000	590	407	D	10	24,53	80	1,26E+07	43%
5	150	5000	50	3000	590	407	D	10,75	26,36	85	9,46E+06	32%
5	150	5000	50	3000	590	407	D	11	26,98	87	8,48E+06	29%
5	150	5000	50	3000	590	407	D	12	29,43	94	5,88E+06	20%
5	150	5000	50	3000	590	407	D	13	31,88	100	4,38E+06	15%
6	150	5000	50	3000	365	106	D	8,2	20,11	92	6,51E+06	100%
6	150	5000	50	3000	365	106	D	10	24,53	110	2,79E+06	43%
6	150	5000	50	3000	365	106	D	10,75	26,36	117	2,08E+06	32%
6	150	5000	50	3000	365	106	D	11	26,98	120	1,85E+06	28%
6	150	5000	50	3000	365	106	D	12	29,43	129	1,31E+06	20%
6	150	5000	50	3000	365	106	D	13	31,88	138	9,54E+05	15%
7	150	5000	50	3000	440	233	D	8,2	20,11	80	1,26E+07	100%
7	150	5000	50	3000	440	233	D	10	24,53	96	5,32E+06	42%
7	150	5000	50	3000	440	233	D	10,75	26,36	102	3,99E+06	32%
7	150	5000	50	3000	440	233	D	11	26,98	104	3,64E+06	29%
7	150	5000	50	3000	440	233	D	12	29,43	112	2,56E+06	20%
7	150	5000	50	3000	440	233	D	13	31,88	120	1,85E+06	15%
8	150	5000	50	3000	440	362	D	8,2	20,11	78	1,42E+07	100%
8	150	5000	50	3000	440	362	D	10	24,53	93	6,18E+06	43%
8	150	5000	50	3000	440	362	D	10,75	26,36	100	4,38E+06	31%
8	150	5000	50	3000	440	362	D	11	26,98	102	3,99E+06	28%
8	150	5000	50	3000	440	362	D	12	29,43	110	2,79E+06	20%
8	150	5000	50	3000	440	362	D	13	31,88	117	2,08E+06	15%
9	150	5000	50	3000	233	254	D	8,2	20,11	104	3,64E+06	100%
9	150	5000	50	3000	233	254	D	10	24,53	124	1,58E+06	43%
9	150	5000	50	3000	233	254	D	10,75	26,36	132	1,18E+06	32%
9	150	5000	50	3000	233	254	D	11	26,98	135	1,06E+06	29%
9	150	5000	50	3000	233	254	D	12	29,43	146	7,31E+05	20%
9	150	5000	50	3000	233	254	D	13	31,88	156	5,34E+05	15%
10	150	5000	50	3000	233	115	D	8,2	20,11	110	2,79E+06	100%
10	150	5000	50	3000	233	115	D	10	24,53	131	1,22E+06	44%
10	150	5000	50	3000	233	115	D	10,75	26,36	140	8,91E+05	32%
10	150	5000	50	3000	233	115	D	11	26,98	143	8,06E+05	29%
10	150	5000	50	3000	233	115	D	12	29,43	155	5,51E+05	20%
10	150	5000	50	3000	233	115	D	13	31,88	166	3,98E+05	14%