UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

THEONELLY NASCIMENTO TEODOZIO

UM ESTUDO PARAMÉTRICO SOBRE TENSÕES, DEFORMAÇÕES E RESISTÊNCIA À FADIGA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Maceió
2012

THEONELLY NASCIMENTO TEODOZIO

UM ESTUDO PARAMÉTRICO SOBRE TENSÕES, DEFORMAÇÕES E RESISTÊNCIA À FADIGA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientador:
Prof. Dr. Severino Pereira Cavalcanti Marques

Maceió
2012

Catalogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Fabiana Camargo dos Santos

T314e Teodozio, Theonelly Nascimento.
Um estudo paramétrico sobre tensões, deformações e resistência à fadiga de pavimentos asfálticos / Theonelly Nascimento Teodozio. -- 2012.
74 f. : il., tabs., grafs.

Orientador: Severino Pereira Cavalcani Marques.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil : Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2012.

Bibliografia: f. 68-71.

1. Método dos elementos finitos. 2. Pavimentos rodoviários. 3. Pavimentos – Fadiga. 4. Pavimentos – Tensões e deformações. I. Título.

CDU: 624.044:625.7

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

UM ESTUDO PARAMÉTRICO SOBRE TENSÕES, DEFORMAÇÕES E RESISTÊNCIA À FADIGA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.

THEONELLY NASCIMENTO TEODOZIO

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Severino Pereira Cavalcanti Marques
Orientador – CTEC/UFAL

Prof. Dr. William Wagner Matos Lira
CTEC/UFAL

Prof. Dr. Wayne Santos de Assis
CTEC/UFAL

Prof. Dr. Guillermo Juan Creus
UFRGS/UNILA

Campus A. C. Simões, Av. Lourival de Melo Mota, S/N
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas
Tel/Fax: (82) 3214-1863
E-mail: ppgec@ctec.ufal.br
Homepage: www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec

Dedico este trabalho à memória de meu pai,
Benedito José Teodozio,
e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao Poder Superior, Deus, pelo Amor e Bondade que nos conforta e fortalece nos momentos de dificuldade.

Ao Senhor José Gabriel da Costa, Mestre Gabriel, pelo espelho de retidão de caráter, humildade e amor ao próximo que nos inspira e impulsiona ao aperfeiçoamento espiritual.

À minha família, em especial a minha mãe, Maria de Fátima Nascimento Teodozio, cujo esforço e renúncia resultaram em um terreno fértil para o meu desenvolvimento profissional.

À minha esposa, Regina Maria Lima de Macêdo Teodozio, pelo Amor, Dedicação e Compreensão que me faz querer ser uma pessoa melhor a cada dia.

Ao Prof. Severino Pereira Cavalcanti Marques pelo exemplo de dedicação ao Magistério e pela consideração de aceitar o desafio de orientar este trabalho mesmo com a mudança repentina de tema.

A todos os amigos e companheiros de Mestrado pelo apoio e aprendizado mútuo, em especial aos integrantes do PEM: Joseanderson, Giancarlo, Daniel, e demais agregados: Reberth, David, Michele.

A todos os Docentes do PPGEC – Estruturas pela paciência em transmitir o conhecimento técnico que serve de lastro seguro para a prática profissional.

“Tem que ter as dificuldades para se vencer.”

José Gabriel da Costa

RESUMO

No Brasil, o aumento nos investimentos em infraestrutura de transportes contempla tanto a manutenção quanto a implantação de novas rodovias. Contudo, o aumento do tráfego, em volume e peso, associado às condições de intempéries, tem resultado na degradação precoce do pavimento. Nesse contexto, a análise numérica da estrutura do pavimento torna-se cada vez mais relevante para prever o comportamento dos pavimentos. Este trabalho tem o objetivo de estudar numericamente as tensões e deformações em estruturas de pavimentos, submetidas a cargas de tráfego, através do Método dos Elementos Finitos, e avaliar seus efeitos sobre a vida útil da camada de revestimento. Diversas análises numéricas serão realizadas modificando as características físicas das camadas do pavimento. Os valores adotados para as características das camadas são obtidos através de pesquisa bibliográfica da faixa de valores encontrada para cada material utilizado. A cada análise é avaliado o valor da deflexão e da deformação, respectivamente, no topo e na base do revestimento. O número de ciclos necessários para a fadiga do revestimento é calculado através de três modelos disponíveis na literatura. As análises indicam que a camada de sub-base é relevante para reduzir as tensões no topo do subleito, enquanto que a base e o revestimento influenciam mais significativamente na deflexão no topo do pavimento e na fadiga do revestimento.

Palavras-chave: MEF. Pavimentos Rodoviários. Fadiga. Tensões e Deformações.

ABSTRACT

In Brazil, the investment in infrastructure of transports has increased for both maintenance and foundation of highways. Although, the traffic growth rates, in volume and weight, in addition to the weather conditions, has produce dearly degradation of the pavements. In this context, the numeric analysis of pavement structures became more and more relevant to predict the behavior of the pavements. This work evaluates numerically the stress and strain in pavements, according the traffic loading, using Finite Element Method. Thereby, the estimation of that effect in the life cycle of the wearing course is done. Several numerical analyses are fulfilled considering changes in the physical features of pavement layers. The adopted values for the layers features are acquired from the literature considering the interval of values obtained from each material in use. Each analysis includes the calculation of the deflection and the strain, respectively, in the top and in the base of wearing course. The estimation of the necessary number of cycles for the fatigue in the wearing course is done by three models from the literature. The analysis indicates the subbase course as relevant to reduce the stress in the top of subgrade, while the base and wearing course influence more significantly in the deflections in the top of pavement and the fatigue in wearing course.

Keywords: FEM. Highway pavement. Fatigue. Stress and Strains.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESTRUTURA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. 15
FIGURA 2 - IMPRIMAÇÃO EM CAMADA DE BASE. 17
FIGURA 3 - RESPOSTA MECÂNICA DOS PAVIMENTOS. 19
FIGURA 4 - CBUQ SENDO ESPALHADO COM VIBROACABADORA. 21
FIGURA 5 - EXECUÇÃO DE SUB-BASE DE TERCEIRA FAIXA NA RODOVIA BR-101/AL. 22
FIGURA 6 - RELAÇÃO DE UM CICLO DE CARGA E DESCARGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS. 25
FIGURA 7 - ÁREA DE CONTATO IMPRESSA EM CARTOLINA (ALBANO, 2000). 29
FIGURA 8 - ÁREA DE CONTATO PROPOSTA EM HUANG (2004). 30
FIGURA 9 - EQUILÍBRIO DE FORÇAS PARA UM PNEUMÁTICO COM PAREDES SOBRE COMPRESSÃO. 31
FIGURA 10 - DOMÍNIO DE ANÁLISE SUGERIDO POR DUNCAN (1968 APUD SOUZA, 2003). 32
FIGURA 11 - ENSAIO DE FLEXÃO DE VIGA DE CONCRETO ASFÁLTICO. 34
FIGURA 12 - ÁREA DE CONTATO DO PNEUMÁTICO COM O REVESTIMENTO. 40
FIGURA 13 - CARACTERÍSTICAS DO LAMINADO MODELADO. 41
FIGURA 14 - ISOFAIXAS DE TENSÕES NORMAIS VERTICAIS, EM PA, PARA ANÁLISES SUCESSIVAS COM A VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA SUB-BASE. 42
FIGURA 15 - VARIAÇÃO DA DEFLEXÃO NO TOPO PAVIMENTO (A), DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA HORIZONTAL NA BASE DO REVESTIMENTO (B) E TENSÃO NORMAL VERTICAL (C) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DA SUB-BASE. 43
FIGURA 16 - ISOFAIXAS DE DEFORMAÇÕES MÁXIMAS PRINCIPAIS PARA OS RESPECTIVOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DA SUB-BASE. 44
FIGURA 17 - NÚMERO N OBTIDO POR MEIO DOS MODELOS DE BROWN ET AL. (1977), BABURAMANI (1999) E KHALID (2000) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DA SUB-BASE. 45
FIGURA 18 - ISOFAIXAS DE TENSÕES, EM PA, PARA ANÁLISES SUCESSIVAS COM A VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DA CAMADA DE BASE. 46
FIGURA 19 - VARIAÇÃO DA DEFLEXÃO NO TOPO DO REVESTIMENTO (A), DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA HORIZONTAL NA BASE DO REVESTIMENTO (B) E DEFORMAÇÃO NO TOPO DO SUBLEITO (C) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DA BASE. 47
FIGURA 20 - ISOFAIXAS DE DEFORMAÇÕES MÁXIMAS PRINCIPAIS PARA OS RESPECTIVOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DA BASE. 48
FIGURA 21 - NÚMERO N OBTIDO POR MEIO DOS MODELOS DE BALBO (2004), BABURAMANI (1999)E KHALID (2000) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DA BASE. 48
FIGURA 22 - ISOFAIXAS DE TENSÕES, EM PA, PARA ANÁLISES SUCESSIVAS COM A VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DA CAMADA DE REVESTIMENTO. 50
FIGURA 23 - VARIAÇÃO DA DEFLEXÃO NO TOPO DO REVESTIMENTO, DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA HORIZONTAL NA BASE DO REVESTIMENTO E DEFORMAÇÃO NO TOPO DO SUBLEITO EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DO REVESTIMENTO. ..51
FIGURA 24 - ISOFAIXAS DE DEFORMAÇÕES MÁXIMAS PRINCIPAIS PARA OS RESPECTIVOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DA BASE. 52
FIGURA 25 - NÚMERO N OBTIDO POR MEIO DOS MODELOS DE BALBO (2004), BABURAMANI (1999)E KHALID (2000) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DO REVESTIMENTO. 52
FIGURA 26 - CARACTERÍSTICAS DO LAMINADO MODELADO COM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 53

FIGURA 27 - ISOFAIXAS DE TENSÕES, EM PA, PARA ANÁLISES SUCESSIVAS COM A VARIAÇÃO 54
FIGURA 28 - VARIAÇÃO DEFLEXÃO (A), DEFORMAÇÃO (B) E DA TENSÃO (C) NOS PONTOS DE INTERESSE EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DA SUB-BASE PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 55
FIGURA 29 - ISOFAIXAS DE DEFORMAÇÕES PARA OS RESPECTIVOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DA BASE PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 56
FIGURA 30 - NÚMERO N OBTIDO POR MEIO DOS MODELOS DE BROWN ET AL. (1977), BABURAMANI (1999) E KHALID (2000) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DA SUB-BASE PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS.....57
FIGURA 31 - ISOFAIXAS DE TENSÕES PARA ANÁLISES SUCESSIVAS COM A VARIAÇÃO 58
FIGURA 32 - VARIAÇÃO DA TENSÃO NO TOPO DO SUBLEITO (A), DA DEFLEXÃO (B) E DEFORMAÇÃO (C) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DA BASE PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 59
FIGURA 33 - DEFORMAÇÃO PRINCIPAL EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DO REVESTIMENTO PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 60
FIGURA 34 - NÚMERO N OBTIDO POR MEIO DOS MODELOS DE BROWN ET AL. (1977), BABURAMANI (1999) E KHALID (2000) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DA BASE PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS.....60
FIGURA 35 - ISOFAIXAS DE TENSÕES, EM PA, PARA ANÁLISES SUCESSIVAS COM A VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DA CAMADA DE REVESTIMENTO PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 62
FIGURA 36 - VARIAÇÃO DA DEFLEXÃO NO TOPO DO REVESTIMENTO, DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA HORIZONTAL NA BASE DO REVESTIMENTO E DEFORMAÇÃO NO TOPO DO SUBLEITO EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DO REVESTIMENTO PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 63
FIGURA 37 - NÚMERO N OBTIDO POR MEIO DOS MODELOS DE BROWN ET AL. (1977), (BABURAMANI, 1999) E (KHALID, 2000) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DO REVESTIMENTO PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 63
FIGURA 38 - DEFORMAÇÃO PRINCIPAL EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, EM MPA, DO REVESTIMENTO PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 64
FIGURA 39 - GRÁFICO DAS CURVAS OBTIDAS ATRAVÉS DO NÚMERO N, PARA CARREGAMENTOS.....66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS CAMADAS CONSTITUINTES DO PAVIMENTO. (BERNUCCI, 2006) E (BALBO,2007). 41
TABELA 2 - VALORES DO NÚMERO N OBTIDOS ATRAVÉS DOS MODELOS DE BROWN ET AL. (1977), BABURAMANI (1999) E KHALID (2000) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA SUB-BASE (Esb). 44
TABELA 3 - VALORES DE N OBTIDOS ATRAVÉS DOS MODELOS DE BALBO (2004), ...49
TABELA 4 - VALORES DO NÚMERO N OBTIDOS ATRAVÉS DOS MODELOS DE BALBO (2004), BABURAMANI (1999) E KHALID (2000) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO REVESTIMENTO (Er). 50
TABELA 5 - VALORES DO NÚMERO N OBTIDOS ATRAVÉS DOS MODELOS DE BROWN ET AL. (1977), BABURAMANI (1999) E KHALID (2000) PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 56
TABELA 6 - VALORES DO NÚMERO N OBTIDOS ATRAVÉS DOS MODELOS DE BROWN ET AL. (1977), BABURAMANI (1999) E KHALID (2000) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA BASE (Eb) PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS......61
TABELA 7 - VALORES DO NÚMERO N OBTIDOS ATRAVÉS DOS MODELOS DE (BALBO,2007), (BABURAMANI, 1999) E (KHALID, 2000) PARA OS RESPECTIVOS VALORES DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO REVESTIMENTO (Er) PARA UM CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 62
TABELA 8 - VARIAÇÃO PERCENTUAL DA DEFLEXÃO NO TOPO DO PAVIMENTO (ΔDef), DEFORMAÇÃO NA BASE DO REVESTIMENTO ($\Delta \varepsilon ht$) E TENSÃO NORMAL VERTICAL NO TOPO DO SUBLEITO ($\Delta Ssub$) EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE(ΔE) PARA O PAVIMENTO SUBMETIDO A CARREGAMENTO DE RODA SIMPLES......65
TABELA 9 - VARIAÇÃO DA DEFLEXÃO NO TOPO DO REVESTIMENTO (ΔDef), DEFORMAÇÃO HORIZONTAL NA BASE DO REVESTIMENTO ($\Delta \varepsilon ht$) E TENSÃO NORMAL VERTICAL NO TOPO DO SUBLEITO ($\Delta Ssub$) EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (ΔE) PARA O PAVIMENTO SUBMETIDO A CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS......65
TABELA 10 – GRANDEZAS ESTUDADAS NOS RESPECTIVOS PONTOS DE INTERESSE EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (ΔE) PARA O PAVIMENTO COM REVESTIMENTO DE 10 CM SUBMETIDO A CARREGAMENTO DE RODAS DUPLAS. 67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA 12
1.2 OBJETIVOS 14
1.3 METODOLOGIA 15
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO 16

2. CONSTITUIÇÃO DE UM PAVIMENTO 17

2.1 ESTRUTURA ESTRATIFICADA DE UM PAVIMENTO 18
2.1.1 Revestimentos de pavimentos 20
2.1.2 Bases e sub-bases de pavimentos 21
2.1.3 Subleito de pavimentos 22
2.2 MATERIAIS EMPREGADOS EM PAVIMENTOS: TIPOS E PROPRIEDADES 23
2.2.1 Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) 23
2.2.2 Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) 26

3. CARGAS, DOMÍNIO DE ANÁLISE E FADIGA EM PAVIMENTOS 28

3.1 CARGAS 28
3.2 DOMÍNIO DE ANÁLISE 32
3.3 FADIGA 33
3.3.1 Modelo de Brown 36
3.3.2 Modelo do Instituto do Asfalto (EUA) 36
3.3.3 Modelo de Khalid 36
3.3.4 Modelo de Monismith 37
3.3.5 Modelo de Shell 37
3.3.6 Modelo de El-Basyouny 37

4. APLICAÇÕES NUMÉRICAS 39

4.1 ANÁLISE ELÁSTICA LINEAR COM UMA CARGA DE RODA 40
4.1.1 Variação do módulo de elasticidade da camada de sub-base 42
4.1.2 Variação do módulo de elasticidade da camada de base 45
4.1.3 Variação do módulo de elasticidade da camada de revestimento 49
4.2 ANÁLISE ELÁSTICA LINEAR COM DUAS CARGAS DE RODA 53
4.2.1 Variação do módulo de elasticidade da camada de sub-base 54
4.2.2 Variação do módulo de elasticidade da camada de base 58
4.2.3 Variação do módulo de elasticidade da camada de revestimento 61
4.3 SÍNTESE E ANÁLISE DOS RESULTADOS 64

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 68

REFERÊNCIAS 71

1. INTRODUÇÃO

1.1 Relevância do Tema

Após a crise econômica mundial que atingiu diversos países em 2007, a economia brasileira conseguiu atrair investimentos, fortalecer a economia e conquistar posição de destaque no cenário internacional.

Contudo, a carência de investimentos em infraestrutura de transportes resultou em um obstáculo para a continuidade do crescimento econômico.

> "*Atualmente encontra-se em processo de aplicação no Brasil um novo ciclo de investimentos naquilo que se denomina de infraestrutura, como ações estratégicas para estruturar uma das áreas que emperra o desenvolvimento econômico brasileiro, talvez o maior gargalo, além da capacitação dos recursos humanos.*" (PIMENTEL, 2010).

Procurando mitigar essa situação, no ano de 2007 foram realizados investimentos em diversos setores contemplando também a infraestrutura de transportes. Os investimentos em rodovias se concentraram tanto na implantação de novas rodovias, visando dar maior fluidez ao trânsito, bem como a manutenção das rodovias existentes.

O aumento dos investimentos em manutenção do pavimento ocorre em virtude dos danos resultantes do maior número de veículos circulando nas rodovias e são agravados pelo carregamento do eixo de roda desses veículos com intensidade superior ao limite estabelecido pelos órgãos fiscalizadores.

"No Brasil, como na maioria dos países, a carga máxima por eixo simples (com rodas duplas) é de 10 toneladas" (BRASIL, 2005). Apesar da carga máxima indicar um valor de dez toneladas (100 KN), o método de projeto de pavimentos flexíveis utiliza uma carga de eixo padrão de 82 KN, eixo simples com rodas duplas (BRASIL, 1981).

Existe uma tendência de utilização de métodos mecanicistas ou empírico-mecanicistas em diferentes atividades relacionadas com o dimensionamento de pavimentos rodoviários (JUNIOR et al., 2003; MOTTA et al., 1991; BENEVIDES et al.; 2000). Os métodos mecanicistas utilizam apenas modelos teóricos enquanto que os empíricos-mecanicistas calibram os modelos teóricos com dados experimentais obtidos em campo e em laboratório.

Segundo BALBO (2007), na década de 1960, com o crescimento progressivo das técnicas computacionais, as diversas teorias elásticas desenvolvidas no passado puderam ser facilmente empregadas para a análise de deformações e tensões em estruturas de pavimentos, mediante uma diversidade de programas computacionais desenvolvidos por autores de vários países.

A literatura cita diversos programas computacionais desenvolvidos utilizando o Método dos Elementos Finitos para obter os valores das tensões e deformações em estruturas de pavimentos, tais como PAVE, FEPAVE, JULEA, AYMA, KENLAYER, LEDFAA, CIRCLY (FRANCO, 2007). Neste trabalho é utilizado o programa computacional ABAQUS.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) (COOK, 1989) é a ferramenta mais utilizada para análises numéricas de estruturas em geral. Com o uso do MEF, pode-se analisar numericamente a estrutura de maciços estratificados avaliando os campos de deslocamentos, deformações e tensões nas suas diversas camadas. Particularmente, a informação sobre o campo de deformação é utilizada para estimar a vida útil do pavimento à fadiga através de modelos disponíveis na literatura.

A fadiga é a patologia mais comum presente em pavimentos rodoviários (HUBER, 1999 apud JUNIOR et al., 2000). Diversos autores citam modelos para previsão deste fenômeno em pavimentos utilizando conceitos da mecânica da fratura bem como a utilização de modelos empírico-mecanicistas (BROWN et al., 1977 apud BALBO, 2007; MEDINA et al., 2005, KHALID, 2000).

De acordo com BALBO (2007):

> "*Danos em pavimentos asfálticos devido às repetições de tensões e deformações causadas tanto pelo carregamento do tráfego como pelos fatores ambientais podem se manifestar como fissuras de fadigas, as quais são consideradas como um mecanismo de falha primário em pavimentos asfálticos. Consequentemente, as características de fadiga de asfaltos são um importante parâmetro de projeto de pavimentos.*"

A deformação vertical no topo do revestimento é utilizada para avaliar a eficiência do pavimento em resistir às tensões impostas pelo tráfego transmitindo ao subleito solicitações capazes de serem absorvidas sem o comprometimento da estrutura do pavimento.

Os valores das deformações horizontais, na parte inferior do revestimento, e verticais, na superfície do pavimento, são importantes para avaliar o adequado dimensionamento do pavimento, os quais são fortemente influenciados pelos módulos de elasticidade das camadas.

A avaliação experimental do comportamento de um pavimento em função das características mecânicas das camadas é uma tarefa de difícil execução, em virtude dos custos envolvidos com tal procedimento. Para tal avaliação, os métodos numéricos surgem como uma alternativa. Através deles, torna-se possível a determinação dos campos de tensões e de deformações no pavimento variando as propriedades mecânicas das diversas camadas, permitindo analisar a influência das mesmas sobre os comportamentos local e global do pavimento, com custo bastante reduzido.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral estudar numericamente as tensões e deformações em estruturas tridimensionais de pavimentos asfálticos, submetidas a cargas de tráfego, através do Método dos Elementos Finitos, e avaliar seus efeitos sobre a resistência à fadiga da camada de revestimento.

Os objetivos específicos do trabalho consistem em:

(a) Estudar a influência da rigidez das camadas, representada pelos respectivos módulos de elasticidade, no valor da deformação no topo e base do revestimento, bem como do valor das tensões no topo do subleito do pavimento rodoviário;

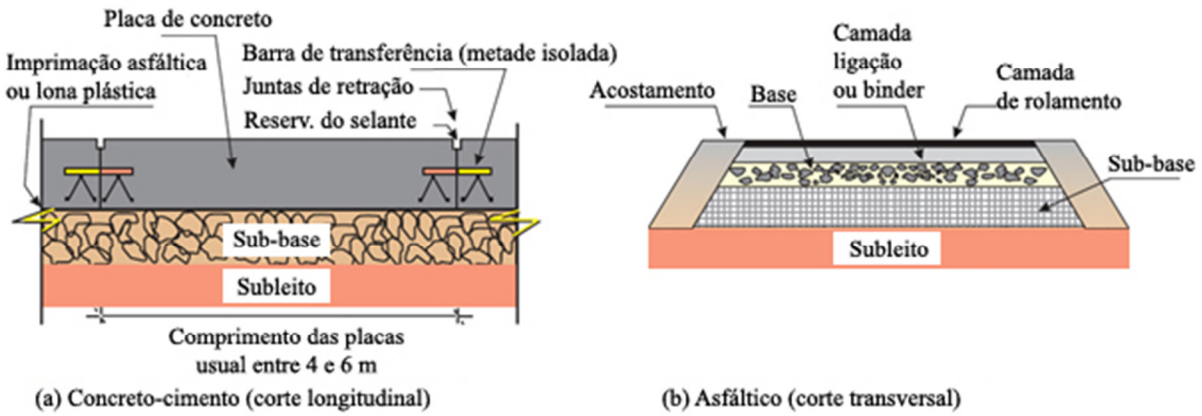
(b) Avaliar a resistência à fadiga representada pelo número de carregamentos necessários para o pavimento entrar em colapso (N) através de modelos disponíveis na literatura.

O programa ABAQUS apresentou-se como um objetivo secundário de modo a oportunizar ao mestrando a utilização de um software com potencial de solução de problemas de diversas áreas, transformando-se em uma ferramenta útil na prática profissional.

1.3 Metodologia

Os pavimentos rodoviários apresentam características de maciços estratificados e de maneira geral são constituídos de quatro camadas, as quais recebem as seguintes denominações: revestimento, base, sub-base e subleito. A ilustração das estruturas de dois tipos de pavimentos é apresentada na Fig. 1.

Figura 1 - Estrutura de pavimentos rodoviários.



Fonte: Adaptado de Bernucci, 2006.

Na Fig. 1(a) o revestimento é do tipo concreto de cimento Portland onde a placa possui função de revestimento e base. Na Fig. 1(b) o revestimento é constituído pela camada de *binder* e pela camada de rolamento, sendo ambos de concreto betuminoso usinado a quente, diferenciados apenas pela granulometria dos agregados.

No estudo apresentado nesta dissertação, considera-se o pavimento como um meio contínuo, onde o contato entre as camadas acontece de maneira perfeita, ou seja, sem deslizamento relativo. Para cada camada são atribuídas características específicas representadas através de parâmetros elásticos. Os materiais que constituem as camadas são considerados como homogêneos e isótropos.

Definido o domínio espacial de análise e as características físicas das camadas, realiza-se uma análise tridimensional com o Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o programa ABAQUS, para avaliar as tensões e deformações geradas em virtude das cargas de tráfego. Tais cargas são consideradas estáticas e apresentam uma área de contato em forma de falsa elipse.

As análises tridimensionais são realizadas sucessivamente, alterando-se o valor do módulo de elasticidade das camadas, efetuando-se o registro dos valores relevantes para avaliação do desempenho do pavimento. Com o resultado dessas análises, pode-se avaliar, por exemplo, a influência dos módulos de elasticidade das camadas sobre as deformações de tração na parte inferior do revestimento. Estas últimas deformações são utilizadas em modelos disponíveis na literatura com a finalidade de obter o número de ciclos necessários para o revestimento apresentar degradação por fadiga. Por sua vez, a deformabilidade vertical do revestimento indica a suscetibilidade da estrutura do pavimento ao surgimento de diversas patologias, dentre elas trilhas de roda e "panelas", sendo um indicativo da capacidade de suporte de carga da estrutura.

Nesse trabalho, desconsiderou-se o comportamento viscoelástico do revestimento uma vez que os veículos ao trafegarem nas rodovias transferem a carga ao pavimento em frações de segundos. Ainda em relação às hipóteses adotadas, percebeu-se, ao realizar as análises numéricas preliminares, que as deformações, no presente caso, não alcançaram magnitudes de forma a tornar relevante o efeito da plasticidade das demais camadas do pavimento, por isso considerou-se um comportamento elástico das demais camadas do pavimento.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho é dividido em cinco capítulos. O primeiro deles apresenta uma introdução onde são abordados tópicos relacionados com aspectos gerais dos pavimentos rodoviários, relevância do tema, metodologia e estruturação do trabalho.

No capítulo dois, apresenta-se uma descrição mais detalhada de um pavimento rodoviário com uma breve abordagem do comportamento mecânico dos principais materiais constituintes das camadas.

O capítulo três apresenta conceitos, definições e procedimentos empregados na análise das tensões e deformações no pavimento, contemplando o estudo das cargas, definição do domínio de análise, modelos constitutivos e avaliação de fadiga.

As aplicações numéricas e os resultados das análises são apresentados no capítulo quatro, enquanto que o capítulo cinco trata das considerações finais do trabalho.

2. CONSTITUIÇÃO DE UM PAVIMENTO

De acordo com BALBO (2007):

> "*O pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios*."

As camadas dos pavimentos são concebidas com a finalidade de transmitir os esforços, resultantes da aplicação do carregamento oriundos do tráfego, do revestimento até o subleito, de forma que as pressões sejam aliviadas à medida que são transmitidas até as camadas inferiores, sendo estas geralmente menos resistentes.

Comumente, entre as camadas do pavimento é executada uma imprimação a qual consiste na aplicação de um material asfáltico sobre a superfície das mesmas. De acordo com a finalidade, ela pode ser denominada pintura de ligação ou imprimação impermeabilizante. Na Fig. 2 pode-se visualizar a imprimação aplicada em uma camada de base.

Figura 2 - Imprimação em camada de base.

Fonte: Autor, 2012.

A imprimação é denominada pintura de ligação quando possui a função de aderir uma camada à outra, e denominada imprimação impermeabilizante quando tem a função de impermeabilizar uma camada de solo ou de material granular. Em virtude da execução costumeira da pintura de ligação na execução de pavimentos rodoviários de concreto asfáltico, admite-se que o comportamento da estrutura, estudada neste trabalho, não permite deslizamentos relativos entre as camadas.

A seguir, apresenta-se de maneira resumida a caracterização dos materiais comumente utilizados na constituição das camadas de um pavimento.

2.1 Estrutura estratificada de um pavimento

Um pavimento rodoviário é constituído de camadas de diferentes materiais adequadamente compactados e dimensionados para resistir aos esforços resultantes da aplicação do carregamento oriundo do tráfego de veículos.

De maneira geral, um pavimento é constituído de quatro camadas: revestimento, base, sub-base e subleito. Na existência de um subleito com reduzida capacidade de suporte, pode ser necessária a execução de uma camada adicional denominada reforço de subleito. Contudo, essa situação não se configura como regra geral. A estrutura genérica de um pavimento de concreto asfáltico e concreto Portland é apresentada na Fig. 1.

Sendo um pavimento rodoviário constituído de diversas camadas, existe uma dificuldade em definir um termo apropriado para descrever o comportamento mecânico de toda a estrutura. Classicamente os pavimentos recebem a denominação de rígidos ou flexíveis.

Em SENÇO (1997) os pavimentos rígidos são definidos como aqueles pouco deformáveis, constituídos principalmente de concreto de cimento, rompendo por tração na flexão, quando sujeitos a deformações.

Em relação aos pavimentos flexíveis o mesmo autor menciona:

> "*Pavimentos flexíveis são aqueles em que as deformações, até um certo limite, não levam ao rompimento. São dimensionados normalmente a compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga.*"

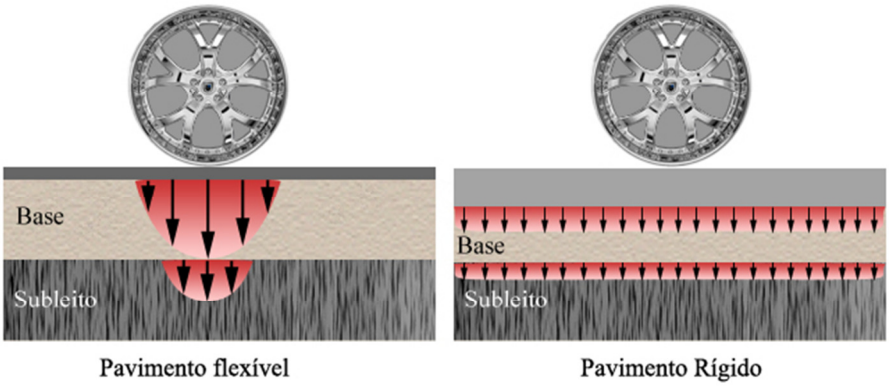
Essa classificação resulta em dificuldades quando se utiliza em um mesmo pavimento camadas flexíveis e rígidas simultaneamente, como é o caso de revestimentos de concreto asfálticos, que é flexível, sobre uma camada de solo-cimento, que é base rígida.

No senso comum, a nomenclatura pavimento rígido é utilizada para designar os pavimentos de concreto de cimento Portland, enquanto que os pavimentos de concretos asfálticos são denominados de pavimentos flexíveis.

Em YODER (1975) a classificação do pavimento em rígido e flexível é obtida em função do espraiamento das tensões do revestimento até o subleito. Segundo este autor, uma dada carga de tráfego atuante sobre um pavimento flexível impõe nessa estrutura um campo de tensões muito concentrado nas proximidades do ponto de aplicação da mesma, enquanto que em um pavimento rígido, verifica-se um campo de tensões bem mais disperso, com os efeitos da carga distribuídos de forma equitativa ao longo de uma considerável extensão da placa de concreto, o que proporciona menores magnitudes de esforços verticais (pressões) no subleito.

A Fig. 3 apresenta o comportamento esperado dos pavimentos flexíveis e rígidos quando submetidos a um carregamento de roda, onde no pavimento flexível as pressões são mais concentradas, enquanto que no pavimento rígido as pressões são mais dispersas.

Figura 3 - Resposta mecânica dos pavimentos.



Fonte: Autor, 2012.

A dificuldade em classificar a estrutura do pavimento, fez com que surgissem ainda outras denominações, dentre elas: (a) pavimento semi-rígido, quando constituído de base rígida com revestimento asfáltico; (b) pavimento *whitetopping,* no caso em que o revestimento asfáltico existente é sobreposto por uma camada de concreto de cimento Portland; (c) pavimento composto, onde o pavimento de concreto armado existente é sobreposto por uma camada de concreto asfáltico.

Assim, um pavimento rodoviário é constituído por camadas de materiais com comportamentos mecânicos diferentes, e por todo exposto, deve-se tomar o devido cuidado para não incorrer em erros de classificação no que diz respeito ao comportamento mecânico da estrutura do pavimento observando-se apenas a constituição do revestimento.

As expressões pavimento rígido e pavimento flexível são utilizadas na prática apenas para informar a constituição da camada de revestimento, não fazendo alusão ao comportamento mecânico da estrutura do pavimento.

2.1.1 Revestimentos de pavimentos

O revestimento é a camada mais superficial do pavimento e, de maneira geral, a que apresenta maior resistência. Sendo a camada mais nobre do pavimento, deve ser executada de forma a apresentar um bom desempenho tanto estruturalmente quanto funcionalmente.

Em BRASIL (1998), o desempenho estrutural refere-se à capacidade de um pavimento manter sua integridade estrutural sem apresentar falhas significativas. A perda da capacidade estrutural do revestimento resulta em trincamentos e deformações que tendem a se agravar ao longo do tempo.

O desempenho funcional refere-se à capacidade do pavimento de satisfazer sua função principal, que é de fornecer uma superfície com serventia adequada em termos de qualidade de rolamento (BRASIL, 1998). A característica relacionada com a serventia que mais afeta a avaliação dos usuários é a irregularidade horizontal.

Os revestimentos mais utilizados em pavimentos rodoviários são constituídos de concreto betuminoso ou por concreto de cimento Portland. Além desses, existem também o macadame betuminoso, concreto asfáltico pré-misturado a frio, areia asfalto a quente e a frio, microrrevestimentos, tratamentos superficiais, blocos articulados, entre outros (SALGADO, 2008).

A Fig. 4 mostra a distribuição do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), ou simplesmente concreto asfáltico (CA), antes de sua compactação na pista de rolamento.

Figura 4 - CBUQ sendo espalhado com vibroacabadora.

Fonte: Autor, 2012.

2.1.2 Bases e sub-bases de pavimentos

A base é a camada que dá suporte ao revestimento e tem a função de resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e transmiti-los às camadas subjacentes. Além disso, apresenta também importante função hidráulica quando constituída de material granular.

A Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) e o Macadame Hidráulico (MH) são dois tipos de materiais encontrados com frequência na camada de base de projetos de rodovias no Brasil.

Quando durante o dimensionamento obtém-se uma camada de base de elevada espessura, adota-se uma camada complementar denominada sub-base, sendo esta uma camada mais econômica.

A execução dessa camada acontece também quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, a construção da camada de base sobre a regularização ou reforço do subleito não for recomendada. Uma sub-base de terceira faixa compactada pode ser visualizada na Fig. 5.

Figura 5 - Execução de sub-base de terceira faixa na rodovia BR-101/AL.

Fonte: Autor, 2012.

2.1.3 Subleito de pavimentos

O subleito é a camada inicial do pavimento. Nas situações de corte do corpo estradal, o subleito é constituído de material natural consolidado e compactado. Nos casos de aterro, essa camada é obtida através da compactação de material transportado.

Apesar de ser uma camada de profundidade desconhecida, apenas a camada próxima da superfície é considerada, em virtude do alcance limitado do bulbo de pressões. Assim, nas análises numéricas de maneira geral apenas a camada próxima da superfície é considerada, pois, à medida que se aprofunda no maciço, as pressões exercidas são reduzidas a ponto de serem consideradas desprezíveis (SENÇO, 1997).

A resistência do subleito é avaliada de modo diferente dependendo do método de dimensionamento utilizado. No método CBR a resistência do subleito é dada em porcentagem através da comparação entre a resistência à penetração da amostra do solo obtida em laboratório e a resistência à penetração de um material considerado padrão, ao qual se atribui um CBR igual a 100%.

Utilizando o método do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagens (DNER), a resistência do subleito é quantificada através da média aritmética entre o CBR e o CBR corrigido (CBR_{IG}). O CBR_{IG} é obtido através do índice de grupo, sendo este um valor numérico entre 0 e 20 obtido através da granulometria, limite de liquidez e plasticidade do solo. O resultado da média entre os valores de CBR e CBR_{IG} recebe a denominação de Índice de Suporte (IS).

2.2 Materiais empregados em pavimentos: tipos e propriedades

Neste item, apresentam-se as principais características de dois materiais utilizados na execução da pavimentação e nas aplicações numéricas deste trabalho. Os materiais abordados aqui são: Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC).

2.2.1 Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ)

O concreto betuminoso usinado a quente, Fig. 2, ou simplesmente concreto asfáltico, é o revestimento resultante da mistura a quente, em usina apropriada, de agregado mineral graduado, material de enchimento (*filler ou fíler*) e material betuminoso, espalhado e comprimido a quente. Em relação à granulometria, consideram-se três frações: agregado graúdo, agregado fino e fíler.

O agregado graúdo é constituído de pedra britada ou seixo rolado com pelo menos uma face britada. Esse material deve apresentar superfície rugosa e forma angular, ausência de matéria orgânica ou torrões de argila (BRASIL, 1997) e boa adesividade com o asfalto utilizado.

Segundo a norma DNIT 031/2004 - ES, o agregado miúdo pode ser areia, pó-de-pedra, mistura de ambos, ou outro material indicado em especificações complementares. Suas partículas individuais devem ser resistentes, estando livre de torrões de argila e de substâncias nocivas. Deve apresentar equivalente de areia igual ou superior a 55%.

O fíler é a fração fina original da britagem de rochas, pedregulhos ou lateritas, sendo ainda possível de receber essa denominação a cal e os ligantes hidráulicos finamente moídos, como o cimento Portland e o cimento siderúrgico, além das pozolanas resultantes da queima de carvão e da microsílica. Uma de suas funções,

da qual decorre sua denominação, é o preenchimento parcial dos vazios formados pela mistura de agregados graúdos e miúdos (BALBO, 2007).

O mesmo autor acrescenta que os minerais finamente moídos adicionados aos concretos asfálticos ficam dispersos no Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) formando uma massa CAP + fíler denominada mástique asfáltico. Mais do que apenas o preenchimento de vazios na mistura, os fíleres se prestam a causar um aumento de viscosidade do CAP, o que gera incremento do ponto de amolecimento, nas estabilidades, no Módulo de Elasticidade e na resistência da mistura asfáltica, evidentemente até um dado limite do consumo dessa adição fina.

O CBUQ é constituído também por materiais betuminosos com função aglutinante. O betume é uma mistura de hidrocarboneto solúvel em bissulfeto de carbono, que em geral engloba os asfaltos e alcatrões.

O alcatrão é uma designação genérica de uma substância composta de hidrocarbonetos pesados proveniente da queima ou destilação destrutiva do carvão, madeira, etc.

O alcatrão praticamente não é mais utilizado em pavimentação desde que se descobriu seu poder cancerígeno, além do fato de sua pouca homogeneidade e baixa qualidade em termos de ligante para pavimentação, derivada da própria forma de obtenção do mesmo, sendo uma delas a queima do carvão (BERNUCCI, 2006).

O asfalto é um derivado de petróleo de elevada viscosidade, com propriedade aglutinante e consistência variável, obtido através do refinamento do petróleo, composto por asfaltenos, resinas e hidrocarbonetos de natureza aromática, solúveis em tricloroetileno.

Assim, o termo Concreto Betuminoso contempla o concreto produzido tanto com alcatrão, quanto com asfalto. Contudo, sendo o alcatrão um produto em desuso, o termo Concreto Asfáltico tornou-se sinônimo de Concreto Betuminoso.

Os asfaltos ou Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) quando utilizados como aglutinantes apresentam boa aderência aos agregados, possuindo também propriedades impermeabilizantes.

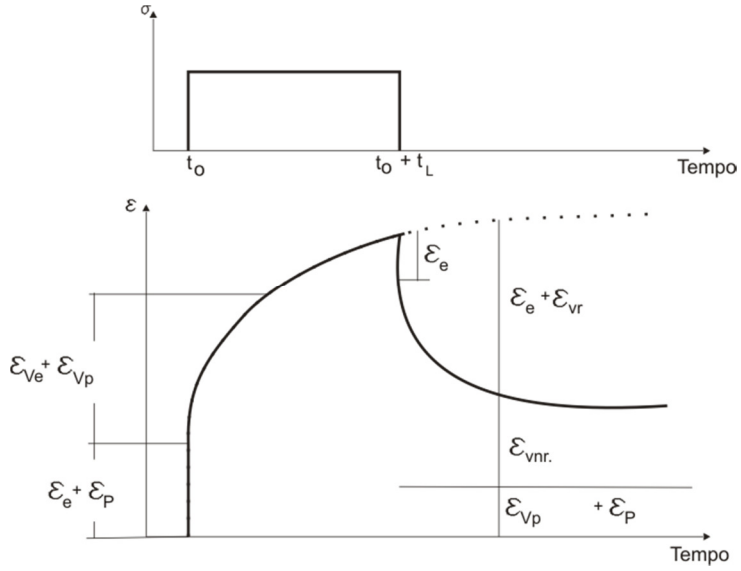
O CAP é um material termoplástico, de comportamento reológico complexo e dependente da temperatura, que com o intemperismo se altera, perdendo suas propriedades iniciais, tornando-se mais viscoso e frágil.

O CAP é constituído de uma parte sólida, que lhe concede rigidez, denominada asfalteno e de outra (veículo) denominada malteno sendo essa oleosa, proporcionando ao produto propriedades plásticas e de viscosidade. Os asfaltenos são responsáveis também pela coloração típica do produto.

No estudo da reologia dos revestimentos asfálticos, esse material apresenta um comportamento viscoelástico, ou seja, seu comportamento estrutural depende do tempo e da taxa de aplicação da carga.

Resultados típicos da aplicação de um ciclo de carregamento para teste de fluência uniaxial e recuperação elástica em misturas asfálticas são apresentados na Fig. 6, onde ε_e, ε_P, ε_{ve} e ε_{vp} significam, respectivamente, as deformações elástica, plástica, viscoelástica e viscoplástica. No descarregamento, a deformação viscoelástica e deformação viscoelástica recuperável são representadas nas variáveis ε_{vr} e ε_{vnr}. A carga é aplicada no tempo t_o e o descarregamento acontece no tempo $t_o + t_L$ (LU et al., 2002).

Figura 6 - Relação de um ciclo de carga e descarga de misturas asfálticas.



Fonte: Adaptado de LU et al., 2002.

Em relação à faixa de valores do módulo de elasticidade desse material, em BERNUCCI (2006) apresenta-se valores típicos na faixa de 2000 MPa a 8000 MPa para concretos asfálticos a 25º C, sendo os menores correspondentes a misturas com asfaltos modificados por polímeros, ou por borracha, e os maiores para misturas com asfaltos de consistência dura.

A norma para execução do ensaio de módulo de resiliência do extinto DNER (BRASIL, 1994) recomenda o valor de 0,3 para o Coeficiente de Poisson do concreto asfáltico.

O manual de restauração do DNIT (BRASIL, 2006b) adota em uma de suas retroanálises o coeficiente de poisson de 0,3, apresentando dados do manual de projeto de estruturas de pavimentos da Associação Americana de Oficiais das estradas e transportes do estado (AASHTO). Nesse último manual, recomenda-se a utilização de um coeficiente de Poisson para concretos betuminosos usinados a quente entre 0,15 e 0,45.

2.2.2 Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)

A BGTC é constituída por uma mistura de agregados do tipo pedra britada em proporções apropriadas com a adição de cimento Portland, geralmente entre 3 a 4% em peso da mistura total, sendo bastante empregada em bases e sub-bases de pavimentos rodoviários.

Apesar da alta rigidez, a heterogeneidade e a expressiva quantidade de vazios desse material, resultam em baixa resistência à fadiga e tenacidade reduzida, sendo essa definida como a quantidade de energia necessária para levar um material à ruptura.

A execução da Brita Graduada Tratada com Cimento deve ser realizada em uma única camada, recomendando-se compactação a pelo menos 95% da energia modificada visando um aumento da resistência e durabilidade.

Durante a cura do cimento, a BGTC pode sofrer retrações resultando em trincas e fissuras. Por esse motivo, atualmente, não se recomenda a utilização desse material na camada de base em pavimentos de revestimentos asfálticos para evitar o efeito conhecido como reflexão das trincas, ou seja, a propagação das trincas da camada de base para o revestimento. Contudo, esse tipo de estrutura de pavimento foi executado em diversas rodovias como a Rodovias Ayrton Senna e Bandeirantes em São Paulo.

A ordem de grandeza do módulo de elasticidade da BGTC é de 6000 a 12000 MPa (BERNUCCI, 2006). Em BALBO (2008), os valores de módulo de elasticidade retroanalisados apontam resultados acima de 15000 MPa, para misturas íntegras de BGTC, e abaixo de 10000 MPa, para misturas em bases e sub-bases que já

entraram em fase de fissuração por fadiga. O coeficiente de Poisson típico para este material apresenta valores entre 0,20 e 0,35 (PITTA,1997).

Assim, adota-se no presente trabalho que as bases de BGTC assumem valores de módulo de elasticidade entre 6000 e 15000 MPa, considerando assim os possíveis valores para o módulo desse material com coeficiente de Poisson de 0,35.

Nesse trabalho, utilizou-se a BGTC como material de base em virtude do intervalo do módulo de elasticidade disponível na literatura, simulando pavimentos executados outrora.

3. CARGAS, DOMÍNIO DE ANÁLISE E FADIGA EM PAVIMENTOS

Neste capítulo são apresentadas as considerações utilizadas nas análises de tensões e deformações no pavimento rodoviário, abordando a fundamentação para a forma de aplicação do carregamento ao qual o pavimento é submetido, a definição do domínio de análise e modelos de fadiga.

3.1 Cargas

A definição do valor máximo de carga de eixo de roda dos veículos que trafegam pelas vias públicas é um assunto que desperta o interesse de diversos setores da sociedade, pois o aumento do mesmo permite o transporte de uma maior quantidade de carga e, consequentemente, um barateamento do frete dos produtos.

Contudo, o aumento das cargas dos veículos, além de reduzir a vida útil do pavimento, também aumenta os riscos de tombamentos dos veículos, haja vista que o aumento da massa da carga tende a elevar o centro de gravidade do veículo (EJZENBERG, 2009).

A resolução nº 210 do Conselho Nacional de Trânsito (BRASIL, 2006a) estabelece os limites de peso para veículos que transitam em vias terrestres, definindo o peso máximo para diversas configurações de veículos, sem ou com semi-reboque, articulados ou não. Para eixos isolados de dois pneumáticos o limite máximo de peso bruto é de 60 KN.

Nos projetos de pavimentos é comum utilizar o valor de 82 KN para o eixo simples padrão com rodas duplas. Contudo, a ausência de balanças de pesagens em algumas rodovias facilita o trânsito de veículos com excesso de carga. Dessa forma, os pavimentos são submetidos a esforços superiores aos previstos na concepção de projeto, resultando em degradações precoces dos pavimentos.

O peso dos veículos é transmitido para o pavimento através dos pneumáticos que, quando comprimidos contra o revestimento, apresentam uma área de contato característica. Essa área de contato depende do peso total do veículo e da pressão de inflação dos pneus.

O cálculo dessa área pode ser simplificado adotando a hipótese de geometria circular. Partindo dessa premissa, a área de contato (A_c) pode ser calculada através da expressão:

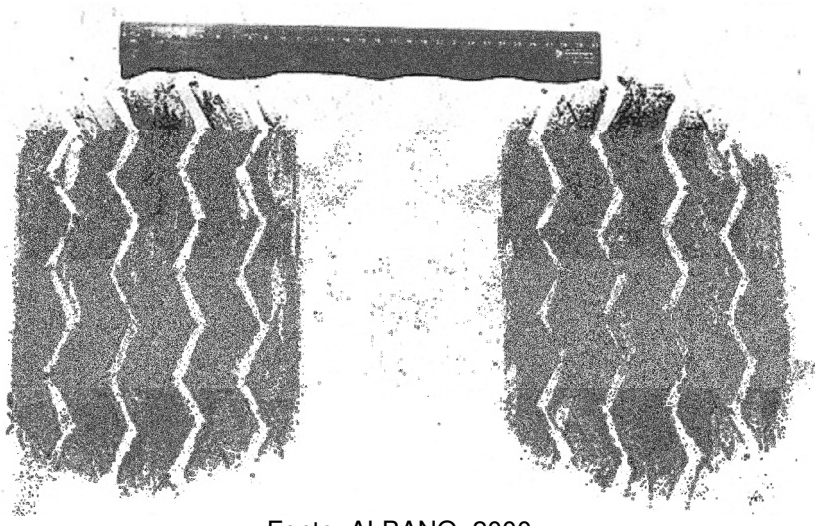
$$A_c = \frac{Q_r}{P_i} \tag{3.1}$$

onde, Q_r é a carga na roda e P_i é a pressão de inflação do pneumático (FRANCO, 2007). Nesse procedimento, considera-se a pressão no pavimento igual à pressão de inflação dos pneus.

Em ALBANO (2000), estudou-se a área de contato através da marca impressa em uma cartolina de um pneumático besuntado em graxa comparando o valor desta com o valor da área circular obtida através da Eq. 3.1.

Concluiu-se que a área efetivamente em contato entre o pneu e o revestimento é menor do que a área circular correspondente, ou seja, a hipótese de área de contato circular resulta em tensões subestimadas. A Fig. 7 apresenta uma imagem da área de contato impressa na cartolina pelo pneumático.

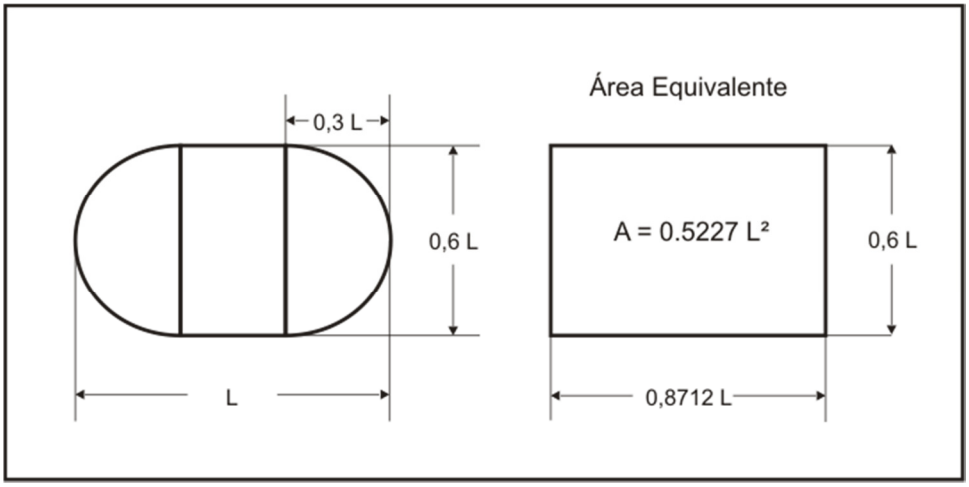
Figura 7 - Área de contato impressa em cartolina (ALBANO, 2000).



Fonte: ALBANO, 2000.

HUANG (2004) apresenta uma forma aproximada para a área de contato, sendo essa constituída pela união de uma região retangular e dois semicírculos nas extremidades (falsa elipse) a qual pode ser transformada em uma área retangular equivalente. As dimensões das citadas figuras geométricas são apresentadas na Fig. 8.

Figura 8 - Área de contato proposta em HUANG (2004).



Fonte: HUANG, 2004.

Os esforços gerados nas estruturas dos pavimentos são oriundos da aplicação de cargas provenientes do tráfego. Assim, no problema real, o carregamento possui natureza dinâmica.

Nessas estruturas, a análise das tensões e deformações constitui um problema tridimensional da mecânica do contínuo. Considerando a complexidade do comportamento do pavimento, usualmente essa análise é feita através de procedimentos numéricos. Neste trabalho, a modelagem tridimensional desse problema é feita através do método dos elementos finitos, utilizando nas análises o programa ABAQUS. O carregamento é aplicado na forma de pressão em uma área com geometria de falsa elipse.

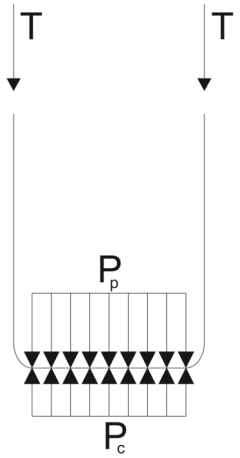
O tamanho da área de contato depende da pressão de contato entre o pneumático e o revestimento. Além disso, o valor da pressão de inflação possibilita situações com as paredes do pneumático sobre tração ou compressão. Em cada uma dessas situações, o valor da pressão de contato assume valores distintos, a saber.

Conforme apresentado na Fig. 9, quando a pressão de inflação do pneumático apresenta valores baixos, as paredes do mesmo encontram-se em compressão. Logo, neste caso, recorrendo-se ao equilíbrio das forças verticais, obtém-se:

$$(\uparrow)\sum F_v = 0 \therefore P_c = \frac{2T}{A_c} + P_p \Rightarrow P_c > P_p \quad (3.2)$$

onde P_c e A_c indicam, respectivamente, a pressão e a área de contato do pneumático com o revestimento. T é a força de compressão nas paredes do pneumático e P_p representa a pressão interna no mesmo.

Figura 9 - Equilíbrio de forças para um pneumático com paredes sobre compressão.



Fonte: Autor, 2012.

Quando a pressão de inflação do pneu apresenta valores altos, as paredes do pneumático apresentam-se tracionadas. Assim, através do equilíbrio de forças tal como feito acima (Eq. 3.2), conclui-se que, nessas condições, a pressão interna do pneumático é maior que a pressão de contato (HUANG, 2004).

Desta forma, sabendo-se que os carregamentos mais críticos em rodovias são oriundos de veículos mais pesados, e que esses são dotados de pneumáticos com maiores valores de pressão interna, é razoável adotar a equivalência entre a pressão de contato e a pressão interna, uma vez que tal hipótese está a favor da segurança.

Nesse trabalho, a estrutura do pavimento é submetida a carregamentos oriundos do tráfego, assumindo a simplificação de que os mesmos são estáticos, uniformes e que a pressão de contato assume o mesmo valor da pressão interna do pneumático.

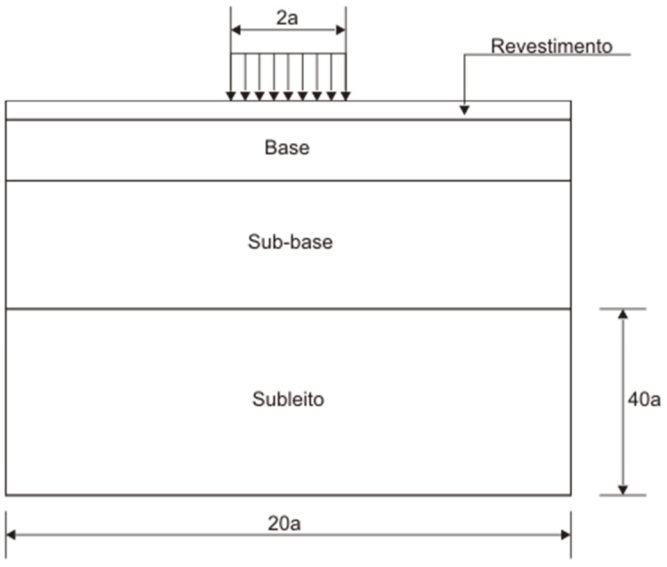
3.2 Domínio de análise

Na análise de tensões e deformações em maciços semi-infinitos, busca-se definir o domínio espacial de análise de forma que as tensões fora dessa região assumam valores desprezíveis.

Diversos trabalhos disponíveis na literatura (JUNIOR, 2005; SOUZA, 2003; KIM, 2007; LIAO, 2007) citam DUNCAN (1968 apud SOUZA, 2003) como referência para estabelecer as dimensões da malha de elementos finitos da estrutura de pavimentos. Neste último trabalho, recomenda-se que para obter o domínio de análise, o limite radial da malha deve ser vinte vezes o raio da área de carregamento e a última camada (subleito) deve ter espessura de aproximadamente quarenta vezes o mesmo raio. A Fig. 9 ilustra as dimensões sugeridas pelo citado autor.

A espessura das camadas de sub-base, base e revestimento são definidas durante o dimensionamento do pavimento. No presente estudo define-se o domínio de análise em conformidade com as informações apresentadas na Fig. 10.

Figura 10 - Domínio de análise sugerido por DUNCAN (1968 apud SOUZA, 2003).



Fonte: Autor, 2012.

3.3 Fadiga

Segundo MATSUDA (2008), fadiga é um processo de degradação estrutural característica de componentes submetidos a carregamentos variáveis com o tempo. Como a falha por fadiga ocorre com tensões abaixo dos limites elásticos usuais de resistência, a consideração da mesma é de grande importância no projeto estrutural.

Os pavimentos rodoviários estão submetidos a carregamentos que, em geral, provocam pequenas deformações elásticas. No entanto, devido à sua natureza cíclica, tais solicitações podem induzir falhas por fadiga no revestimento, as quais se manifestam através de fissuras ou trincas.

A fadiga pode ser classificada como de alto ciclo quando o número de ciclos que causa a falha do material é superior a 10^5, ocorrendo em situações onde a magnitude do carregamento resulta em deformações plásticas. Enquanto que a fadiga de baixo ciclo ocorre quando o número de ciclos é inferior a esse valor. Assim, de maneira geral, os pavimentos rodoviários estão sujeitos à fadiga de alto ciclo (MATSUDA, 2008).

De acordo com EVDORIDES (2006), o processo de falha por fadiga geralmente acontece em três fases. Na fase I, aplicação de carregamentos cíclicos conduz a um princípio de fissura, o qual apenas pode ser visto microscopicamente. A fase II é caracterizada por uma propagação da fissura até que a seção remanescente torne-se insuficiente para sustentar o carregamento imposto, resultando então na fase III, onde a sessão transversal remanescente rompe como resultado da aplicação do carregamento.

É comum os modelos empíricos de fadiga utilizarem como critério para ruptura do corpo de prova a situação onde o mesmo apresenta 50% do valor de sua rigidez inicial, havendo autores que utilizam também o percentual de 10% (WANG, 2011; KHALID, 2000).

Nessas condições, pode-se entender que a fadiga encontra-se em sua segunda fase, pois a redução no valor da rigidez é um indicativo do início do processo de propagação da fissuração, não tendo atingido ainda a condição de colapso.

As técnicas de laboratório mais empregadas para ensaios de fadiga em misturas betuminosas são: amostras cilíndricas em torção, tração uniaxial, tração indireta ou compressão diametral, flexão em amostras trapezoidais e flexão em vigas (BALBO, 2007).

Alguns autores destacam a vantagem do ensaio de flexão de vigas, uma vez que a aplicação do carregamento nos terços médios do vão resulta em momento fletor constante no meio da viga, não havendo influência de outros esforços internos nos resultados. Neste ensaio, as cargas podem ser aplicadas em um ou em ambos os sentidos de uma mesma direção, sendo denominado ensaio de flexão alternada quando tanto a face superior quanto a face inferior são submetidas à tração. A Fig. 11 apresenta a foto de um ensaio de flexão de vigas de concreto asfáltico.

Dois tipos de controle podem ser empregados no ensaio de flexão de vigas: controle de carga ou controle de deformação. No ensaio utilizando controle de carga, os valores do carregamento são controlados e variados dentro de limites definidos e constantes, resultando em um aumento progressivo das deformações. Nessas condições, a propagação das fissuras acontece rapidamente. Esse tipo de ensaio é mais recomendado para revestimentos mais espessos, acima de 15,2 cm (KHALID, 2000).

Figura 11 - Ensaio de flexão de viga de concreto asfáltico.

Fonte: Monteiro, 2003.

No caso do controle de deformações, estas são impostas ao corpo de prova dentro de intervalos com limites constantes, resultando em uma propagação lenta das fissuras acompanhada de redução na intensidade das solicitações. Esse ensaio é utilizado em revestimento de pequenas espessuras, abaixo de 5,1 cm (KHALID, 2000).

Para revestimentos com espessura entre 5,1 cm e 15,2 cm, os dois tipos de controle podem ser utilizados, devendo ser ponderado qual o mais adequado em função do tempo de duração do ensaio e número de ciclos de carregamentos.

As condições de realização dos ensaios de fadiga com deformações ou cargas controladas não reproduzem a realidade de campo, a qual possui grande variabilidade de carregamentos com pneumáticos dotados de dimensões e pressões diversas.

Os modelos de fadiga, de maneira geral, baseiam-se na relação entre a deformação de tração das misturas asfálticas e o número de carregamentos necessários para o material sofrer colapso, havendo equações que incorporam também os efeitos do módulo de elasticidade, volume de vazios e rigidez da mistura asfáltica (BABURAMANI, 1999).

Com base em resultados experimentais, as equações dos modelos de fadiga são usualmente obtidas através de regressão linear em escala logarítmica. Assim, relaciona-se o número de aplicações da carga cíclica e a respectiva deformação de tração horizontal, plotando-se o primeiro ponto quando o ensaio atinge duzentos ciclos. Os modelos típicos de fadiga em revestimento asfáltico apresentam a seguinte expressão geral:

$$N_f = c_2(\varepsilon_t)^{-f_2} \tag{3.2}$$

onde N_f é o número de repetições do carregamento necessário para a ruptura do revestimento. Na Eq. (3.2), ε_t indica a deformação por tração na base do material asfáltico, c_2 é o número de carregamentos obtido quando a deformação por tração na base do material asfáltico atinge o valor unitário e f_2 representa o inverso da inclinação da curva de regressão.

Após a análise numérica, pode-se obter o valor da deformação por tração na base do revestimento e na região localizada no centro da carga. Com esse valor, é possível utilizar as equações apresentadas no modelo de fadiga para avaliar o número de ciclos do carregamento necessários para a ruptura por fadiga da estrutura do pavimento. A seguir, apresentam-se alguns modelos de fadiga disponíveis na literatura, onde em todos os modelos N_f representa o número de repetições do carregamento necessário para a ruptura do revestimento.

3.3.1 Modelo de Brown

Em BALBO (2007) é citado o modelo de BROWN et al. (1977) para análise do processo de fadiga em pavimentos flexíveis, o qual tem a seguinte expressão:

$$N_f = 8{,}9 \cdot 10^{-13} (\varepsilon_t)^{-4{,}9} \tag{3.3}$$

onde ε_t indica a deformação por tração na base do material asfáltico.

3.3.2 Modelo do Instituto do Asfalto (EUA)

O modelo de fadiga proposto pelo Instituto do Asfalto Americano é apresentado em BABURAMANI (1999). Esse modelo considera o volume de vazios em 5% e o volume de ligante em 11%. O módulo de elasticidade do corpo de prova é incorporado no modelo. A equação é obtida por meio de regressão linear e possui a seguinte expressão:

$$N_f = 0{,}07958 \cdot (\varepsilon_t)^{-3{,}291} \cdot E^{-0{,}854} \tag{3.4}$$

onde ε_t indica a deformação por tração na base do material asfáltico e E representa o módulo de elasticidade do material.

3.3.3 Modelo de Khalid

Realizando também ensaio de fadiga com flexão em vigas, KHALID (2000) obteve, para revestimento asfáltico com 3,7% de vazios, a seguinte expressão:

$$N_f = 2{,}6 \cdot 10^{-11} \cdot {\varepsilon_t}^{-4{,}57} \tag{3.5}$$

onde ε_t indica a deformação por tração na base do material asfáltico.

3.3.4 Modelo de Monismith

Monismith et al. (1969) propuseram o seguinte modelo:

$$N_f = k \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^a \cdot \left(\frac{1}{S_{mix}}\right)^b \tag{3.6}$$

onde ε_t indica a deformação por tração na base do material asfáltico, S_{mix} representa a rigidez à flexão o módulo de elasticidade do material, enquanto que a e b são constantes obtidas por meio de regressão linear. A influência da composição do material asfáltico e seu estado de compactação está incorporado no modelo por meio do parâmetro k.

3.3.5 Modelo de Shell

Fazendo uso de ensaio de fadiga com deformações controladas, Shell (1978) propôs a seguinte expressão:

$$N_f = \left[\frac{\varepsilon_t}{(0{,}856V_b + 1{,}08)S_{mix}^{-0{,}36}}\right]^{-5} \tag{3.7}$$

onde ε_t indica a deformação por tração na base do material asfáltico, S_{mix} representa a rigidez à flexão do material e V_b o volume da mistura asfáltica.

3.3.6 Modelo de El-Basyouny

El-Basyouny et al. (2005) propuseram um modelo considerando a rigidez e o volume da mistura asfáltica, bem como o volume de ar e outros parâmetros conforme equação a seguir:

$$N_f = 0{,}00432C\left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3{,}291}\left(\frac{1}{E}\right)^{0{,}854} \tag{3.8}$$

onde ε_t indica a deformação por tração na base do material asfáltico, E representa o módulo elasticidade do material. A constante C é um fator de correção equivalente a 10^M, sendo M um fator obtido por meio das frações volumétricas da mistura asfáltica (V_b) e de ar (V_a), através da seguinte expressão:

$$M = 4{,}84\left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69\right) \tag{3.9}$$

Um modelo mecanístico empírico semelhante é apresentado pela Associação Americana de Rodovias Estaduais e Transportes Oficiais (AASHTO, 2008) sendo conhecido como "*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*"(MEPDG), tendo a seguinte expressão:

$$N_f = 0{,}00432\beta_{f1}C\left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3{,}291\beta_{f2}}\left(\frac{1}{E}\right)^{0{,}854\beta_{f3}} \tag{3.10}$$

onde o fator de ajuste de escala entre o laboratório e o campo é representado pela constante C equivalente a $10^{4{,}84\left(\frac{V_b}{Va+V_b}-0{,}69\right)}$ e a calibração do modelo é realizado por meio dos termos β_{f1}, β_{f2} e β_{f3}.

4. APLICAÇÕES NUMÉRICAS

O pavimento rodoviário é submetido a cargas concomitantes, seja em eixos de rodas simples ou duplas. Em veículos de eixos simples, em virtude da distância entre as rodas, há uma possibilidade remota de haver interação entre as tensões resultantes da aplicação das pressões dos pneumáticos.

No entanto, na condição de carregamento de eixos de rodas duplas, a proximidade entre as rodas permite supor a existência de sobreposição de tensões. Nesse capítulo, são apresentados resultados de análises numéricas considerando um e dois pneumáticos simulando, respectivamente, eixos de rodas simples e duplas.

O pavimento é solicitado por cargas de roda constantes em todas as análises, variando apenas o módulo de elasticidade de três das quatro camadas constituintes do pavimento: revestimento, base e sub-base.

Não se considera variação no módulo de elasticidade do subleito, haja vista que essa camada representa o solo específico de cada região, apresentando expressiva dispersão e incerteza.

Análises sucessivas tridimensionais são realizadas variando-se o módulo de elasticidade das camadas, não sendo o objetivo do trabalho esgotar todas as combinações possíveis de módulos de elasticidade das mesmas, e sim realizar um estudo paramétrico para avaliar a sensibilidade da estrutura a essa variação.

A análise numérica considera que o contato entre as camadas é perfeito, sendo a estrutura do pavimento analisada como um conjunto monolítico. No programa ABAQUS, a malha de elementos finitos é gerada em cada uma das camadas, sendo os esforços transmitidos entre elas através de algoritmos de contato. Dessa forma, fica assegurada a conformidade da malha.

As interações de contato podem ser de comportamento tangencial ou normal. Nas análises, utiliza-se o comportamento normal com a propriedade de contato denominada "*hard contact*", através dela é possível realizar a transferência de pressão entre as camadas do pavimento.

Utilizou-se o elemento finito hexaédrico com oito nós do tipo C3D8R, recomendado para análise de laminados em virtude da precisão e custo computacional (ABAQUS,2010). Algumas dificuldades foram encontradas em

relação ao refinamento da malha, uma vez que durante esse processo o programa ABAQUS acusava a perda das propriedades por parte de alguns elementos.

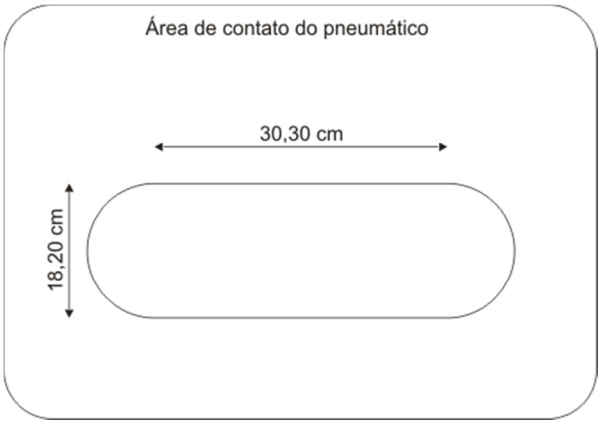
Nos resultados apresentados a seguir, as isofaixas, seja de tensões ou deformações, apresentam distribuições semelhantes independente do módulo de elasticidade, variando apenas a magnitude das respectivas grandezas. Dessa forma, nas figuras apresentas nas seções subsequentes, apresenta-se uma única imagem das isofaixas, descriminando em seguida a magnitude da grandeza para cada um dos módulos de elasticidade da camada em referência.

4.1 Análise elástica linear com uma carga de roda

Realizou-se análise elástica linear, por meio do programa ABAQUS, em um pavimento rodoviário cujas camadas de revestimento, base e sub-base possuem respectivamente as espessuras de 5 cm, 20 cm e 40 cm, conforme valores usuais, sendo o domínio discretizado em uma malha de elementos finitos com 47824 nós e 45045 elementos hexaédricos com oito nós do tipo C3D8R.

Em MULUNGYE (2007), a área de contato do pneumático foi obtida através de ensaios, considerando variações da carga e da pressão da roda. Com base nos resultados desses ensaios, adotou-se uma área de contato de 480 cm², correspondente a uma carga de roda de 31,6 kN. Com o valor da área de contato, as dimensões da falsa elipse são obtidas através de cálculos geométricos simples, utilizando a proposta de HUANG (2004) conforme dados apresentados na Fig. 8. Assim, obtêm-se as dimensões mostradas na Fig. 12.

Figura 12 - Área de contato do pneumático com o revestimento.



Fonte: Autor, 2012.

A Tab. 1 apresenta as variações adotadas para os módulos de elasticidade das camadas constituintes do pavimento estudado, em conformidade com as informações apresentadas na seção 2.2. Quando o módulo de elasticidade de uma determinada camada varia, o módulo das demais assume o valor médio do intervalo de variação. Assim, quando o módulo de elasticidade do revestimento varia de 2000 MPa a 8000 MPa, o módulo da base e a sub-base assume os valores de 10500MPa e 42000 MPa, respectivamente. Assumiu-se como constante o módulo de elasticidade do subleito, conforme citado anteriormente em virtude de sua dispersão e incerteza, sendo utilizado o valor de 1000 MPa em todas as análises.

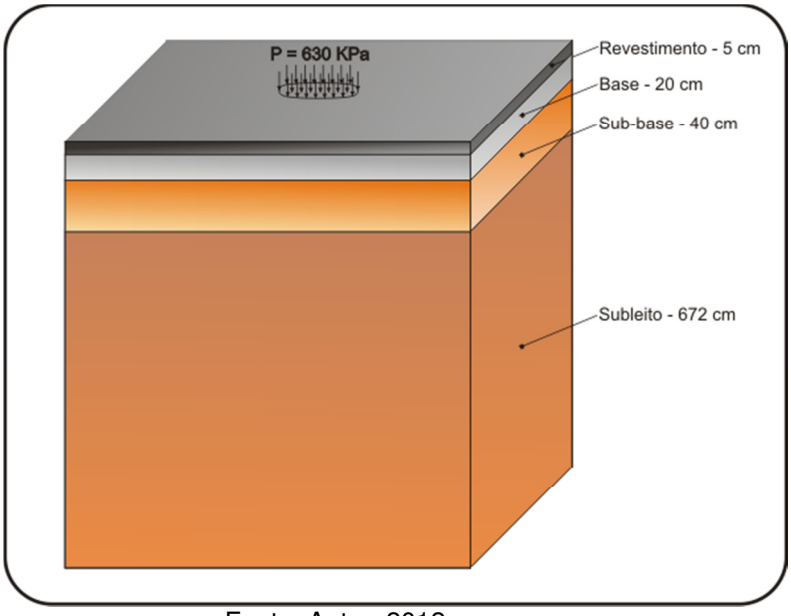
Tabela 1 – Variação do módulo de elasticidade das camadas constituintes do pavimento. (BERNUCCI, 2006) e (BALBO,2007).

Camadas	Módulo de elasticidade	
	Mínimo	Máximo
Revestimento	2000 MPa	8000 MPa
Base	6000 MPa	15000 MPa
Sub-base	2400 MPa	6000 MPa

Fonte: Autor, 2012.

A Fig. 13 apresenta as características da estrutura modelada com informações sobre as espessuras das camadas, valor e forma do carregamento de roda.

Figura 13 - Características do laminado modelado.



Fonte: Autor, 2012.

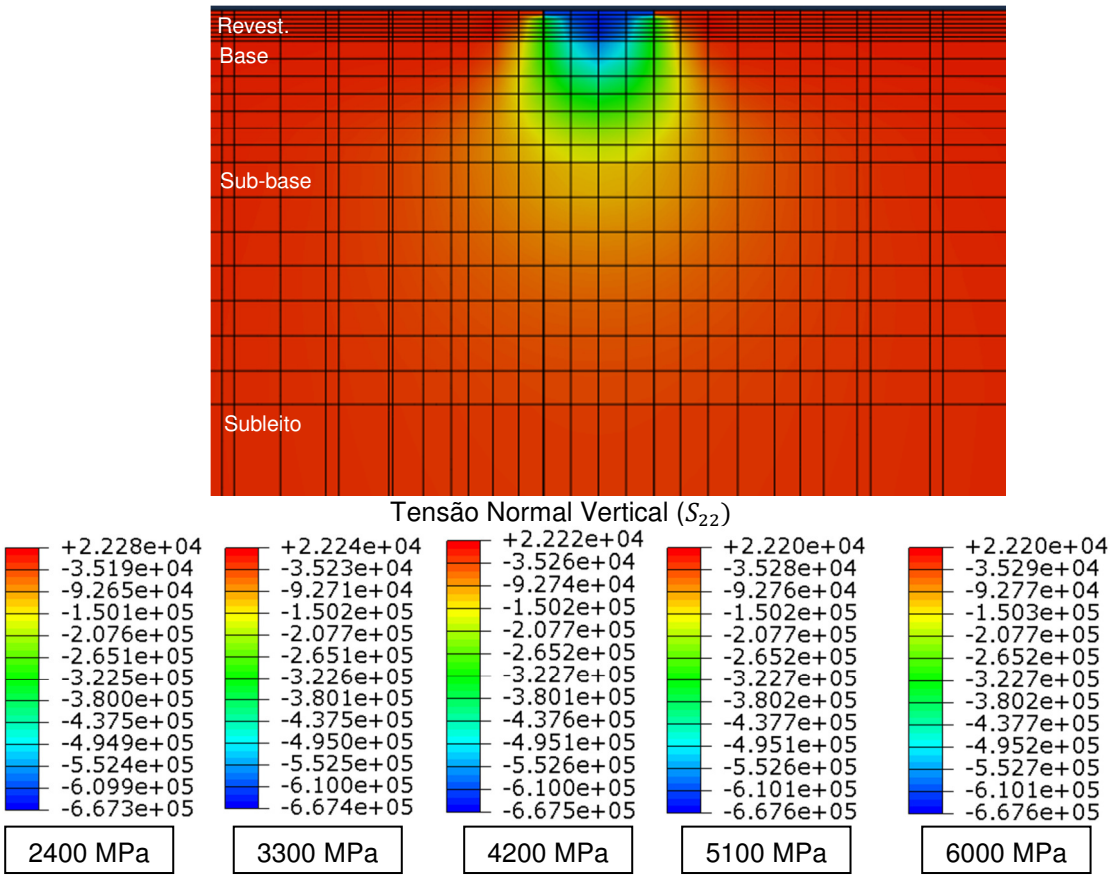
Realizaram-se as análises numéricas variando o módulo de elasticidade das camadas, conforme citado anteriormente, verificando sua influência na deformação no topo e base do revestimento, bem como das tensões no topo do subleito.

Com o valor da deformação na base do revestimento, obteve-se o valor do número de ciclos de carregamentos necessários para o revestimento sofrer colapso por fadiga (N). Foram utilizados três modelos de fadiga disponíveis na literatura, conforme apresentado na subseção 3.3.

4.1.1 Variação do módulo de elasticidade da camada de sub-base

O aumento do módulo de elasticidade da sub-base, E_{sb}, resulta em acréscimo de tensões nessa camada e alívio na camada de subleito. A Fig. 14 apresenta as isofaixas de tensões para a estrutura do pavimento com os respectivos módulos de elasticidade da sub-base.

Figura 14 - Isofaixas de tensões normais verticais, em Pa, para análises sucessivas com a variação do módulo de elasticidade da sub-base.



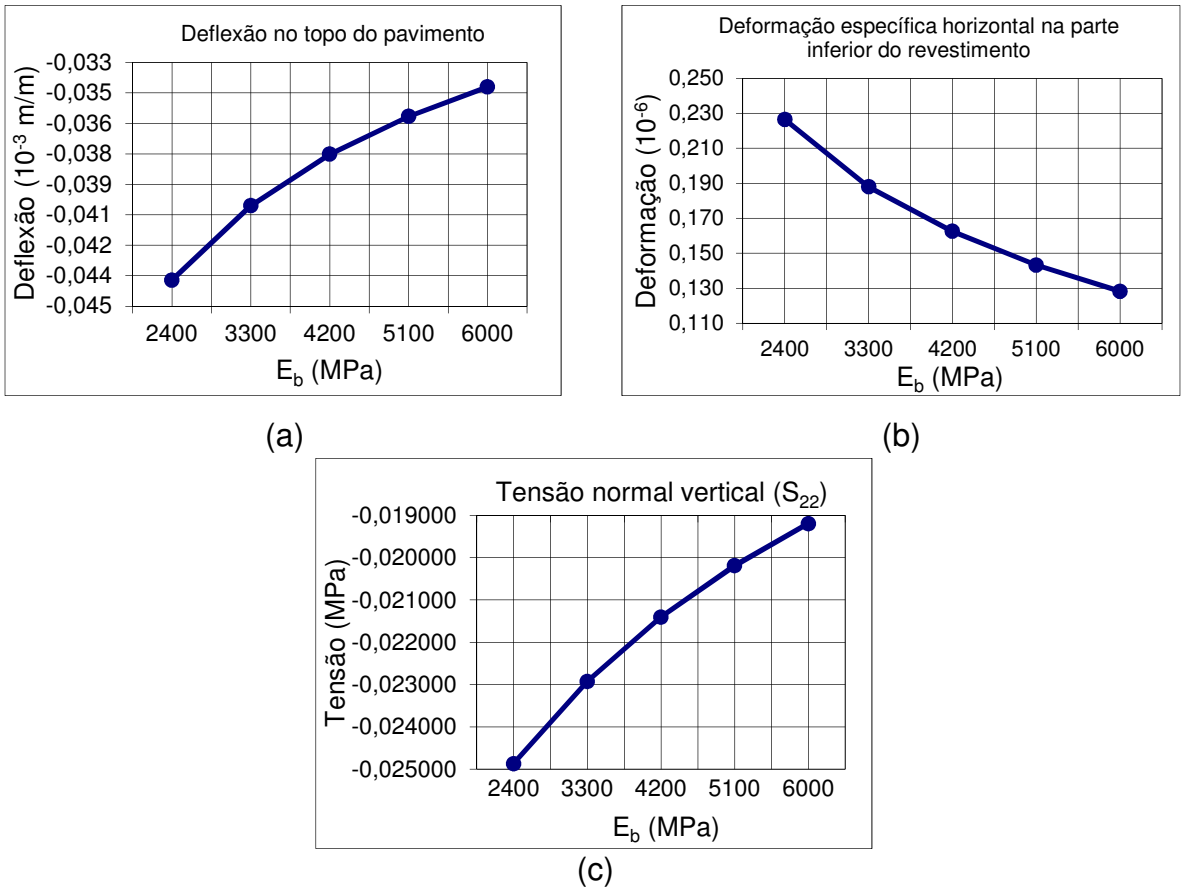
Fonte: Autor, 2012.

A tensão normal vertical no topo da camada de subleito variou em 22,83%, de -0,02486 MPa para -0,01918 MPa, enquanto que a deflexão na superfície do pavimento reduziu 21,75%, passando de -0,0437 mm para -0,0342·mm. O sinal negativo indica deslocamento contrário ao eixo vertical 'y' que possui sentido positivo de baixo para cima.

Na Fig. 15 é apresentado o gráfico das deflexões na superfície do pavimento, das tensões normais verticais no topo do subleito e da deformação específica horizontal na parte inferior do revestimento em função do módulo de elasticidade da camada de sub-base.

Assim, um aumento do E_{Sb} de 2400 MPa para 6000 MPa resultou em uma redução de, aproximadamente, 21,75% da deflexão no topo do revestimento e 0,005 MPa (22,83%) na tensão normal vertical no topo do subleito.

Figura 15 - Variação da deflexão no topo pavimento (a), deformação específica horizontal na base do revestimento (b) e tensão normal vertical (c) em função do módulo de elasticidade, em MPa, da sub-base.

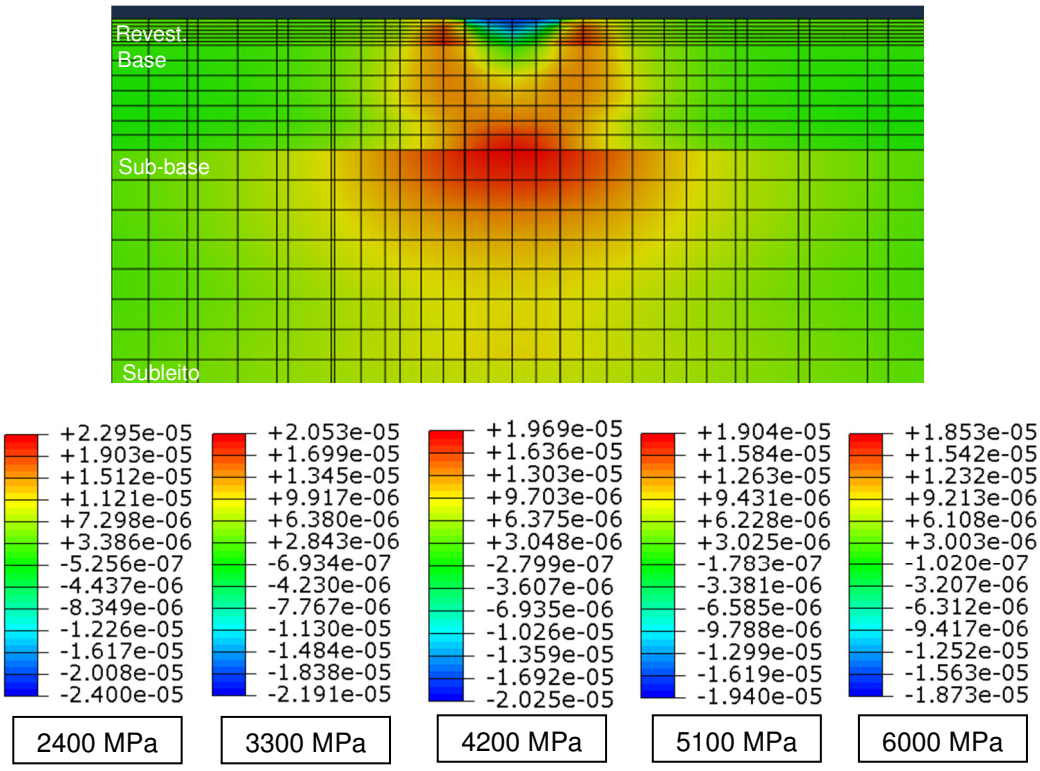


Fonte: Autor, 2012.

A deformação de tração horizontal na parte inferior da camada de revestimento alcançou valores entre 22,65 μm/m e 12,83 μm/m, equivalente a uma variação de aproximadamente 43,36%, conforme apresentado na Fig. 15. As isofaixas das deformações máximas principais são apresentadas na Fig. 16.

Com os resultados obtidos para as diferentes rigidezes da sub-base, calculou-se o valor de N, utilizando os modelos de fadiga propostos por BROWN et al. (1977), BABURAMANI (1999) e KHALID (2000), conforme apresentado na Fig. 17 e Tab. 2.

Figura 16 - Isofaixas de deformações máximas principais para os respectivos módulos de elasticidade da sub-base.



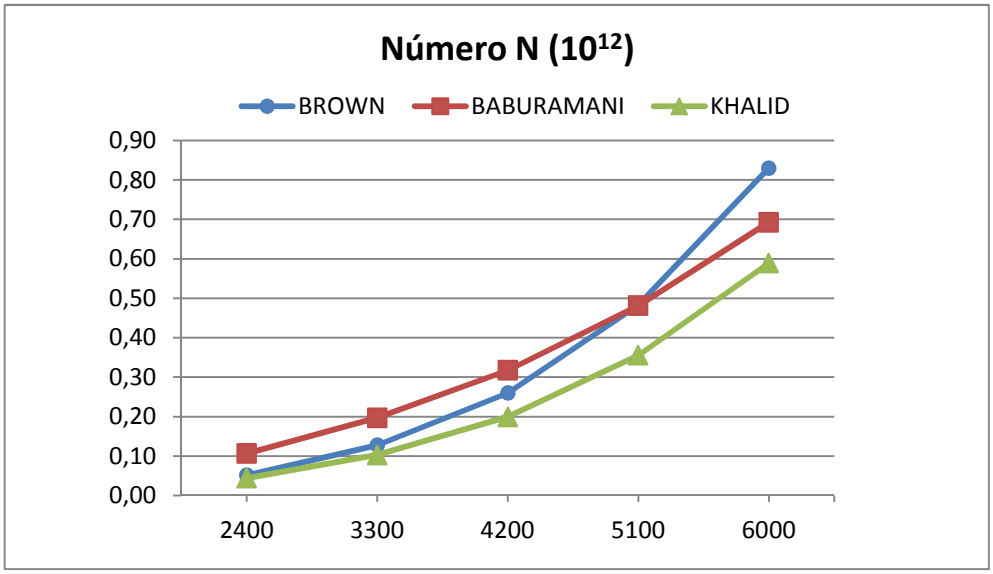
Fonte: Autor, 2012.

Tabela 2 - Valores do Número N obtidos através dos modelos de BROWN et al. (1977), BABURAMANI (1999) e KHALID (2000) em função do módulo de elasticidade da sub-base (E_{sb}).

E_{sb}	BALBO	BABURAMANI	KHALID
2400 MPa	5,12E+10	1,07E+11	4,39E+10
3300 MPa	1,28E+11	1,97E+11	1,03E+11
4200 MPa	2,60E+11	3,18E+11	2,00E+11
5100 MPa	4,83E+11	4,82E+11	3,56E+11
6000 MPa	8,30E+11	6,93E+11	5,89E+11

Fonte: Autor, 2012.

Figura 17 - Número N obtido por meio dos modelos de BROWN et al. (1977), BABURAMANI (1999) e KHALID (2000) em função do módulo de elasticidade, em MPa, da sub-base.



Fonte: Autor, 2012.

Os valores obtidos através dos modelos resultaram em curvas semelhantes, apresentando significativo ângulo de inclinação, indicando que o processo de fadiga do revestimento asfáltico é influenciado pelo módulo de elasticidade da sub-base.

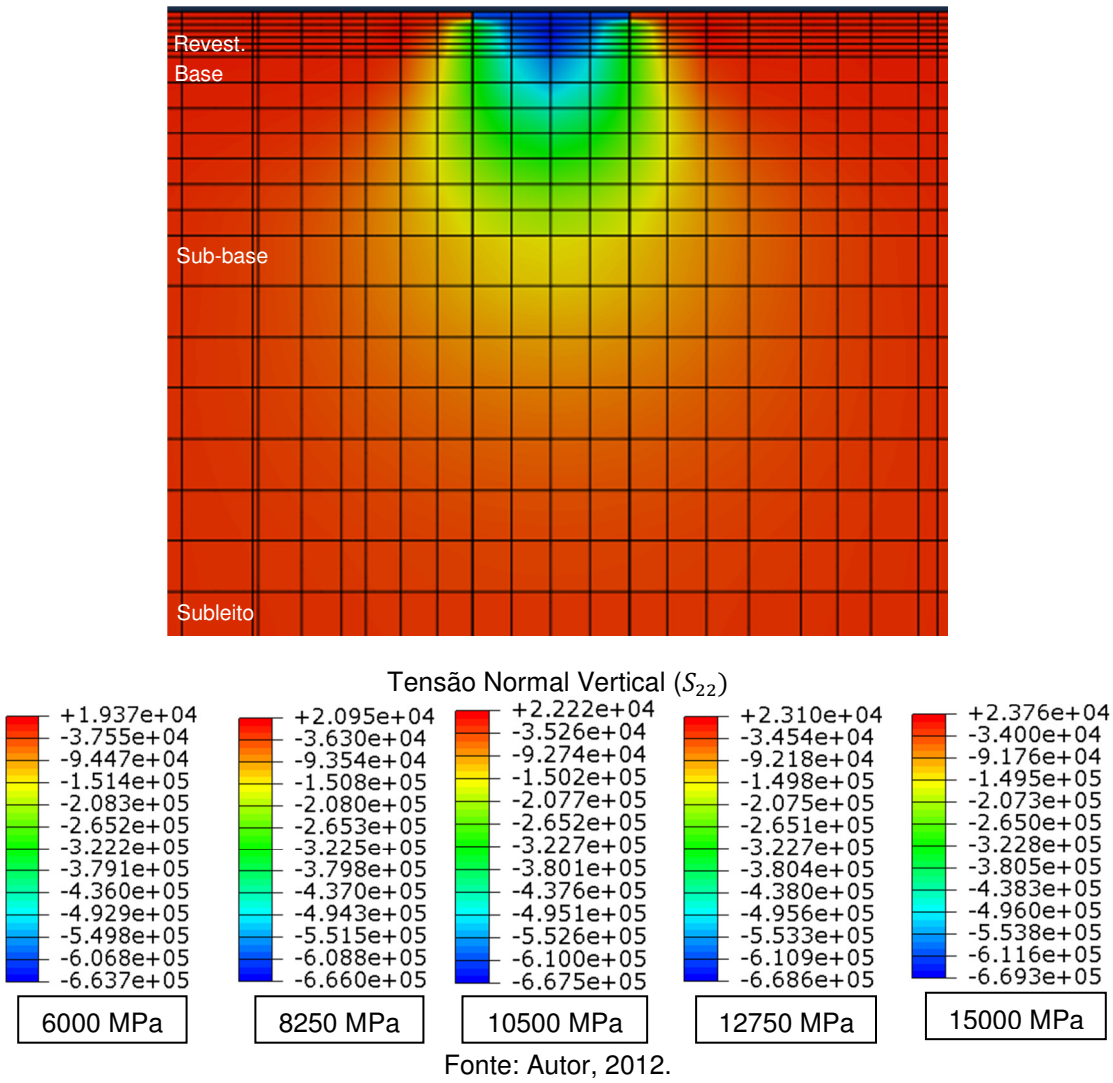
4.1.2 Variação do módulo de elasticidade da camada de base

O aumento gradual do módulo de elasticidade da camada de base (E_b), semelhante à variação do E_{sb}, resultou em alívio das tensões nas camadas inferiores.

O aumento do módulo de elasticidade da camada de base de 6000 MPa para 15000 MPa, resultou em uma redução de 12,92% nas tensões normais verticais no topo do subleito, variando de -0,02324 MPa para -0,02023. A Fig. 18 apresenta a isofaixa das tensões S_{22} para essa análise.

A deflexão na superfície do pavimento variou de -0,04436 mm até -0,03429 mm, equivalente a 22,70%.

Figura 18 - Isofaixas de tensões, em Pa, para análises sucessivas com a variação do módulo de elasticidade, em MPa, da camada de base.

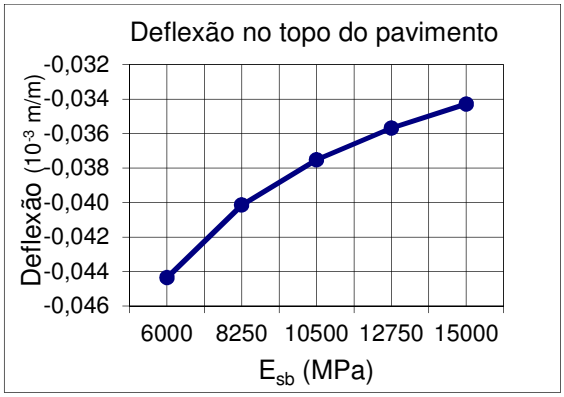


Fonte: Autor, 2012.

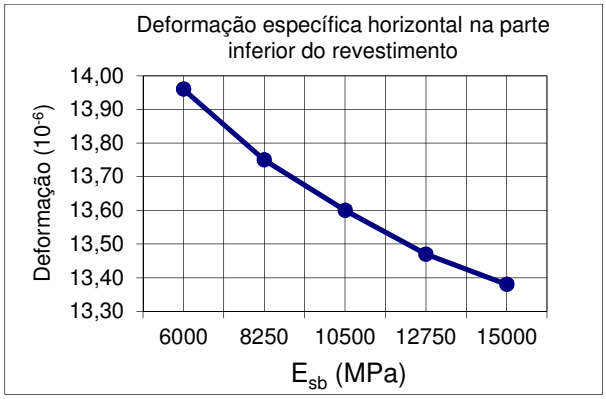
Assim, um aumento do E_b de 6000 MPa para 15000 MPa resultou em uma redução de, aproximadamente, 22,70% da deflexão no topo do revestimento e 0,003 MPa (12,92%) na tensão normal vertical no topo do subleito. A Fig. 19 apresenta os gráficos da deflexão, deformação e tensões nos respectivos pontos de interesse em função do módulo de elasticidade da base.

A deformação de tração horizontal na parte inferior da camada de revestimento alcançou valores entre 21,84·μm/m e 14,41 μm/m, variando, portanto, o valor da deformação em aproximadamente 34,02%. As isofaixas de deformações máximas principais são apresentadas na Fig. 20.

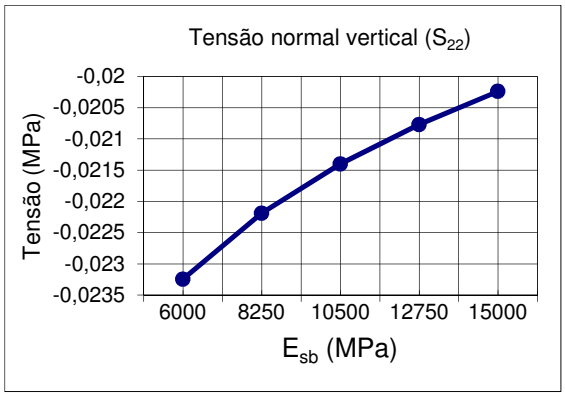
Figura 19 - Variação da deflexão no topo do revestimento (a), deformação específica horizontal na base do revestimento (b) e deformação no topo do subleito (c) em função do módulo de elasticidade, em MPa, da base.



(a)



(b)

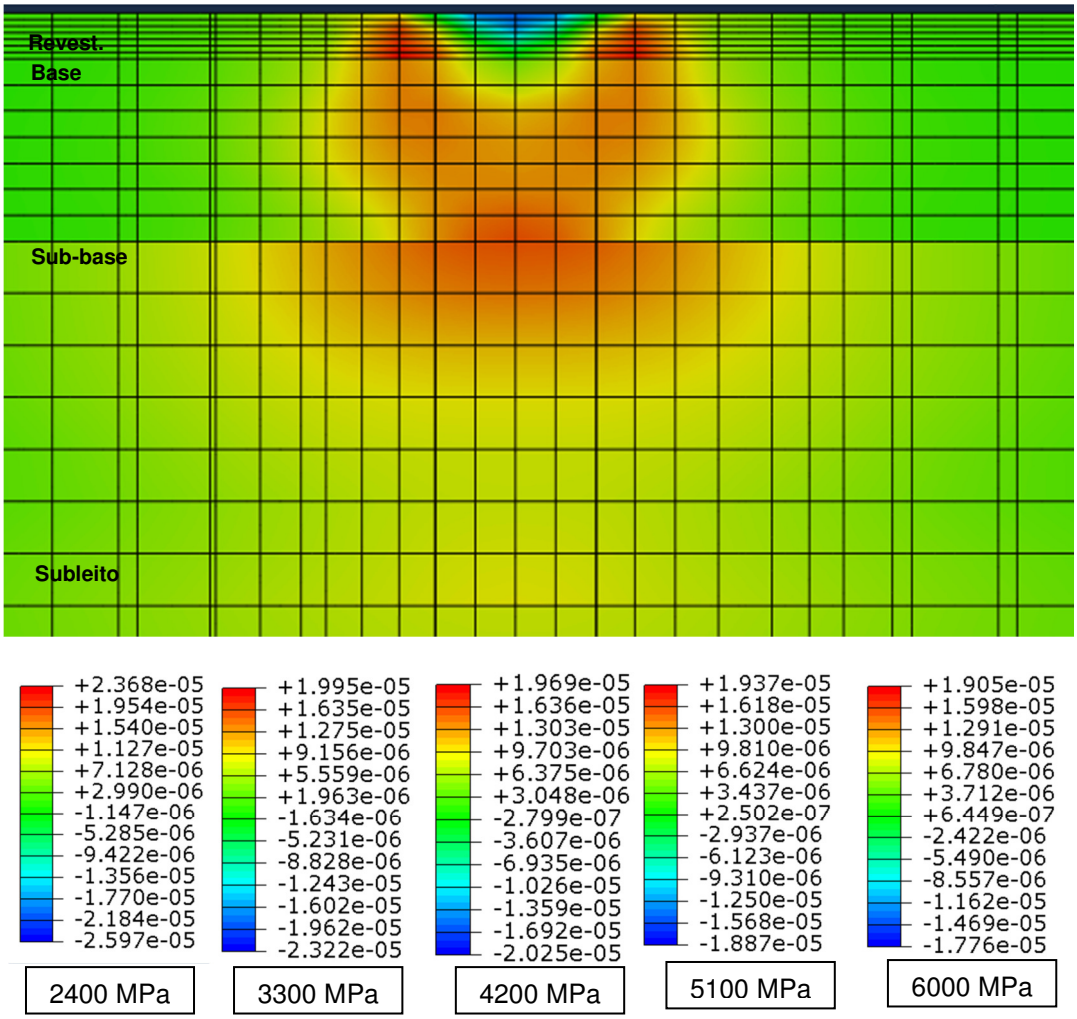


(c)

Fonte: Autor, 2012.

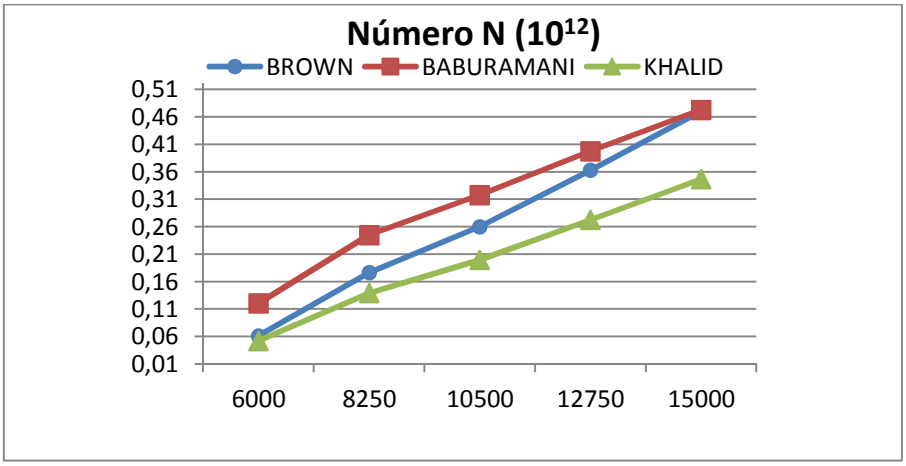
Em relação ao número N, as inclinações das curvas obtidas com os modelos estudados apresentaram inclinação acentuada, indicando certa relevância do módulo de elasticidade da base no processo de fadiga do revestimento, conforme apresentado na Fig. 21. A Tab. 3 apresenta os valores de N obtidos com os modelos de fadiga em estudo.

Figura 20 - Isofaixas de deformações máximas principais para os respectivos módulos de elasticidade da base.



Fonte: Autor, 2012.

Figura 21 - Número N obtido por meio dos modelos de BALBO (2004), BABURAMANI (1999)e KHALID (2000) em função do módulo de elasticidade, em MPa, da base.



Fonte: Autor, 2012.

Tabela 3 - Valores de N obtidos através dos modelos de BALBO (2004), BABURAMANI (1999) e KHALID (2000) em função do módulo de elasticidade da base (E_b).

E_b	BALBO	BABURAMANI	KHALID
6000 MPa	6,12E+10	1,20E+11	5,18E+10
8250 MPa	1,76E+11	2,45E+11	1,39E+11
10500 MPa	2,60E+11	3,18E+11	2,00E+11
12750 MPa	3,63E+11	3,98E+11	2,72E+11
15000 MPa	4,70E+11	4,73E+11	3,47E+11

Fonte: Autor, 2012.

4.1.3 Variação do módulo de elasticidade da camada de revestimento

O aumento gradual do módulo de elasticidade da camada de revestimento (E_r) resultou em uma concentração das tensões nesta camada, conforme evidenciado através das isofaixas apresentadas na Fig. 22.

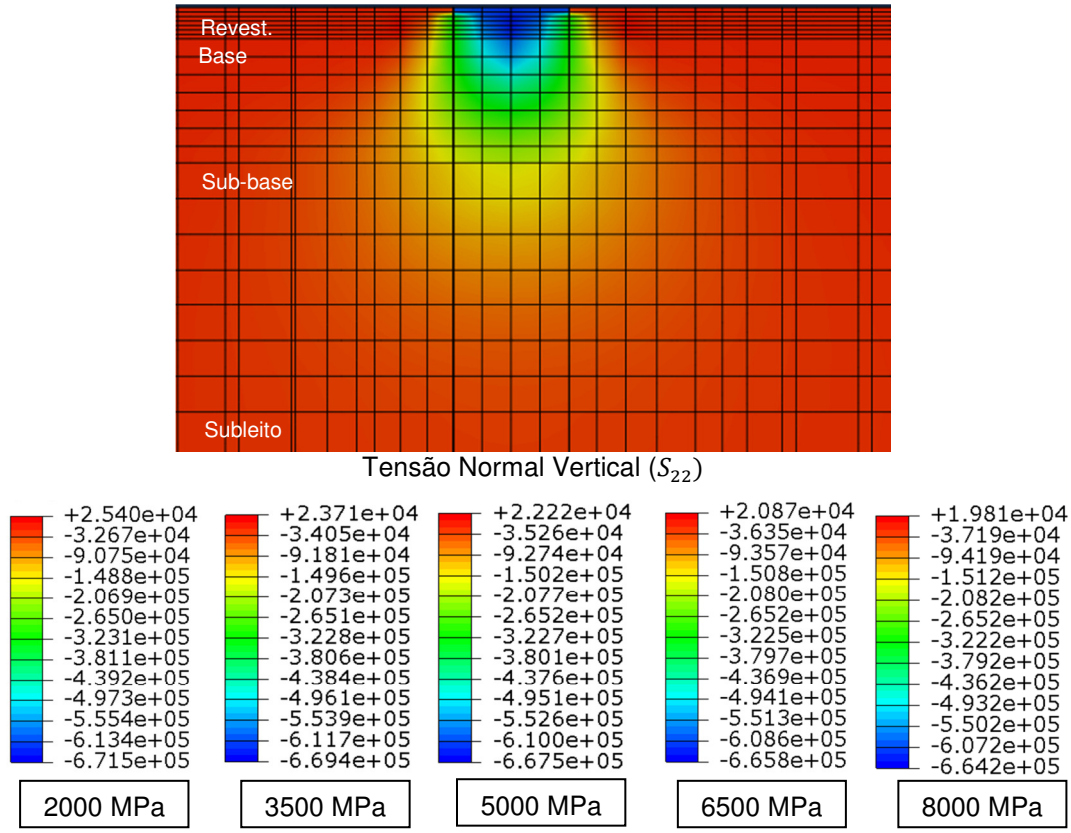
A tensão normal vertical no topo subleito variou de -0,02216 MPa até -0,02079 MPa (6,17%), enquanto que a deflexão na superfície do pavimento variou de -0,0444·mm até -0,0354 mm (20,27%).

Portanto, um aumento do E_r de 2000 MPa para 8000 MPa resultou em uma redução de, aproximadamente, 20,27% da deflexão no topo do revestimento e 0,002 MPa (6,17%) na tensão normal vertical no topo do subleito. A Fig. 23 apresenta gráficos da deflexão, deformação e tensão nos pontos de interesse.

A deformação na parte inferior da camada do revestimento alcançou valores entre 24,80 μm/m e 17,27·μm/m variando, portanto, em aproximadamente 30,36%, sendo o gráfico das deformações máximas principais é apresentado na Fig. 24.

Em relação ao número de carregamentos necessários para o revestimento sofrer colapso por fadiga, a variação do E_r também resultou em curvas do número N com inclinação acentuada, com exceção da curva obtida através do modelo de Baburamani (1999) que resultou em curva com inclinação descendente, tal fenômeno ocorreu em virtude da equação considerar o valor do módulo de elasticidade do revestimento, o qual teve acréscimo superior ao valor da deformação específica horizontal de tração. Os valores de N são apresentados na Tab. 4 e na Fig. 25.

Figura 22 - Isofaixas de tensões, em Pa, para análises sucessivas com a variação do módulo de elasticidade, em MPa, da camada de revestimento.



Fonte: Autor, 2012.

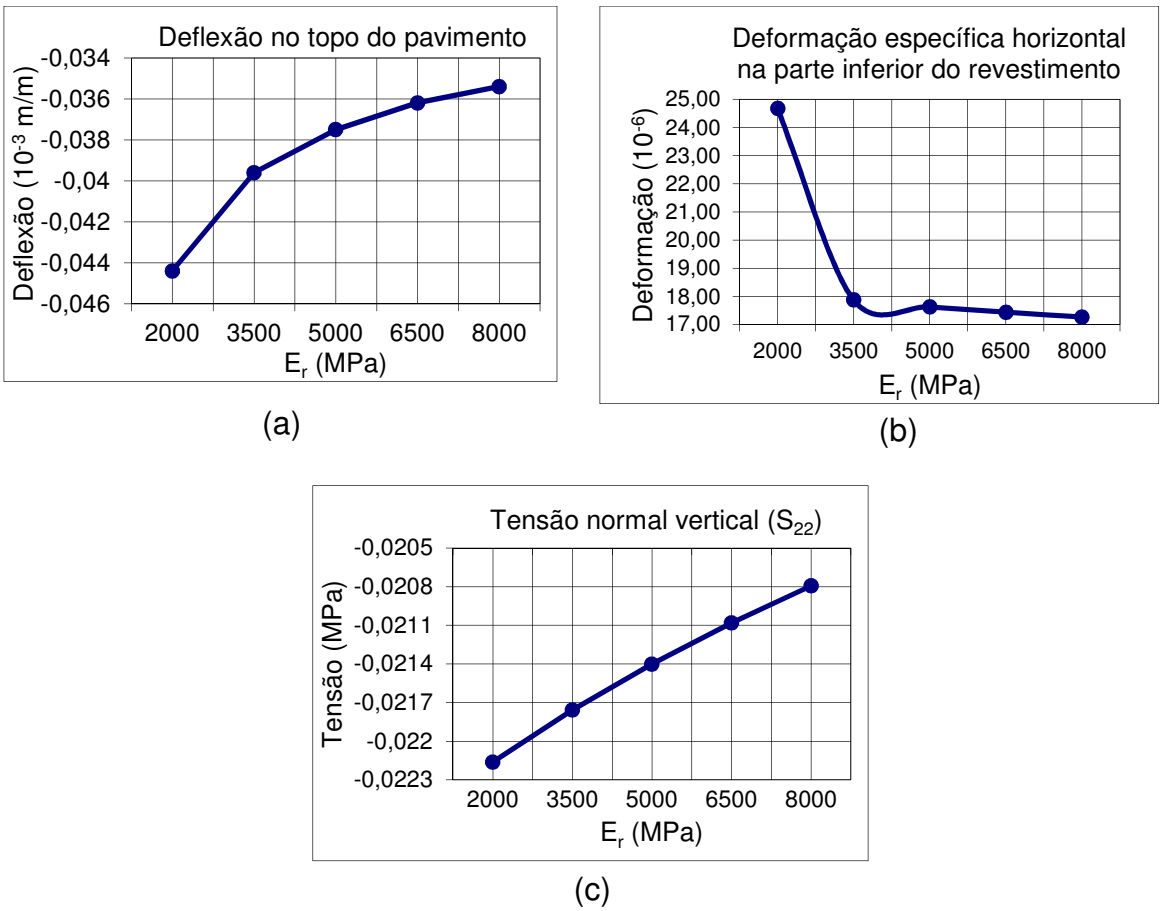
Tabela 4 - Valores do Número N obtidos através dos modelos de BALBO (2004), BABURAMANI (1999) e KHALID (2000) em função do módulo de elasticidade do revestimento (E_r).

E_r	BALBO	BABURAMANI	KHALID
2000 MPa	3,29E+10	1,73E+11	2,90E+10
3500 MPa	1,63E+11	3,15E+11	1,29E+11
5000 MPa	1,75E+11	2,43E+11	1,38E+11
6500 MPa	1,84E+11	2,02E+11	1,45E+11
8000 MPa	1,93E+11	1,74E+11	1,52E+11

Fonte: Autor, 2012.

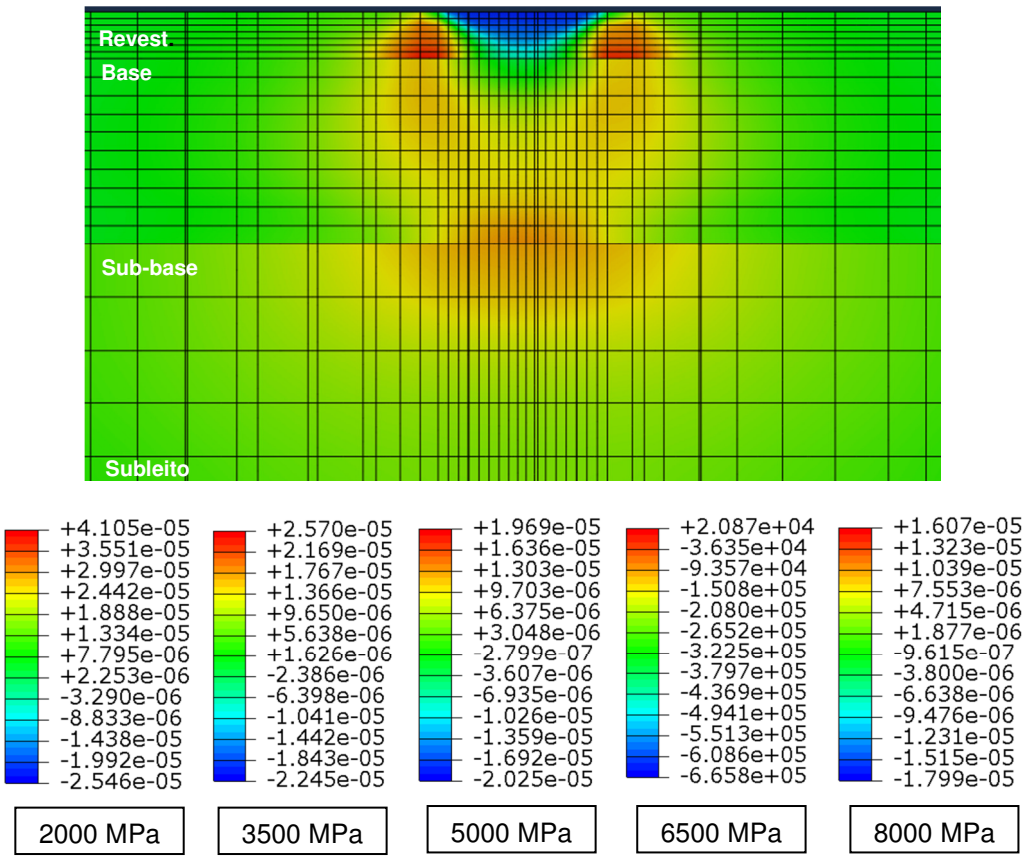
Os valores obtidos para a deformação específica horizontal na parte inferior do revestimento, apesar de ter resultado em percentual inferior aos obtidos na seção 4.1.1 e 4.1.2, percebe-se a relevância dessa camada, que mesmo possuindo a espessura bem mais delgada resultou em diferenças percentuais de apenas 4% para a base, com espessura quatro vezes maior, e 14% para a sub-base, oito vezes mais espessa.

Figura 23 - Variação da deflexão no topo do revestimento, deformação específica horizontal na base do revestimento e deformação no topo do subleito em função do módulo de elasticidade, em MPa, do revestimento.



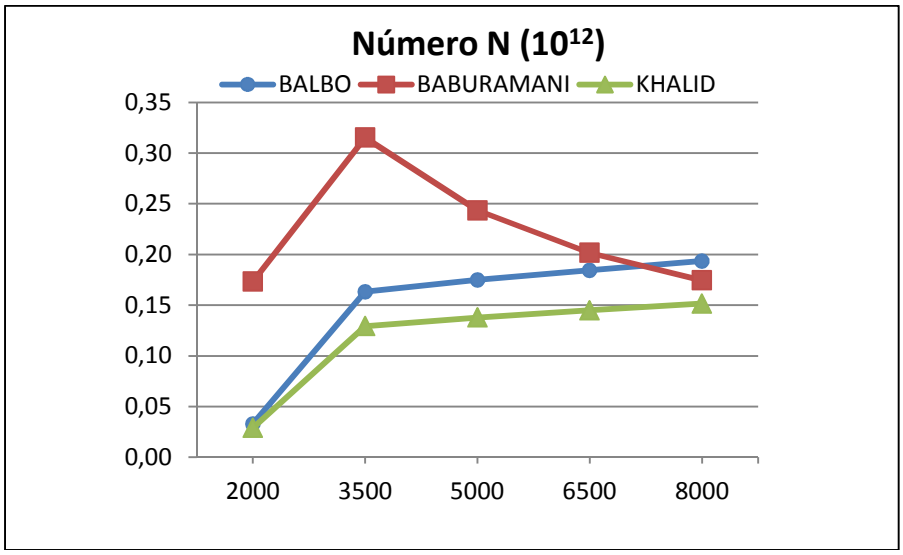
Fonte: Autor, 2012.

Figura 24 - Isofaixas de deformações máximas principais para os respectivos módulos de elasticidade da base.



Fonte: Autor, 2012.

Figura 25 - Número N obtido por meio dos modelos de BALBO (2004), BABURAMANI (1999)e KHALID (2000) em função do módulo de elasticidade, em MPa, do revestimento.



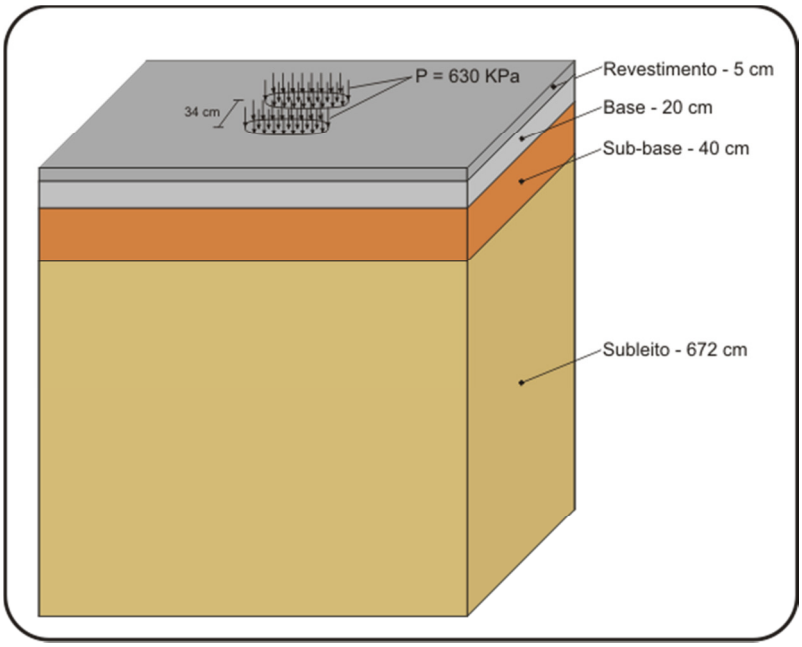
Fonte: Autor, 2012.

4.2 Análise elástica linear com duas cargas de roda

Na análise considerando o carregamento com rodas duplas, conforme Fig. 26, utilizou-se uma distância de trinta e quatro centímetros entre os eixos das cargas de roda (BALBO, 2007). Manteve-se o mesmo valor de pressão em ambas as cargas de roda de 630 kPa, avaliando assim a sensibilidade da estrutura para as variações das propriedades das camadas em uma condição mais desfavorável de carregamento.

Os resultados indicam que apesar de haver uma sobreposição das tensões, essas apresentam valores mais significativos ao longo dos eixos verticais passando pelos respectivos centros das cargas de roda e não na região entre as mesmas.

Figura 26 - Características do laminado modelado com carregamento de rodas duplas.



Fonte: Autor, 2012.

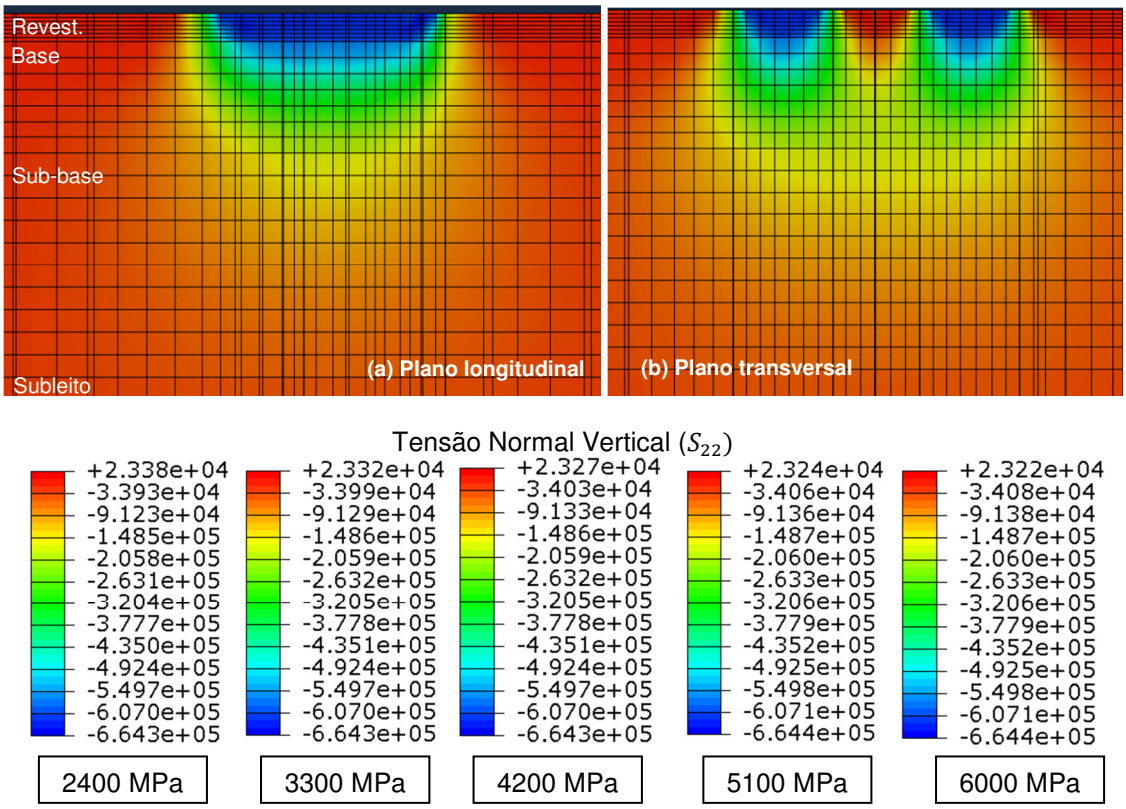
4.2.1 Variação do módulo de elasticidade da camada de sub-base

Nesta análise, foram adotadas as mesmas espessuras das camadas constituintes do pavimento estudado na seção 4.1. O domínio da malha de elementos finitos foi discretizado em 62832 nós e 60005 elementos.

Neste pavimento submetido a um carregamento duplo de rodas, o aumento do módulo de elasticidade da sub-base, E_{sb}, implicou em uma maior magnitude das tensões nessa camada e na diminuição das mesmas nas camadas de subleito e base, conforme apresentado na Fig. 27.

O incremento de rigidez da camada de sub-base acarretou uma diminuição das deflexões na superfície do pavimento, das deformações na base do revestimento e nas tensões verticais no topo do subleito, conforme apresentado na Fig. 28.

Figura 27 - Isofaixas de tensões, em Pa, para análises sucessivas com a variação do módulo de elasticidade da sub-base para um carregamento de rodas duplas.

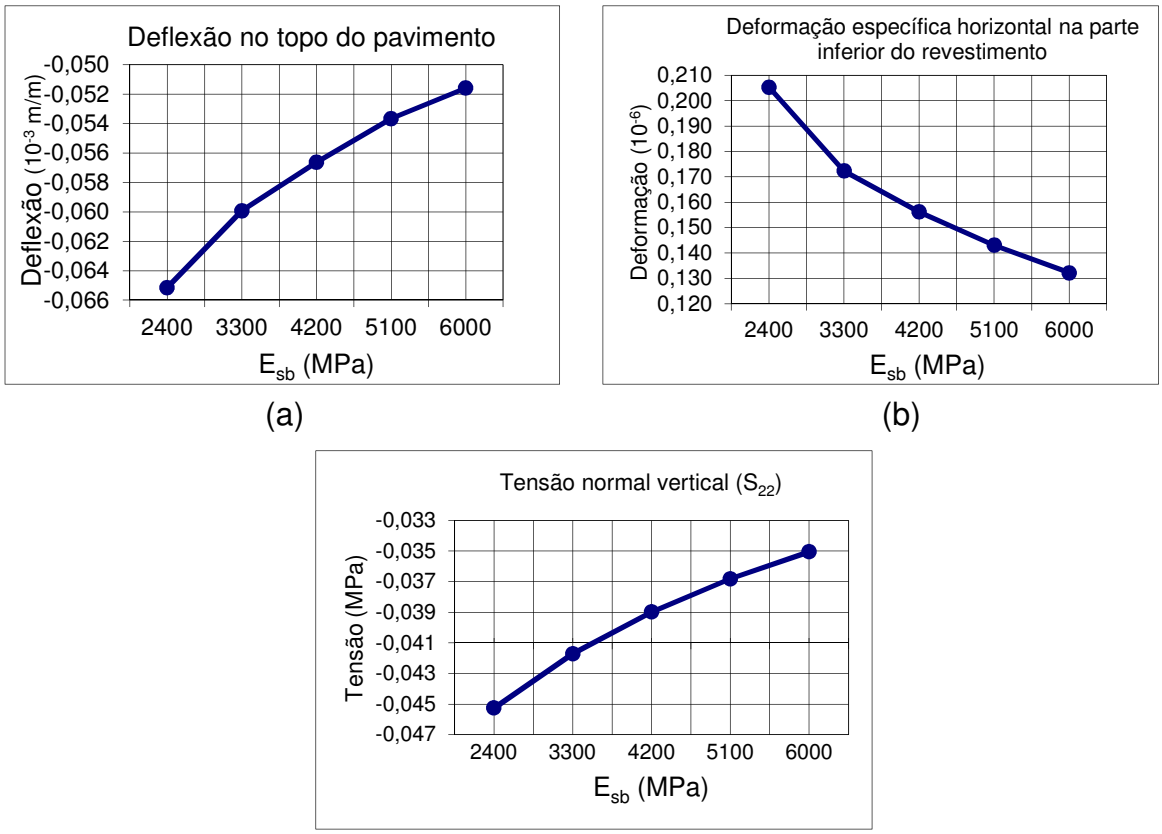


Fonte: Autor, 2012.

A tensão normal vertical no topo subleito variou de -0,04525 MPa a -0,03505 MPa (23%). A deflexão na superfície do pavimento variou de -0,06736 mm a -0,05202·mm, correspondente a uma redução de 23%.

A deformação na parte inferior da camada de revestimento alcançou valores entre 20,53·μm/m e 13,22·μm/m variando, portanto, o valor da deformação em aproximadamente 36%. A Fig. 29 apresenta as isofaixas de deformações para os respectivos E_{sb}.

Figura 28 - Variação deflexão (a), deformação (b) e da tensão (c) nos pontos de interesse em função do módulo de elasticidade, em MPa, da sub-base para um carregamento de rodas duplas.



Fonte: Autor, 2012.

Com base nos resultados das deformações, os valores de N foram estimados usando os modelos de fadiga propostos por BROWN et al. (1977), BABURAMANI (1999) e KHALID (2000), os quais estão apresentados na Fig. 30 e Tab. 5.

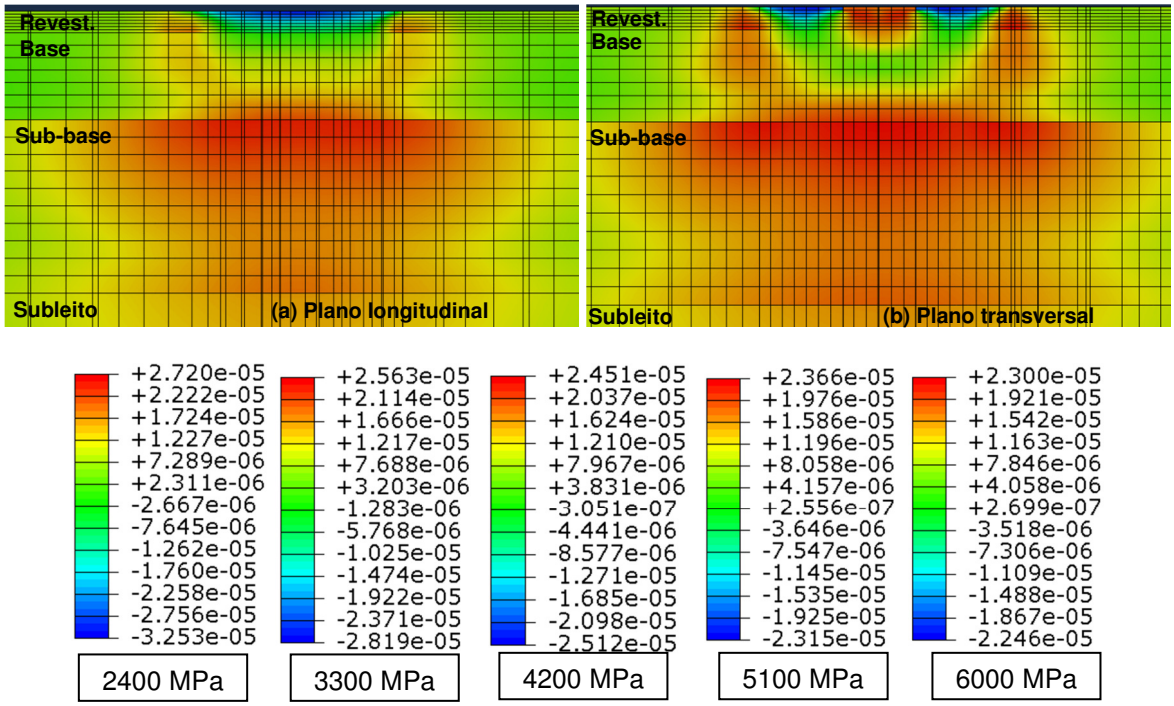
Os valores de N resultaram em curvas com ângulo de inclinação que indicam uma significativa influência do módulo de elasticidade da sub-base na fadiga do revestimento.

Tabela 5 - Valores do Número N obtidos através dos modelos de BROWN et al. (1977), BABURAMANI (1999) e KHALID (2000) para um carregamento de rodas duplas.

E_{sb}	BALBO	BABURAMANI	KHALID
2400 MPa	8,29E+10	1,48E+11	6,88E+10
3300 MPa	1,96E+11	2,63E+11	1,53E+11
4200 MPa	3,16E+11	3,63E+11	2,40E+11
5100 MPa	4,86E+11	4,84E+11	3,58E+11
6000 MPa	7,17E+11	6,28E+11	5,14E+11

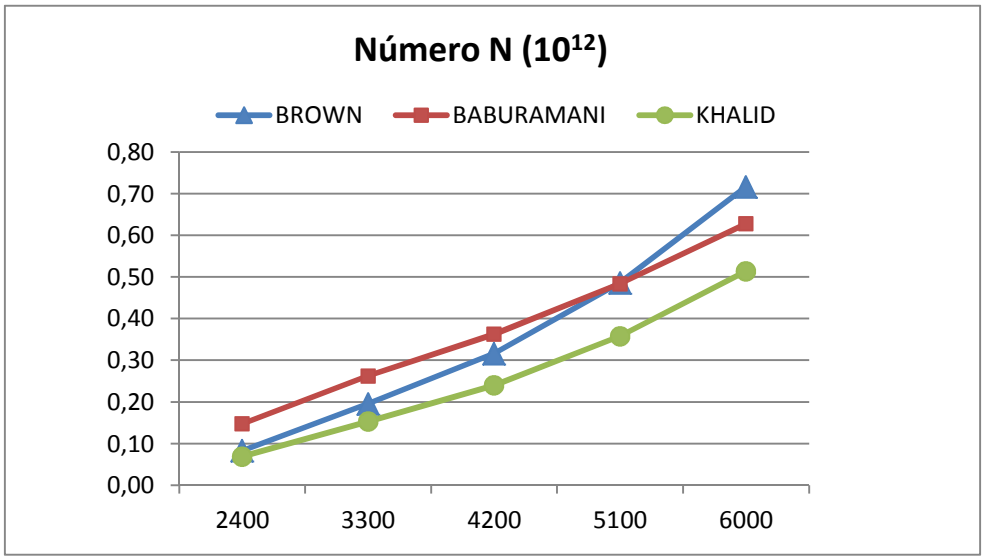
Fonte: Autor, 2012.

Figura 29 - Isofaixas de deformações para os respectivos módulos de elasticidade da base para um carregamento de rodas duplas.



Fonte: Autor, 2012.

Figura 30 - Número N obtido por meio dos modelos de BROWN et al. (1977), BABURAMANI (1999) e KHALID (2000) em função do módulo de elasticidade, em MPa, da sub-base para um carregamento de rodas duplas.



Fonte: Autor, 2012.

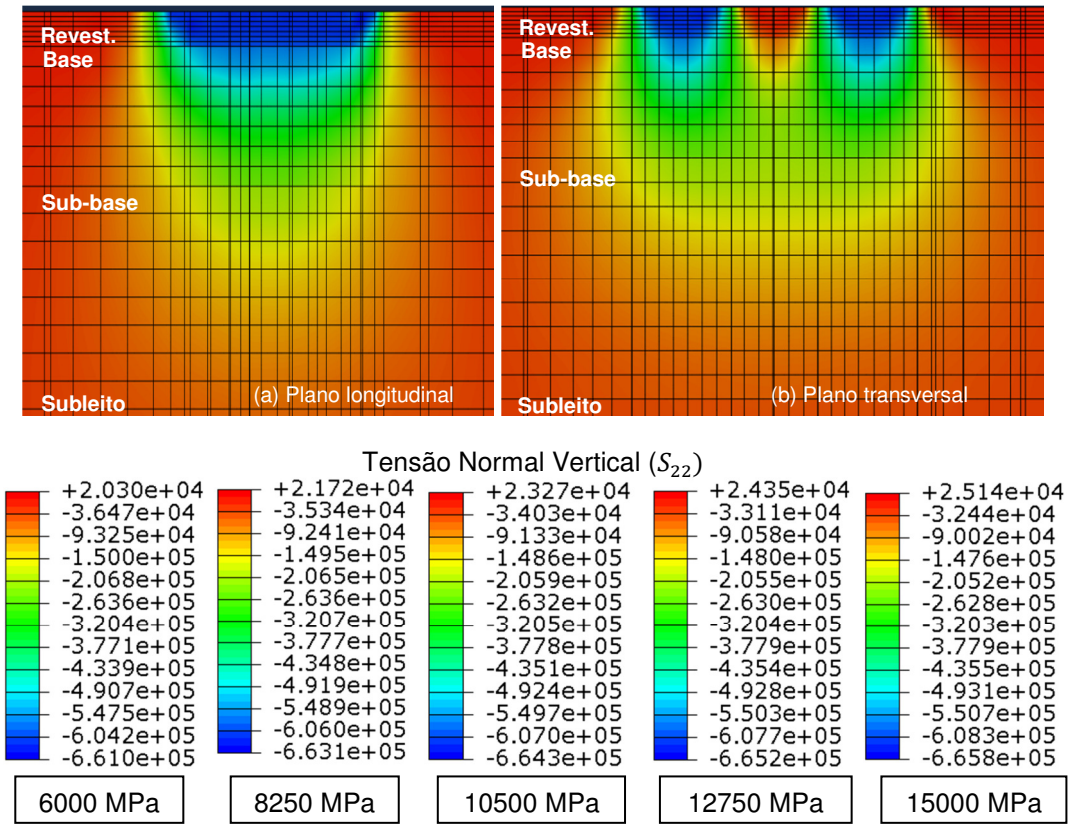
4.2.2 Variação do módulo de elasticidade da camada de base

O aumento gradual do módulo de elasticidade da camada de base (E_b), semelhante ao que aconteceu com a variação do E_{sb}, proporcionou um alívio das tensões nas camadas inferiores, conforme apresentado na Fig. 31.

A tensão normal vertical no topo do subleito também decresceu de -0,04205 MPa para -0,03704 MPa (12%), enquanto que a deflexão na superfície do pavimento variou de -0,06440·mm até -0,05383·mm (16%).

Assim, um aumento do E_b de 6000 MPa a 15000 MPa resultou em uma redução de, aproximadamente, 16% na deflexão no topo do revestimento e 0,005 MPa (12%) na tensão normal vertical no topo do subleito. Os gráficos dos valores obtidos para a deflexão no topo do pavimento, deformação de tração horizontal na base do revestimento e tensão no topo do subleito são apresentados na Fig. 32.

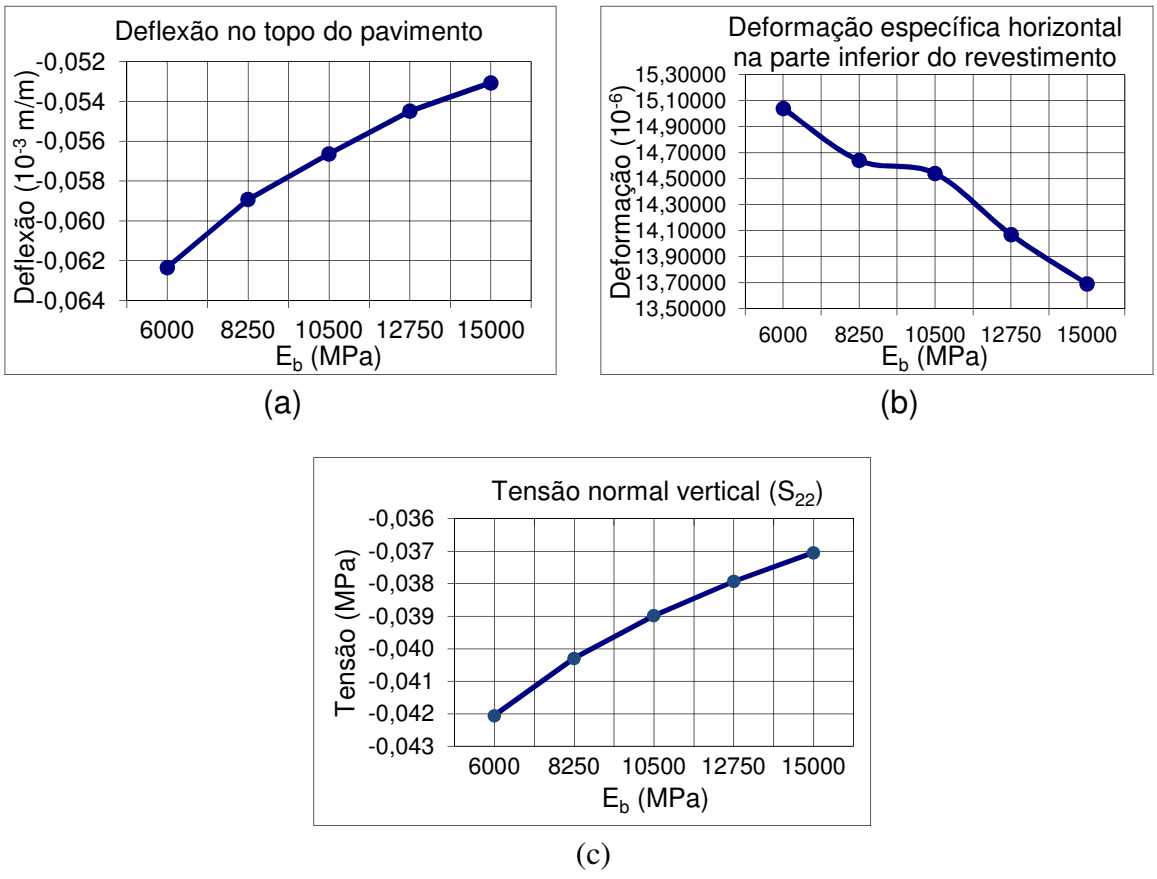
Figura 31 - Isofaixas de tensões para análises sucessivas com a variação do módulo de elasticidade da sub-base para um carregamento de rodas duplas.



Fonte: Autor, 2012.

A deformação de tração horizontal na parte inferior da camada de revestimento alcançou valores entre 18,19·µm/m e 14,80·µm/m, correspondendo a uma variação de aproximadamente 19%. A Fig. 33 apresenta as isofaixas das deformações máximas principais no plano transversal e longitudinal, enquanto que a Fig. 34 e a Tab. 6 mostram os valores de N obtidos com os três modelos de fadiga acima mencionados.

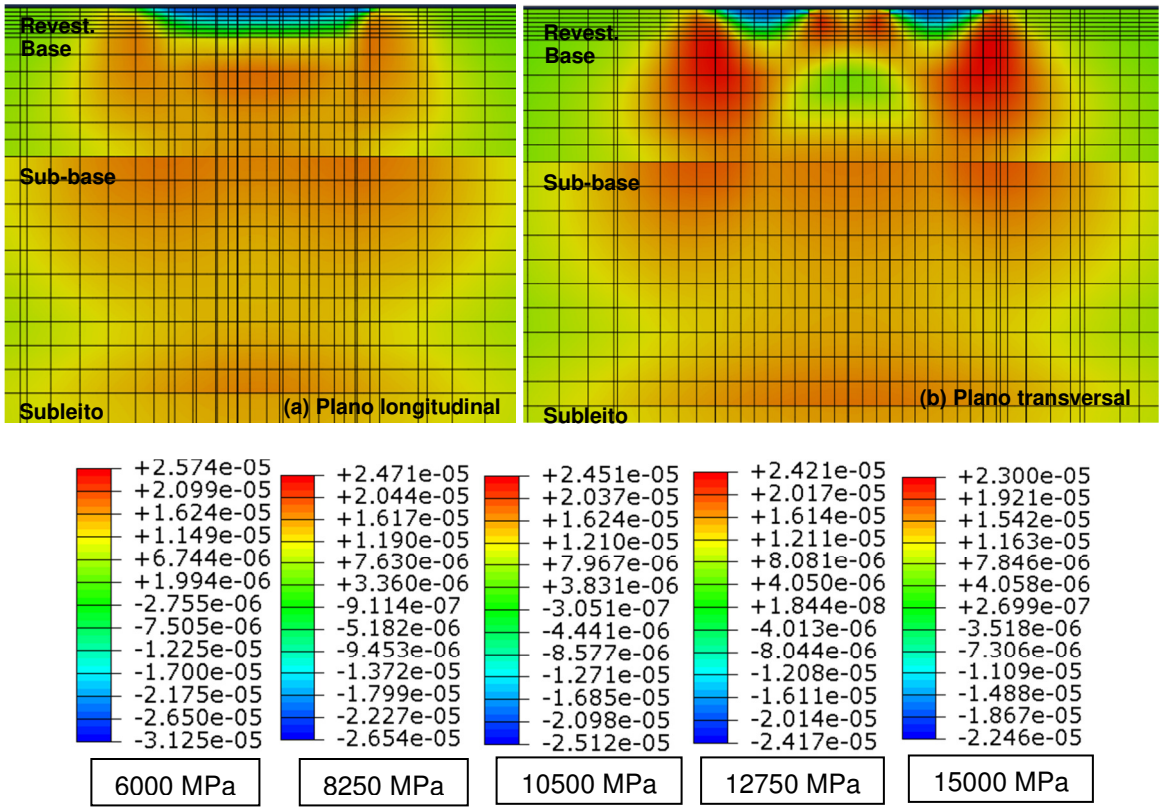
Figura 32 - Variação da tensão no topo do subleito (a), da deflexão (b) e deformação (c) em função do módulo de elasticidade, em MPa, da base para um carregamento de rodas duplas.



Fonte: Autor, 2012.

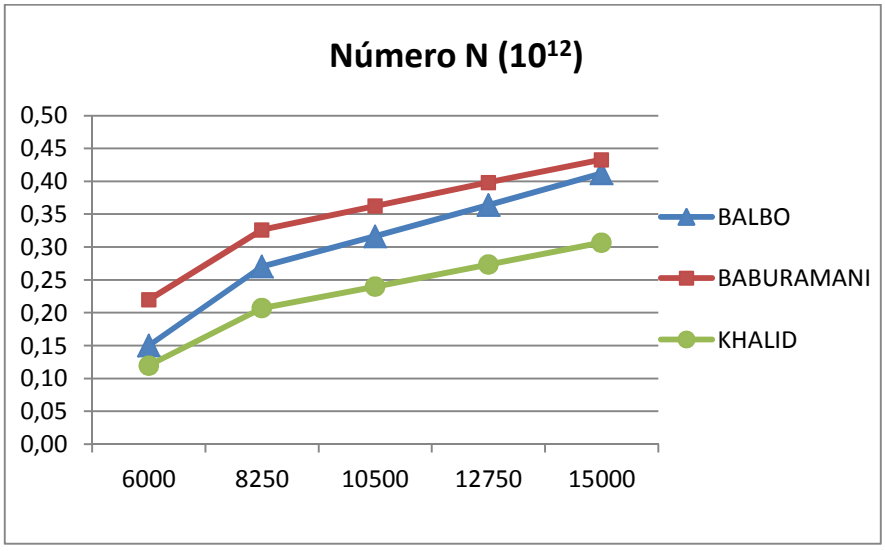
As inclinações das curvas obtidas com os modelos de Fadiga de BROWN et al. (1977), KHALID (2000) e BABURAMANI (1999) apresentaram inclinação significativa, indicando uma influência significativa do módulo de elasticidade da base no processo de fadiga do revestimento, conforme apresentado na Fig. 34 e Tab. 6.

Figura 33 - Deformação principal em função do módulo de elasticidade, em MPa, do revestimento para um carregamento de rodas duplas.



Fonte: Autor, 2012.

Figura 34 - Número N obtido por meio dos modelos de BROWN et al. (1977), BABURAMANI (1999) e KHALID (2000) em função do módulo de elasticidade, em MPa, da base para um carregamento de rodas duplas.



Fonte: Autor, 2012.

Tabela 6 - Valores do Número N obtidos através dos modelos de BROWN et al. (1977), BABURAMANI (1999) e KHALID (2000) em função do módulo de elasticidade da base (E_b) para um carregamento de rodas duplas.

E_b	BALBO	BABURAMANI	KHALID
6000 MPa	1,50E+11	2,20E+11	1,20E+11
8250 MPa	2,70E+11	3,26E+11	2,07E+11
10500 MPa	3,16E+11	3,63E+11	2,40E+11
12750 MPa	3,64E+11	3,98E+11	2,73E+11
15000 MPa	4,12E+11	4,33E+11	3,07E+11

Fonte: Autor, 2012.

4.2.3 Variação do módulo de elasticidade da camada de revestimento

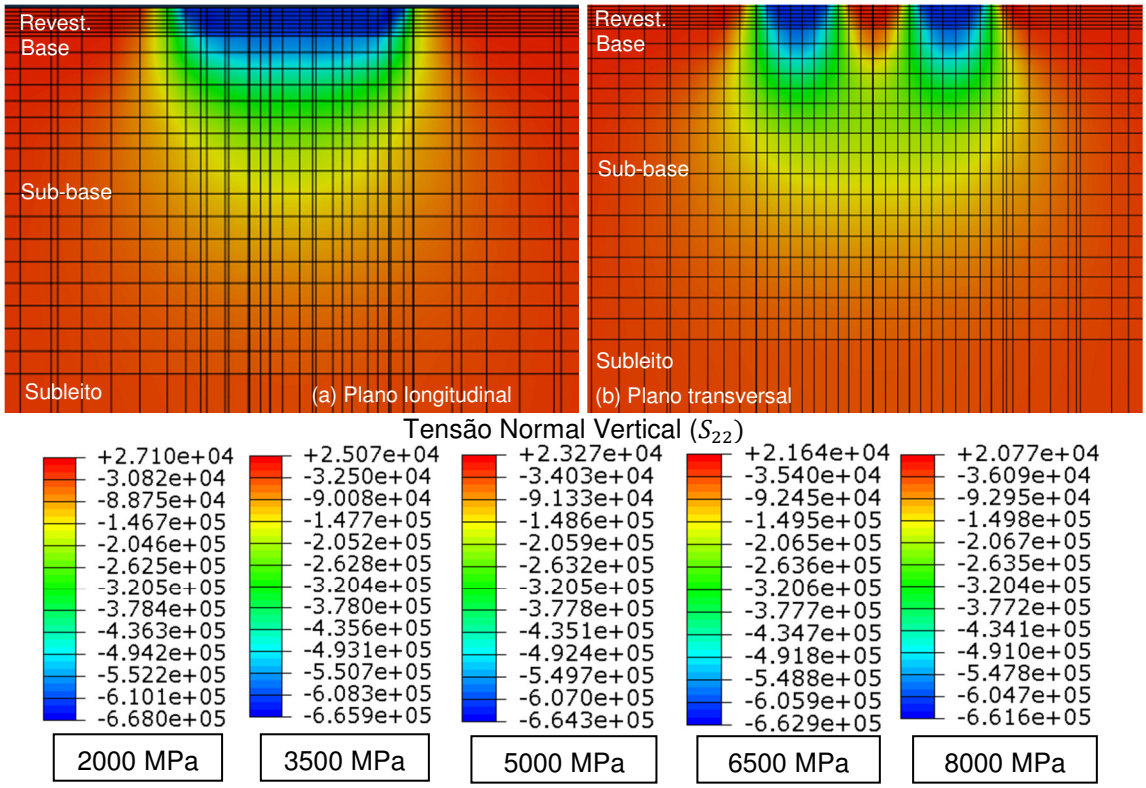
O aumento gradual do módulo de elasticidade da camada de revestimento (E_r) gerou uma diminuição das tensões nas camadas de base, sub-base e subleito. A isofaixa de tais tensões nos planos verticais longitudinal e transversal, para os respectivos módulos de elasticidade do revestimento, está apresentada na Fig. 35.

A tensão normal vertical no topo do subleito assumiu valores no intervalo entre -0,040279 MPa e -0,037932 MPa (6,0%), enquanto que a deflexão na superfície do pavimento variou de -0,066018·mm até -0,027878·mm. Portanto, um aumento do E_r de 2000 MPa para 8000 MPa resultou em uma redução de, aproximadamente, 58% da deflexão no topo do revestimento e 0,003 MPa (6%) na tensão normal vertical no topo do subleito. Na Fig. 36 são apresentados os gráficos da deflexão, deformação e tensão nos pontos de interesse do pavimento.

A deformação na parte inferior da camada do revestimento alcançou valores entre 19,62·μm/m e 15,19·μm/m, variando em aproximadamente 23%. A Fig. 37 apresenta as isofaixas das deformações principais.

Em relação ao número de carregamentos necessários para o revestimento sofrer colapso por fadiga, a variação do E_r acarretou uma variação do número N, conforme apresentado na Fig. 38 e na Tab. 7.

Figura 35 - Isofaixas de tensões, em Pa, para análises sucessivas com a variação do módulo de elasticidade, em MPa, da camada de revestimento para um carregamento de rodas duplas.



Fonte: Autor, 2012.

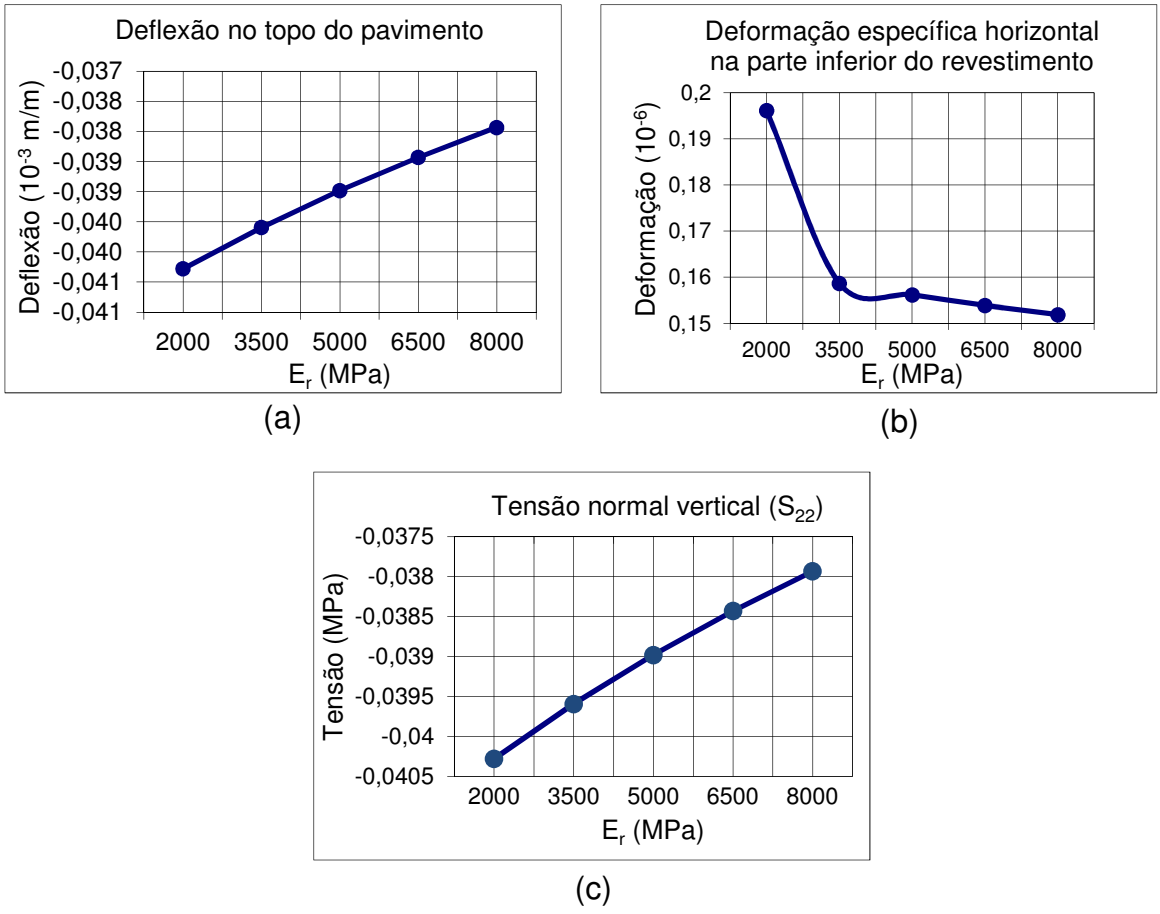
Os resultados indicam que o fenômeno de fadiga é significativamente influenciado pelo módulo de elasticidade do revestimento, havendo acentuada inclinação das curvas do número N em função do módulo de elasticidade do revestimento, com exceção da curva obtida com o modelo de Baburamani (1999) a qual apresentou inclinação descendente em virtude do aumento do módulo de elasticidade do revestimento.

Tabela 7 - Valores do número N obtidos através dos modelos de (BALBO,2007), (BABURAMANI, 1999) e (KHALID, 2000) para os respectivos valores do módulo de elasticidade do revestimento (E_r) para um carregamento de rodas duplas.

E_r	BALBO	BABURAMANI	KHALID
2000 MPa	1,04E+11	3,75E+11	8,46E+10
3500 MPa	2,93E+11	4,67E+11	2,23E+11
5000 MPa	3,16E+11	3,63E+11	2,40E+11
6500 MPa	3,40E+11	3,04E+11	2,57E+11
8000 MPa	3,63E+11	2,66E+11	2,72E+11

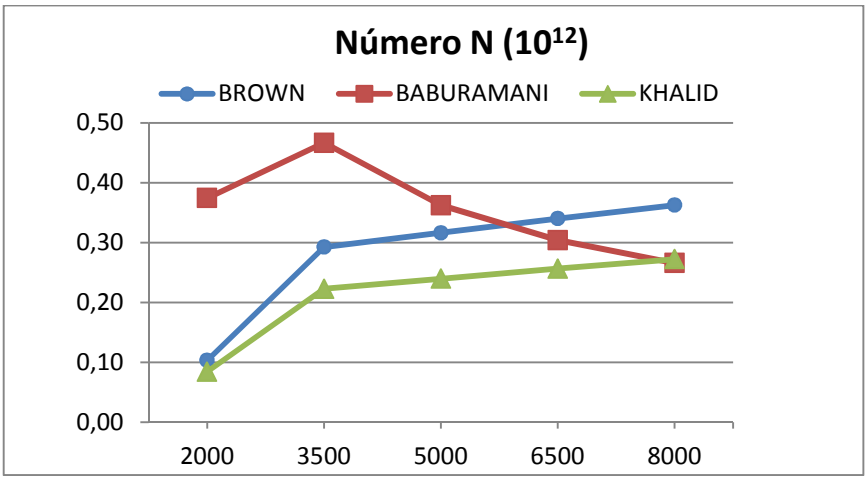
Fonte: Autor, 2012.

Figura 36 - Variação da deflexão no topo do revestimento, deformação específica horizontal na base do revestimento e deformação no topo do subleito em função do módulo de elasticidade, em MPa, do revestimento para um carregamento de rodas duplas.



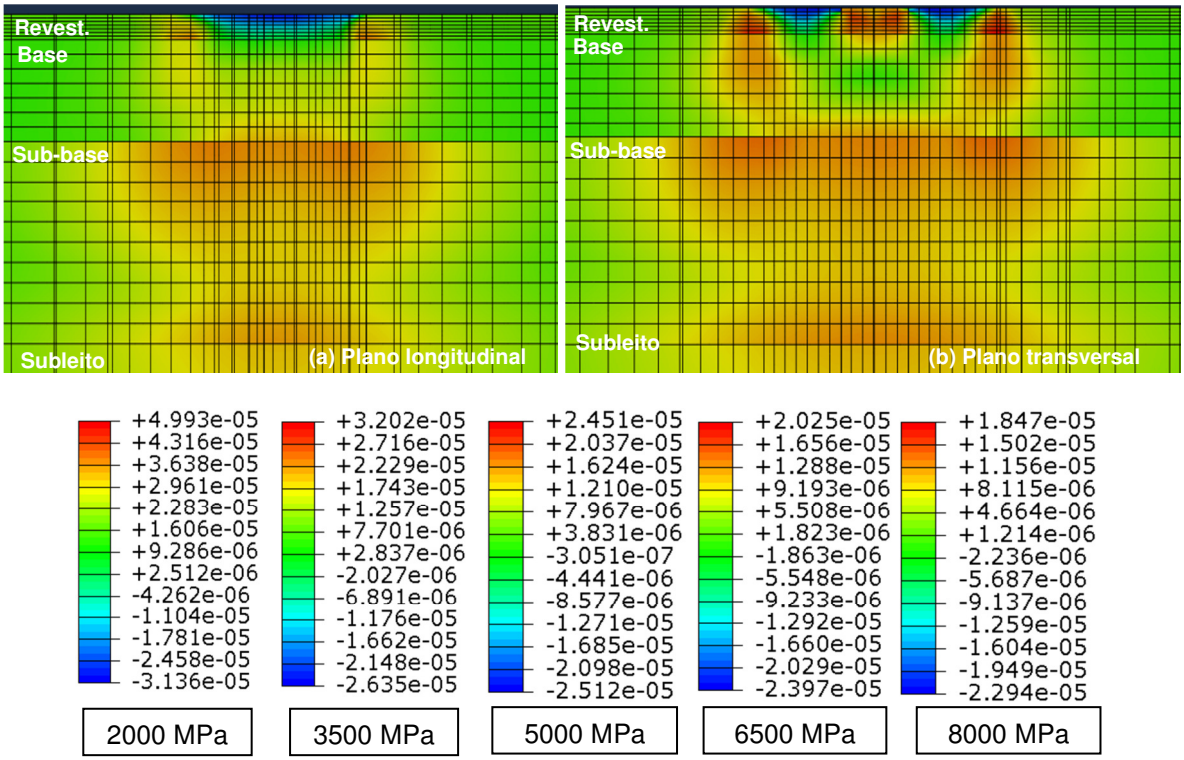
Fonte: Autor, 2012.

Figura 37 - Número N obtido por meio dos modelos de BROWN et al. (1977), (BABURAMANI, 1999) e (KHALID, 2000) em função do módulo de elasticidade, em MPa, do revestimento para um carregamento de rodas duplas.



Fonte: Autor, 2012.

Figura 38 - Deformação principal em função do módulo de elasticidade, em MPa, do revestimento para um carregamento de rodas duplas.



Fonte: Autor, 2012.

4.3 Síntese e análise dos resultados

Nesta seção apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos nas seções anteriores e uma análise comparativa dos mesmos.

Para o pavimento submetido a um carregamento de roda simples, a variação do módulo de elasticidade da camada de sub-base apresentou maior influência na deformação de tração na base do revestimento e menor influência na deflexão nessa mesma camada.

Nessas mesmas condições de solicitação, a variação do módulo de elasticidade das camadas de base e revestimento teve influência significativa na fadiga do revestimento e na deflexão no topo do pavimento. Contudo, apresentaram pouca relevância no valor da tensão no topo do subleito.

A Tab. 8 apresenta o resumo da influência da variação do módulo de elasticidade nos pontos de maior interesse para o pavimento submetido a um carregamento de roda simples.

Tabela 8 - Variação percentual da deflexão no topo do pavimento (ΔDef), deformação na base do revestimento ($\Delta\varepsilon_{ht}$) e tensão normal vertical no topo do subleito (ΔS_{sub}) em função da variação do módulo de elasticidade(ΔE) para o pavimento submetido a carregamento de roda simples.

Camada	ΔE (MPa)	ΔDef(%)	$\Delta\varepsilon_{ht}$(%)	ΔS_{sub}(%)
Sub-base	2400 - 6000	21,75	43,36	22,83
Base	6000 - 15000	22,70	34,02	12,92
Revestimento	2000 - 8000	20,27	30,36	6,17

Fonte: Autor, 2012.

Os valores percentuais, apresentados na Tab. 8, referem-se à variação das grandezas deflexão, deformação e tensão em função da variação do módulo de elasticidade de cada camada, mantendo-se constantes as características das demais, adotando-se o valor médio do intervalo.

Para o pavimento submetido a um carregamento de rodas duplas, houve alterações nos percentuais obtidos. A camada de sub-base, teve os valores praticamente inalterados, sendo relevante na deformação de tração na base do revestimento, mantendo-se os percentuais quase idênticos para a deflexão no topo do revestimento e tensão no topo do subleito.

Os resultados para um carregamento de rodas duplas, considerando os intervalos de variação de rigidez adotados, mostram uma maior influência da camada de revestimento na deflexão no topo do pavimento. Adicionalmente, as variações de rigidez das camadas de base e sub-base produziram, praticamente, o mesmo nível de influência sobre a tensão normal vertical no topo do subleito tanto no carregamento de rodas simples quanto na solicitação com rodas duplas.

A Tab. 9 apresenta um resumo da influência do módulo de elasticidade das camadas do pavimento sobre as grandezas relevantes para o presente estudo.

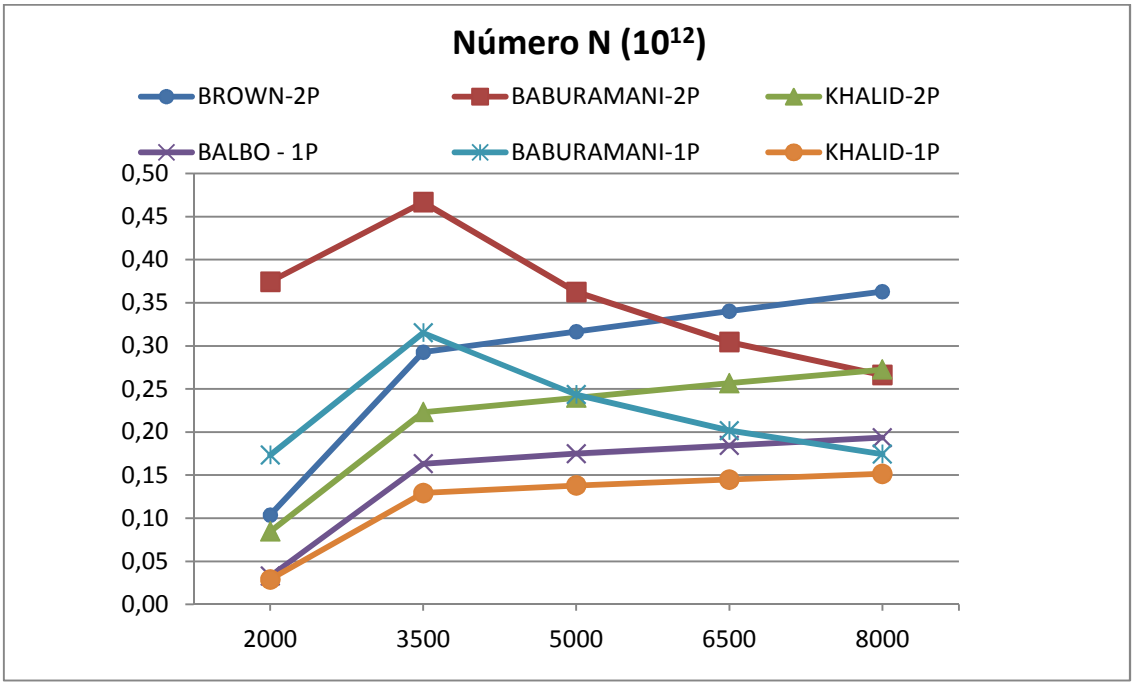
Tabela 9 - Variação da deflexão no topo do revestimento (ΔDef), deformação horizontal na base do revestimento ($\Delta\varepsilon_{ht}$) e tensão normal vertical no topo do subleito (ΔS_{sub}) em função da variação do módulo de elasticidade (ΔE) para o pavimento submetido a carregamento de rodas duplas.

Camada	ΔE (MPa)	ΔDef(%)	$\Delta\varepsilon_{ht}$(%)	ΔS_{sub}(%)
Sub-base	2400 - 6000	23%	36%	23%
Base	6000 - 15000	16%	19%	12%
Revestimento	2000 - 8000	58%	23%	6%

Fonte: Autor, 2012.

As curvas obtidas através do número N resultaram em formas semelhantes seja para um ou dois carregamentos de roda. Quando aplicou-se o carregamento com cargas duplas as curvas apresentaram a mesma inclinação apresentando apenas uma translação vertical, conforme apresentado na Fig. 39.

Figura 39 - Gráfico das curvas obtidas através do número N, para carregamentos com eixos simples (ES) e duplo (ED) em função do módulo de elasticidade do revestimento.



Fonte: Autor, 2012.

As normas e literaturas técnicas estabelecem critérios mais rigorosos no controle tecnológico para a execução dos revestimentos e das bases. Assim, esperava-se que os percentuais da camada de revestimento referente ao processo de fadiga apresentassem valores mais significativos. Os resultados são justificados em virtude da espessura delgada do revestimento (5 cm). Quando aumenta-se a espessura do revestimento o percentual da deformação específica horizontal de tração na parte inferior do revestimento aumenta significativamente, conforme apresentado na Tab. 10.

Em todos os casos estudados os resultados numéricos indicaram também relevância de camada de sub-base no fenômeno de fadiga.

Tabela 10 – Grandezas estudadas nos respectivos pontos de interesse em função da variação do módulo de elasticidade (ΔE) para o pavimento com revestimento de 10 cm submetido a carregamento de rodas duplas.

Camada	ΔE (MPa)	ΔDef(%)	$\Delta\varepsilon_{ht}$(%)	ΔS_{sub}(%)
Sub-base	2400 - 6000	21,07%	25,77%	19,77%
Base	6000 - 15000	10,30%	24,5%	12,46%
Revestimento	2000 - 8000	10,45%	65,21%	29,10%

Fonte: Autor, 2012.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da análise numérica de pavimentos rodoviários utilizando o programa ABAQUS, considerando carregamento de roda simples e dupla, foi possível realizar sucessivas simulações variando o módulo de elasticidade das camadas de revestimento, base e sub-base, obtendo os valores da deflexão no topo do pavimento, deformação na base do revestimento e tensões no topo do subleito.

Utilizou-se o elemento finito hexaédrico com oito nós, sendo o domínio da discretização definido de acordo com a metodologia proposta em DUNCAN (1968 apud SOUZA, 2003).

Com base na metodologia apresentada em HUANG (2004), aplicou-se o carregamento em uma região na forma de falsa elipse, cuja área foi obtida em função do valor da carga do pneumático (MULUNGYE, 2007).

Com o valor das deformações na base do revestimento, obteve-se o número N utilizando três modelos de fadiga disponíveis na literatura, quais sejam: BROWN et al. (1977), BABURAMANI (1999) e KHALID (2000).

Os resultados indicaram relevância da camada de sub-base no valor da deformação de tração horizontal na parte inferior do revestimento e, por conseguinte, na fadiga. Os percentuais de variações das grandezas mudam significativamente quando se aplica uma ou duas cargas de roda. No primeiro caso, o aumento do módulo de elasticidade da base de 6000 MPa para 15000 MPa resulta em uma variação de 34,02% na deformação de tração horizontal na parte inferior do revestimento, enquanto que no segundo caso resulta em apenas 19%.

A tensão no topo do subleito é influenciada principalmente pela camada de base e sub-base. Com a aplicação de um carregamento com rodas duplas, o percentual de variação da tensão no topo de subleito foi equivalente a 23% para uma variação do módulo de elasticidade da sub-base em 3600 MPa (2400MPa-6000MPa), e 12% para uma variação de 9000 MPa no módulo de elasticidade da base (6000 MPa para 15000 MPa). Esses percentuais permaneceram praticamente inalterados com a mudança de carregamento de rodas simples para rodas duplas.

Em relação à deflexão no topo do revestimento, a mudança da aplicação de rodas simples para rodas duplas, com um aumento no módulo de elasticidade da

base de 3600 MPa (2400 MPa para 6000 MPa), obteve-se uma variação de 16% para 22,7% de variação no valor dessa deflexão.

Dessa forma, enquanto que para uma única carga de roda os resultados indicaram que a base é camada mais relevante para o valor da deflexão na superfície do revestimento, para duas cargas de roda a camada de revestimento mostrou ter maior influência nesta grandeza apresentando percentuais de 22,7% e 58% respectivamente.

Os três modelos de fadiga apresentaram curvas com formas semelhantes para as variações de rigidezes das respectivas camadas. Os valores de N para a variação do módulo de elasticidade do revestimento resultou em uma curva declinada para o modelo de BABURAMANI (1999). Isso ocorreu em virtude da relação entre o módulo de elasticidade do revestimento e o valor da deformação específica horizontal na parte inferior do revestimento. Enquanto que o primeiro aumenta significativamente, o último decresce de maneira suave.

Quando houve variação das rigidezes nas camadas de sub-base e base, o modelo de BABURAMANI (1999) apresentou os maiores valores de N na maior parte dos casos.

Assim, esse trabalho realizou análises numéricas tridimensionais para estudar parametricamente o efeito do módulo de elasticidade das camadas de pavimentos rodoviários nos pontos de interesse. Para realização de tal estudo, algumas simplificações foram necessárias tais como camadas constituídas de materiais homogêneos e isótropos, carregamentos estáticos e área de contato em forma de falsa elipse. A seguir elencam-se algumas propostas para trabalhos futuros.

Sugestões para trabalhos futuros

a. Modelagem completa do pneumático para transferência da carga de roda ao pavimento rodoviário, excluindo-se assim a simplificação da transferência da carga de roda na forma de falsa elipse.

b. Consideração do deslocamento relativo entre as camadas, bem como a simulação mais precisa do efeito do contato entre as mesmas.

c. Estudo paramétrico para avaliação do efeito cruzado do valor do módulo de elasticidade das camadas, uma vez que o presente trabalho analisa o efeito de forma isolada, ou seja, mantendo-se constante as características das demais camadas.

d. Estudo obtendo-se o módulo de elasticidade das camadas em laboratório e verificando-se o valor das grandezas de interesse através de sensores *"in situ"*.

e. Implementação de modelos da mecânica da fratura para averiguar o surgimento de fissuras em revestimentos rodoviários.

f. Coleta de amostras de revestimentos asfálticos *"in situ"* para obtenção de um modelo de fadiga adaptado às condições climáticas locais.

g. Consideração do efeito da temperatura no estudo paramétrico.

REFERÊNCIAS

ABAQUS – Theory Manual, version 6.10, 2010.

ALBANO, J. F. **Área e pressão de contato dos pneus com a superfície de um pavimento.** *In: CONGRESSO DE PESQUISO E ENSINO EM TRANSPORTES, 14., 2000.* **Anais eletrônicos**...Gramado: ANPET*, 2000.* Disponível em <www.det.ufc.br>. Acesso em: 13 jul. 2010.

BABURAMANI, P. **Asphalt fatigue life prediction models – a literature review.** Vermont South. Research Report ARR 334, 1999.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Ed. Oficina de textos, 2007.

BENEVIDES, S. A. de S.; MOTTA, L. M.; SOARES, J. B. Método de dimensionamento de pavimentos asfálticos pelos métodos empíricos do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do CEARÁ. *In: CONGRESSO DE PESQUISO E ENSINO EM TRANSPORTES, 14., 2000.* **Anais eletrônicos**...Gramado: ANPET*, 2000.* Disponível em <www.det.ufc.br>. Acesso em: 13 jul. 2010.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006.

BRASIL. CONTRAN. Resolução nº 210, de 13 de novembro de 2006. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, 2006a, Seção 1, p. 72.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. **DNER-ME 054**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. **DNER-ME 133**: Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos**. Publicação IPR 704. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, p. 85, 1998.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. Publicação IPR 667. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, p. 10, 1981.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 316-ES**: Pavimentação – base de macadame hidráulico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1997.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031**-**ES**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de conservação rodoviária**. Publicação IPR 710. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, v. 2, p. 45, 2005.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Publicação IPR 720. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, v. 2, p. 272, 2006b.

BROWN, E. R.; PELL, P. S.; STOCK, A. F. **The application of simplified, fundamental design procedures for flexible pavements.** In: Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Proceeding Ann Arbor: University of Michigan, 1977.

COOK, R. D. **Concepts and applications of finite element analysis.** Republic of Singapore. Ed. John Wiley & Sons, 1989.

EJZENBERG, S. **Os veículos pesados e a segurança no projeto das curvas horizontais de rodovias e vias de trânsito rápido**. 2009. 245 f. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

EVDORIDES, H. T.; SNAITH, M. S.; ANYALA, M. **AN ANALYTICAL STUDY OF ROAD PAVEMENT FATIGUE**. Institution of Civil Engineers, Transport 159, v. 2, p. 93-100, 2006.

FRANCO, F. A. C. de P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfáticos – SISPAV**. 315 f. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design.** Upper Saddle River, NJ: Ed. Pearson Prentice Hall, 2004.

HUBER, G. A. **Methods to achieve rut-resistant durable pavements,** Transportation Research Board, p. 61. Washington D.C. 1999.

JUNIOR, A. P.; FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V.; RAIA, F. Análise de tensões e deformações de placas asfálticas pelo método dos elementos finitos. *In: SEMINÁRIO DE ELEMENTOS FINITOS E ENCONTRO DE USUÁRIOS DO PROGRAMA ANSYS, 10., 2000. **Anais eletrônicos**... São Paulo:SMARTtech Serviços e Sistemas, 2000.* Disponível em: < http://meusite.mackenzie.com.br >. Acessado em: 12 fev. 2010.

JUNIOR, F. E.; SOARES, J. B.; SILVA, E. R. de A. Modelagem computacional de pavimentos asfálticos – integração entre interface gráfica e programas de análise. In: *CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO DE TRANSPORTES, 17., 2003.* **Anais eletrônicos**...Gramado: ANPET*, 2003.* Disponível em <www.det.ufc.br>. Acesso em: 13 jul. 2010.

JUNIOR, F. E.; JUNIOR, E. P.; SOARES, J. B. Viscoelastic and elastic structural analysis of flexible pavements. *In: CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA (CILAMCE), 19., 2005 Guarapari.* **Anais eletrônicos***... Guarapari: UFES,2005.* Disponível em <www.redeasfalto.org.br>. Acesso em: 19 ago. 2010.

KHALID, H. A. Evaluation of asphalt fatigue properties in the laboratory. **Institution of Civil Engineers Transport**, n. 141, p. 171-178, 2000.

KIM, M. **Three-dimensional finite element analysis of flexible paviments considering nonlinear pavement foundation behavior**. 2007. 244 f. Tese de doutorado. University of Illinois at Urbana-Chapaign.

LIAO, Y. **Viscoelastic FE modeling of asphalt pavements and its applications to U.S. perpetual pavement**. 2007. 146 f. Tese de doutorado. Ohio University, 2007.

LU, Y.; LU, L.; WRIGHT, P. J. VISCO-ELASTOPLASTIC METHOD FOR PAVEMENT PERFORMANCE EVALUATION. **Institution of Civil Engineers, Transport**, n. 153, v. 4, p. 227-234, 2002.

MATSUDA, J. R. **Análise de fadiga em materiais dúcteis através de uma formulação localmente aclopada da mecânica do dano contínuo**. 2008. 135 f. Dissertação de mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MEDINA, J. MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

MONTEIRO, S.A. **Aplicação da Mecânica da Fratura no Trincamento no Concreto Asfáltico Utilizado em Pavimentos Rodoviários**. *Tese de Doutorad*o, UNB, Brasília, DF, Brasil, 2003.

MULUNGYE, R. M.; OWENDE, P. M. O.; MELLON, K. **Finite element modeling of flexible pavements on soft soil subgrades.** Materials and design, v. 28, p 739-756.,2007.

PIMENTEL, N. **Investir em infraestrutura para desenvolvimento econômico sustentável.** Jornal do Comércio do Amazonas, Manaus, 15 e 16 mai. 2010.

PITTA, M.R., **Dimensionamento de pavimentos com camadas estabilizadas com cimento**. 4. ed., São Paulo, ABCP, 1997, p. 68. apud FRANCO, F. A. C. de P. Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfáticos – SISPAV. 315 f. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SALGADO, J. C. P. **Técnicas e práticas construtivas para edificação.** 1. ed. São Paulo: Ed. Érica, 2008.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: PINI. v.1. 1997. 746p.

SHELL. **Pavement Design Manual – Asphalt pavements and overlays for road traffic**. Shell International Petroleum Company Ltd., Londres, 1978.

SOUZA, F. V. de; CASTRO, M. A. H. de; SOARES, J. B.; MELO, L. T. B. de. Análise de tensões e deformações de pavimentos utilizando o modelo plástico de Mohr-Coulomb. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO*, 33., 2003,* Florianópolis*.* **Anais eletrônicos**…Florianópolis: UFC, 2003. Disponível em: <www.det.ufc.br >. Acesso em: 27 nov. 2009.

WANG, L. Mechanics of asphalt – **Microstructure and micromechanics**. 1 ed. Nova York. Ed. McGraw-Hill, 2011.

YODER, E.; WITCZAK, M. **Principles of pavement design**. 2. Ed. Nova York: John Willey & Sons, 1975. apud BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Ed. Oficina de textos, 2007.