

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO  
SUL - UNIJUÍ**

**FERNANDA HART GARCIA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DOS EFEITOS DO CARREGAMENTO NA  
DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

**Ijuí  
2010**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**FERNANDA HART GARCIA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DOS EFEITOS DO CARREGAMENTO NA  
DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática.

**Orientador: Prof. Dr. Eng. Luciano Pivoto Specht**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Wang Chong**

**Ijuí  
2010**

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO  
SUL – UNIJUÍ**

**DeFEM – DEPARTAMENTO DE FÍSICA, ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA**

**DeTEC – DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**“MODELAGEM MATEMÁTICA DOS EFEITOS DO CARREGAMENTO NA  
DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS”**

Elaborada por

**FERNANDA HART GARCIA**

Como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática

Comissão examinadora:

---

Prof. Dr. Eng. Luciano Pivoto Specht – DeTec (Orientador)

---

Prof. Dr. Wang Chong – UNIPANPA (Co-Orientador)

---

Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges – DeFEM

---

Prof. Dr. Deividi Pereira - UFSM

Ijuí, RS, Fevereiro de 2010

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus familiares, em especial ao meu pai Jaci Hart que não mediu esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida e a minha mãe Diva Elaine Hart (in memoriam) pelo amor intenso, incentivo e dedicação até o último minuto que estive entre nós.

Ao meu irmão Fabrício Ivan Hart, pelo carinho e amizade.

Ao meu esposo Denis, pelo amor, carinho e paciência com que suportou minhas ausências.

Enfim, a todos que de alguma forma ou de outra tornaram este caminho mais fácil de ser percorrido.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pois sem Ele nada seria possível.

Ao professor Luciano Pivoto Specht, orientador deste trabalho, pela sua dedicação e por estar disposto a ajudar sempre.

Ao professor Wang Chong, pela valiosa colaboração na elaboração deste trabalho.

Aos demais professores pelos conhecimentos compartilhados.

Aos amigos e colegas pelo companheirismo e solidariedade.

A Geni, pela amizade em todos os momentos.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram para que esta etapa da minha vida fosse concluída com êxito.

## RESUMO

O tráfego é considerado uma das principais causas da degradação dos pavimentos flexíveis, sendo que o excesso de carga de alguns veículos causa dois dos danos mais conhecidos do pavimento asfáltico: o Trincamento por Fadiga e o Afundamento em Trilha de Roda. Este trabalho visa avaliar, através da Modelagem Matemática, os impactos oriundos do tráfego no comportamento estrutural dos pavimentos flexíveis através do Método de Elementos Finitos, utilizando como ferramenta o Software ANSYS. Foram implementados três Modelos Estruturais. Para o Modelo Estrutural I, utilizou-se como referência um veículo rodoviário de eixo simples (80kN por eixo) com área de contato pneu/pavimento constante. No Modelo Estrutural II acrescentou-se as pressões de inflação dos pneus, e no Modelo Estrutural III, utilizou-se como referência um veículo rodoviário de eixo simples de pneus extralargos. Para os três Modelos Estruturais utilizaram-se variações nos módulos de rigidez do revestimento e variações nos carregamentos (de -20% à +40%) em relação ao eixo de referência de 80kN. Através das simulações obteve-se a deformação de tração ( $\epsilon_t$ ) no revestimento, responsável pelo início do processo de trincamento por fadiga e a deformação de compressão ( $\epsilon_c$ ) no topo do subleito, causadora da deformação permanente. Com estes parâmetros, calculou-se o  $N_f$  (Número de repetições de carga até a ruptura do pavimento) através do modelo de fadiga do MEPG e do modelo de deformação permanente do Asphalt Institute. O Modelo Estrutural I apresenta uma significativa redução da vida útil do pavimento, tanto para a fadiga quanto para a deformação permanente. No Modelo Estrutural II, também há redução da vida útil, mas considerando as variações das áreas de contato pneu/pavimento foi possível obter resultados mais precisos. Para ambos os Modelos Estruturais I e II, os módulos de rigidez do revestimento não influenciam de forma significativa os resultados das análises. Já no Modelo Estrutural III verifica-se a importância dos módulos de rigidez do revestimento e também das diferentes áreas de contato pneu/pavimento na análise da fadiga, já para a deformação permanente os módulos não tem grande influência. Com isso, dentre os parâmetros estudados, é possível afirmar que o excesso de carga nas rodovias é a principal causa de danos como o trincamento por fadiga e o afundamento em trilha de roda em pavimentos flexíveis e que a modelagem matemática é uma eficiente ferramenta de análise de tal processo.

Palavra chave: Pavimento flexível, Método de Elementos Finitos, Fadiga, Deformação permanente, ANSYS.

## ABSTRACT

Traffic is considered a major cause of deterioration of flexible pavements, and the overloading of vehicles cause some damage to two of the best known of the asphalt pavement: the Fatigue cracking and rutting. This work is intended to find, through the Mathematical Modeling, the impacts from traffic on the structural behavior of flexible pavements by making use of the Finite Element Method using the ANSYS software. It has been implemented three structural models. For the Structural Model I it was used as reference an axle road vehicle (80kN per axles) with tire/pavement constant contact area. On the Structural Model II it was added the tires inflation pressures of the 552, 620 and 689 kPa tires and on the Structural Model III it was used as reference a road vehicle of a simple wide axle tire. For all the three structural models it was used changes on the cover layer stiffness and also variations on shipments (-20% to +40%) compared to the reference axles of 80kN. Through simulations in Ansys, it was obtained the tensile deformation in the coating ( $\epsilon_t$ ), responsible for the fatigue cracking initiation and deformation of compression ( $\epsilon_c$ ) at the top of the subgrade, which is the cause of the permanent deformation. With these parameters was calculated the  $N_f$  (Number of loading repetitions up to the pavement failure) through the MEPG fatigue model (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) and of the permanent deformation model of the Asphalt Institute. The Structural Model I shows a significant reduction in the pavement life, both for fatigue and for the permanent deformation. On the Structural Model II, there is also shortening of life, but considering the variations on the tire / pavement contact areas it was possible to obtain more accurate results. For both I and II Structural Models, the coating rigidity modules does not significantly influence the analysis. On the Structural Model III is verified the importance of the coating rigidity modules and also the different tire/pavement contact areas on the fatigue analysis, on the other hand, for the permanent deformation the modules does not have great influence. Thus, among the studied parameters, it is possible to state that the load excess on the highways is the main cause of damages as the fatigue cracking and rutting in flexible pavements and that mathematical modeling is very efficient toll to study all this process.

Key words: Flexible Pavement, Finite Element Method, Fatigue, Permanent Deformation, ANSYS.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Composição de um pavimento flexível.....	25
Figura 2: Trincamento por fadiga.....	27
Figura 3: Afundamento em trilha de roda.....	36
Figura 4: Elemento cúbico sujeito a tensões nas faces.....	46
Figura 5: Tensões em uma das faces do elemento cúbico.....	47
Figura 6: Pequeno elemento $dx$ $dy$ $dz$ de um corpo elástico.....	47
Figura 7: Deformações no plano $xy$ .....	48
Figura 8: Tensões em um bloco retangular.....	51
Figura 9: Pequeno prisma retangular.....	53
Figura 10: Tensões no contorno.....	53
Figura 11: Barra qualquer.....	54
Figura 12: Barra submetida a uma força $P$ .....	54
Figura 13: Ensaio para medidas de módulos resilientes.....	55
Figura 14: Exemplo da relação entre a tensão e a deformação para uma barra de aço tracionada.....	58
Figura 15: Configuração de elementos finitos – elemento quadrangular.....	61
Figura 16: Numeração local para o elemento quadrado usado neste trabalho.....	62
Figura 17: Malha de elementos finitos.....	67
Figura 18: Características dos materiais utilizados na construção do modelo estrutural.....	68
Figura 19: Pneu de rodado duplo.....	69
Figura 20: Ajuste linear dos dados obtidos por Albano (1998).....	70
Figura 21: Pneu extralargo.....	73
Figura 22: Interface do Software Ansys.....	74
Figura 23: Escolha do elemento no Ansys.....	75
Figura 24: Escolha do plano de deformação.....	75
Figura 25: Escolha das características e propriedades dos materiais.....	76
Figura 26: Construção do modelo geométrico: numeração dos nós.....	77
Figura 27: Modelo geométrico para um pavimento bidimensional e simétrico: união entre nós.....	77
Figura 28: Conexão entre as linhas para a obtenção das áreas.....	78

Figura 29: Áreas do modelo geométrico.....	78
Figura 30: Aplicação das características e propriedades dos materiais.....	79
Figura 31: Áreas selecionadas (em rosa) do subleito.....	79
Figura 32: Escolha do Material 3 para aplicação na área selecionada (subleito).....	80
Figura 33: Áreas selecionadas para a criação da malha.....	80
Figura 34: Malha de elementos finitos.....	81
Figura 35: Áreas selecionadas para o refinamento da malha.....	81
Figura 36: Malha de elementos finitos refinada.....	82
Figura 37: Aplicação dos vínculos em x e y.....	82
Figura 38: Vínculos já aplicados.....	83
Figura 39: Comandos para a aplicação do carregamento.....	83
Figura 40: Carregamentos já aplicados (setas em vermelho).....	84
Figura 41: Comando para obter o resultado do problema.....	84
Figura 42: Opções para a visualização dos resultados através da solução nodal.....	85
Figura 43: Comando para selecionar apenas os elementos da camada de revestimento.....	86
Figura 44: Elementos da camada de revestimento já selecionados.....	87
Figura 45: Comando para a visualização da deformação crítica de tração.....	87
Figura 46: Visualização da deformação crítica de tração no revestimento.....	88
Figura 47: Comando para a visualização da deformação crítica de compressão.....	88
Figura 48: Visualização da deformação crítica de compressão no topo do subleito.....	89
Figura 49: $N_f$ calculado para cada módulo de rigidez do ME I, considerando a fadiga.....	93
Figura 50: Relação $N_f/N_{f\text{ padrão}}$ do ME I, considerando a fadiga.....	93
Figura 51: $N_f$ calculado para cada módulo de rigidez do ME I, considerando a deformação permanente.....	94
Figura 52: Relação $N_f/N_{f\text{ padrão}}$ do ME I, considerando a deformação permanente.....	95
Figura 53: $N_f$ calculado para cada módulo de rigidez do ME II, considerando a fadiga.....	99
Figura 54: Relação $N_f/N_{f\text{ padrão}}$ do ME II, considerando a fadiga.....	99
Figura 55: $N_f$ calculado para cada módulo de rigidez do ME II considerando a deformação permanente.....	101
Figura 56: Relação $N_f/N_{f\text{ padrão}}$ do ME II considerando a deformação permanente.....	101
Figura 57: $N_f$ calculado para cada módulo de rigidez das Situações 1 e 2 do ME III considerando a fadiga.....	104
Figura 58: Relação $N_f/N_{f\text{ padrão}}$ das Situações 1 e 2 do ME III considerando a fadiga.....	104

Figura 59: $N_f$ calculado para cada módulo de rigidez das Situações 1 e 2 do ME III considerando a deformação permanente.....	106
Figura 60: Relação $N_f/N_{f \text{ padrão}}$ das Situações 1 e 2 do ME III considerando a deformação permanente.....	106
Figura 61: Relação $N_f/N_{f \text{ padrão}}$ dos Modelos I e II para a fadiga.....	108
Figura 62: Relação $N_f/N_{f \text{ padrão}}$ dos Modelos I e III para a fadiga.....	109
Figura 63: Relação $N_f/N_{f \text{ padrão}}$ dos Modelos I e II para a deformação permanente.....	110
Figura 64: Relação $N_f/N_{f \text{ padrão}}$ dos Modelos I e III para a deformação permanente.....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados experimentais obtidos por Albano (1998).....	70
Tabela 2: Área de contato pneu/pavimento para pressão de inflação de 552 kPa.....	71
Tabela 3: Área de contato pneu/pavimento para pressão de inflação de 620 kPa.....	71
Tabela 4: Área de contato pneu/pavimento para pressão de inflação de 689 kPa.....	72
Tabela 5: Valores obtidos nas simulações do Modelo I para a $\varepsilon_t$ e $\varepsilon_c$ .....	91
Tabela 6: Valores do $N_f$ calculados para os diferentes módulos de rigidez considerando o trincamento por fadiga.....	92
Tabela 7: Valores do $N_f$ calculados para os diferentes módulos de rigidez considerando a deformação permanente.....	94
Tabela 8: Valores obtidos nas simulações do Modelo II para a $\varepsilon_t$ e $\varepsilon_c$ considerando a pressão de inflação de 552 kPa.....	96
Tabela 9: Valores obtidos nas simulações do Modelo II para a $\varepsilon_t$ e $\varepsilon_c$ considerando a pressão de inflação de 620 kPa.....	96
Tabela 10: Valores obtidos nas simulações do Modelo II para a $\varepsilon_t$ e $\varepsilon_c$ considerando a pressão de inflação de 689 kPa.....	97
Tabela 11: Valores do $N_f$ calculados para os diferentes módulos de rigidez e diferentes pressões de inflação dos pneus considerando o trincamento por fadiga.....	98
Tabela 12: Valores do $N_f$ calculados para os diferentes módulos de rigidez e diferentes pressões de inflação, considerando a deformação permanente.....	100
Tabela 13: Valores obtidos nas simulações do Modelo III para a $\varepsilon_t$ e $\varepsilon_c$ considerando a Sit.1.....	102
Tabela 14: Valores obtidos nas simulações do Modelo III para a $\varepsilon_t$ e $\varepsilon_c$ considerando a Sit.2.....	102
Tabela 15: Valores do $N_f$ calculados para os diferentes módulos de rigidez considerando o trincamento por fadiga nas Situações 1 e 2.....	103
Tabela 16: Valores do $N_f$ calculados para os diferentes módulos de rigidez considerando a deformação permanente nas Situações 1 e 2.....	105

## LISTA DE SÍMBOLOS

$h_0$	Altura inicial de referência do corpo-de-prova cilíndrico
$A$	Área
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AC	Área de contato pneu/pavimento
CBR	California Bearing Ratio
CMT	Capacidade máxima de tração
$\rho$	Carga distribuída na superfície por unidade de área
$\mu$	Coefficiente de Poisson
$k_1, k_2, k_3$	Coefficientes de regressão obtidos em laboratório
$u, v, w$	Componentes do deslocamento
CCR	Concreto compactado a rolo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
$k, n$	Constantes que dependem da rigidez e do teor de asfalto da mistura betuminosa
$(\xi, \eta)$	Coordenadas locais
$(x, y)$	Coordenadas globais
USACE	Corpo dos Engenheiros do Exército Norte-Americano
$D$	Dano de fadiga para o topo; Dano de fadiga para a base
$\gamma$	Deformação angular
$\varepsilon_c$	Deformação de compressão no topo do subleito
$\varepsilon_t$	Deformação específica de tração
$\varepsilon_r$	Deformação específica resiliente
$\varepsilon_p(z=0)$	Deformação específica permanente no topo do subleito
$\varepsilon_p(z)$	Deformação específica permanente na profundidade $z$
$\varepsilon_v$	Deformação específica vertical média resiliente
$\delta_a(N)$	Deformação permanente da camada
$\delta_{SL}$	Deformação permanente do subleito
$\varepsilon_p$	Deformação permanente na $n$ -ésima repetição da carga

$\varepsilon$	Deformação normal
$\varepsilon_{\theta}$	Deformação tangencial
MnRoad	Departamento de Transportes do estado de Minnesota
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
$\Delta h$	Deslocamento vertical máximo
$\delta$	Deslocamento total na horizontal
$d$	Diâmetro
$V_b$	Efetivo teor de ligante (%)
$h$	Espessura da camada
$H_{ac}$	Espessura da camada asfáltica em polegadas
$h_{ac}$	Espessura total da camada asfáltica
$C$	Fator de ajuste de campo
$F$	Força axial
$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$	Forças de superfície por unidade de área
$X, Y, Z$	Forças de massa por unidade de volume
$c$	Força de massa por unidade de volume
$K$	Função da espessura da camada asfáltica e da profundidade do ponto de análise
$N_1, N_2, N_3, N_4$	Funções de interpolação
$[K]^{-1}$	Inversa da matriz de rigidez global
LTPP	Long Term Pavement Performance
$[K]^{(e)}$	Matriz de rigidez do elemento
$[K]$	Matriz de rigidez global
$[B]$	Matriz deformação – deslocamento
$[D]$	Matriz relação constitutiva
MEPDG	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
MEF	Método de Elementos Finitos
ME	Modelo Estrutural
ME I	Modelo Estrutural I
ME II	Modelo Estrutural II
ME III	Modelo Estrutural III
$M_R$	Módulo de resiliência da mistura asfáltica, kgf/cm <sup>2</sup>

E	Módulo de rigidez do material, em MPa
$ E^* $	Módulo dinâmico da mistura asfáltica, em psi
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
$N_f$	Número de repetições de carga até a ruptura do pavimento
$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$	Parâmetros de calibração
$a, b$	Parâmetros experimentais
$k_1'$	Parâmetro para prever uma correção no dano de fadiga
PBT	Peso bruto total
PBTC	Peso bruto total combinado
PI	Pressão de inflação de pneu
$z$	Profundidade de análise em polegadas
GWT	Profundidade do nível d'água (ft)
$\epsilon_0, \rho, \beta$	Propriedades do material
%RF	Relação entre a tensão aplicada no ensaio e a resistência à tração na flexão do material
SR	Relação entre a tensão aplicada no ensaio e a resistência à tração na flexão do material aos 28 dias
RC	Relação entre a variação da carga e a carga padrão
$T$	Temperatura do material em °F
$\tau$	Tensão cisalhante
$\sigma_d$	Tensão desvio
$\sigma_t$	Tensão de tração
$\sigma$	Tensão normal
$\sigma_r$	Tensão radial
$\sigma_\theta$	Tensão tangencial
$V_{asf}$	Teor de asfalto em volume na camada asfáltica
$W_c$	Teor de umidade (%)
$FC_{bottom}$	Trincamento da base para o topo; Trincamento do topo para a base, ft/miles
UFIR	Unidade de Referência Fiscal
$\Delta l$	Variação do comprimento l
$\Delta d$	Variação do comprimento d

$\langle N \rangle^t$	Vetor coluna com as funções de interpolação
$\{F\}^{(e)}$	Vetor das forças nodais aplicadas no elemento
$\{F_n\}$	Vetor de cargas nodais concentradas
$\{d\}$	Vetor de deslocamentos global
$\{d\}^{(e)}$	Vetor de deslocamentos nodais do elemento
$\{F\}$	Vetor de forças global
$\{F_b\}$	Vetor de forças nodais equivalentes devido as forças de massa ( $c$ )
$\{F_s\}$	Vetor de forças nodais equivalentes devido as forças distribuídas ( $\rho$ )
$N_{lab}$	Vida de fadiga em laboratório
$V_{ar}$	Volume de vazios com ar na camada asfáltica
$V$	Volume do elemento
$V_a$	Volume de vazios (%)



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1. OBJETIVO .....	20
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	20
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
2.1. MECÂNICA DOS PAVIMENTOS .....	22
2.1.1. Pavimento .....	23
2.1.2. Pavimento Flexível .....	24
2.1.3. Defeitos Estruturais de um Pavimento Flexível .....	26
2.1.3.1. Trincamento por fadiga .....	26
2.1.2.3. Afundamento em trilha de roda .....	35
2.2. LIMITES DE CARGA E LEGISLAÇÃO .....	41
2.3. FUNDAMENTOS DA TEORIA DA ELASTICIDADE .....	45
2.3.1. Notação para forças e tensões .....	45
2.3.2. Componentes de tensões .....	46
2.3.3. Componentes de deformações .....	47
2.3.4. Estado plano de tensões e estado plano de deformações .....	49
2.3.5. Lei de Hooke .....	49
2.4. RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS .....	53
2.4.1. Tensões, Deformações e Deslocamentos .....	54
2.4.2. Módulo de Elasticidade ou Módulo de Resiliência .....	55
2.4.3. Coeficiente de Poisson .....	58
2.4.4. Comportamento elástico e comportamento plástico dos materiais .....	58
<b>3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS</b> .....	60
3.1. ETAPAS PARA A FORMULAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....	61
3.2.1. Etapa 1: Discretização do Domínio .....	61
3.1.2. Etapa 2: Selecionar as funções de interpolação .....	62
3.1.3. Etapa 3: Formular a matriz das propriedades dos elementos .....	64
3.1.4. Etapa 4: Resolver os sistema de equações .....	66
<b>4. DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTRUTURAIS</b> .....	67

4.1. <i>MODELO ESTRUTURAL (ME)</i> .....	67
4.1.1. Modelo Estrutural I (ME I).....	68
4.1.2. Modelo Estrutural II (ME II).....	69
4.1.3. Modelo Estrutural III (ME III) .....	72
4.2. <i>ANSYS</i> .....	73
4.2.1. Construção do Modelo Estrutural no Software Ansys .....	74
4.3. <i>ANÁLISE DOS DANOS NO PAVIMENTO</i> .....	89
<b>5. RESULTADOS</b> .....	91
5.1. <i>RESULTADOS OBTIDOS PARA O MODELO ESTRUTURAL I</i> .....	91
5.1.1. Análise da Fadiga .....	92
5.1.2. Análise da Deformação Permanente.....	93
5.2. <i>RESULTADOS OBTIDOS PARA O MODELO ESTRUTURAL II</i> .....	95
5.2.1. Análise da Fadiga .....	97
5.2.2. Análise da Deformação Permanente.....	100
5.3. <i>RESULTADOS OBTIDOS PARA O MODELO ESTRUTURAL III</i> .....	102
5.3.1. Análise da Fadiga .....	103
5.3.2. Análise da Deformação permanente.....	105
5.4. <i>ANÁLISE GERAL DA FADIGA</i> .....	107
5.4.1. Comparando os Modelos Estruturais I e II.....	107
5.4.2. Comparando os Modelos Estruturais I e III.....	108
5.5. <i>ANÁLISE GERAL DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE</i> .....	109
5.5.1. Comparando os Modelos Estruturais I e II.....	109
5.5.2. Comparando os Modelos Estruturais I e III.....	110
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	112
6.1. <i>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</i> .....	113
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	114

## 1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário tem papel fundamental no desenvolvimento social e econômico mundial e especialmente no Brasil sua importância é indiscutível, pois mais da metade das cargas são transportadas através das rodovias. Segundo Medina e Motta (2005) as rodovias transportam 60% da carga e 96% dos passageiros no país.

Apesar da importância do modal rodoviário para o desenvolvimento sócio-econômico do país, o Brasil possui apenas uma pequena parcela (cerca de 10%) de rodovias pavimentadas, sendo que em países desenvolvidos este número varia entre 50 e 80%. A falta de pavimentação, muitas vezes, dificulta o escoamento da produção, podendo atrasar o desenvolvimento de regiões onde as estradas ainda são de terra.

Observa-se que os bens produzidos no país podem ser mais competitivos na fase de produção, mas perdem competitividade, notadamente, no quesito infra-estrutura de transportes, devido a uma matriz modal deficiente, onde as estradas encontram-se em estado tal que não são capazes de atender as necessidades de transportes de carga nacionais. Essa realidade nos torna pouco competitivos no mercado exterior e cria uma situação econômica nacional insustentável (BERNUCCI, *et. al*, 2006).

Além de o país possuir apenas 10% de rodovias pavimentadas, devemos considerar que boa parte destas encontram-se em péssimo estado de conservação, com deteriorações acentuadas, podendo resultar em um aumento do custo operacional e até mesmo em acidentes, pois para que o modal rodoviário exerça seu papel fundamental que é o de permitir o transporte de cargas e passageiros de maneira segura, confortável e econômica é necessário que as estradas, principalmente as pavimentadas estejam em boas condições de tráfego.

Segundo dados da Pesquisa Rodoviária 2007 realizada pela CNT (Confederação Nacional do Transporte) onde foram avaliados 87.592 km de rodovias brasileiras, 45,5% (39.815 km) foram classificados como ótimo ou bom e 54,5% (47.777 km) classificados como regular, ruim e péssimo. Pode-se perceber que os dados apresentados são preocupantes, já que a maior parte da malha rodoviária pavimentada é deficiente.

Para que os pavimentos permaneçam em boas condições de tráfego, são necessários, além de um bom projeto estrutural, que ao longo dos anos sejam feitas intervenções corretivas e preventivas, evitando assim, o aumento das deteriorações e conseqüentemente a perda da serventia do pavimento.

As intervenções de caráter corretivo e preventivo são formas de otimizar a vida útil do pavimento e os gastos com infra-estrutura rodoviária, pois uma das justificativas para a falta de manutenção das estradas é o custo elevado e a falta de recursos financeiros. A CNT estima, que de imediato seria necessário um investimento de R\$ 23,6 bilhões para que o sistema rodoviário atinja padrões satisfatórios de segurança e desempenho e cerca de R\$ 1,34 bilhão por ano para a correta manutenção da malha.

A degradação dos pavimentos é causada principalmente pelo tráfego, que se caracteriza pela passagem dos veículos sobre o pavimento e suas respectivas cargas e pelos fatores ambientais, que são a precipitação atmosférica e a radiação solar.

Para alguns autores, os danos causados pelo tráfego são bem mais expressivos do que os danos causados pelos demais fatores, principalmente pelo fato de que, com grande frequência, veículos trafegam nas rodovias com excesso de carga, o que, segundo Medina e Motta (2005) têm como consequência a degradação acelerada dos pavimentos e a sobrecarga de pontes e viadutos.

O Brasil, atualmente, sofre de um problema crônico no que diz respeito ao controle da sobrecarga nas rodovias, faltam postos de pesagem e muitos deles estão sucateados e sem condições de funcionamento. Segundo informações do DNIT (Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, 2008) existem 131 postos de pesagem em toda a extensão da malha rodoviária federal, dos quais 22 estão inoperantes, 04 em operacionalização, 10 paralisados e 01 projeto não concluído.

Os efeitos do tráfego e o excesso de carga de alguns veículos são a principal causa de dois dos danos mais conhecidos do pavimento asfáltico: o Trincamento por Fadiga e o Afundamento em Trilha de Roda. Ambos estão entre os tipos mais importantes de defeitos que são levados em consideração quando verificada a necessidade ou não de intervenções de restauração.

Paralelo a isso, o Método de Elementos Finitos (MEF) tem sido muito utilizado nas engenharias para a análise das tensões, deformações e deslocamentos nas mais diversas estruturas. No caso de análises na estrutura de pavimentos, o MEF possibilita a obtenção das tensões e deformações devido ao tráfego, possibilitando uma análise mais precisa das causas de danos como a fadiga e a deformação permanente.

Muitos modelos matemáticos a serem resolvidos através do MEF são demasiadamente complexos, no passado, a resolução de métodos numéricos como o MEF eram feitas através da programação computacional, mas com o avanço da tecnologia, novos softwares foram sendo desenvolvidos para facilitar a implementação dos mais complexos modelos

matemáticos. Um poderoso software, muito utilizado em análises de estruturas e que possui seu código algoritmos baseado no MEF é o software *ANSYS*, conhecido pela sua versatilidade e robustez, este software é um exemplo de que a tecnologia pode contribuir de forma significativa para melhorar os projetos das mais variadas estruturas e auxiliar no dimensionamento de pavimentos.

### **1.1. OBJETIVO**

O presente estudo tem como objetivo avaliar, através da modelagem matemática, os impactos dos carregamentos oriundos do tráfego no comportamento estrutural dos pavimentos flexíveis, considerando dois dos principais defeitos estruturais: o trincamento por fadiga e o afundamento em trilha de roda através do Método de Elementos Finitos, utilizando como ferramenta o *Software ANSYS*.

### **1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: Introduz o tema da pesquisa enfatizando a importância do modal rodoviário, sua situação atual, os principais defeitos estruturais causados pela sobrecarga e a necessidade de haver um controle rígido no que diz respeito ao excesso de carga nas rodovias, fixa o objetivo da pesquisa e as ferramentas para alcançá-lo.

Capítulo 2: Apresenta os principais conceitos que servem com subsídio para a pesquisa e também para uma melhor compreensão da mecânica dos pavimentos, além de trazer os principais pontos do Código de Trânsito Brasileiro sobre as regulamentações do transporte de cargas.

Capítulo 3: São apresentados os fundamentos do Método de Elementos Finitos, fundamental na realização das análises estruturais realizadas pelo *Software ANSYS*.

Capítulo 4: Apresenta a metodologia utilizada para a realização da pesquisa, ou seja, os recursos utilizados para a construção do modelo estrutural e sua respectiva análise.

Capítulo 5: Traz os resultados obtidos nesta pesquisa através das diversas análises estruturais realizadas.

Capítulo 6: Apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, encontra-se o embasamento teórico necessário para conhecer o objeto de estudo bem como os principais conceitos relacionados a ele, a fim de dar suporte às próximas etapas da pesquisa.

### 2.1. MECÂNICA DOS PAVIMENTOS

A Mecânica dos Pavimentos, apesar de ser um grande avanço no que diz respeito ao estudo da pavimentação, ainda é pouco utilizada no dimensionamento de rodovias, predominando os processos empíricos. Seu grande potencial se dá pelo fato de que ela estuda o pavimento como um sistema em camadas, sujeitos a cargas do tráfego e às influências climáticas, possibilitando o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos gerados no interior do pavimento, o que facilita a verificação das causas que levam à ruptura do mesmo.

Logo, limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento, por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes, é o objetivo da mecânica dos pavimentos (MEDINA, 1997).

O comportamento dos materiais utilizados na estrutura de um pavimento é governado pelos parâmetros que correlacionam as tensões atuantes com as deformações resilientes, sendo eles o módulo resiliente e o coeficiente de Poisson (FRANCO, 2000).

O módulo resiliente é adquirido através de ensaios de cargas repetidas, e segundo Medina e Motta (2005) o termo resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações.

Dentro da Mecânica dos Pavimentos existem diversos estudos e contribuições de importantes cientistas, como Joseph Boussinesq (1885) que desenvolveu uma solução geral para vários tipos de carregamentos do meio semi-infinito, linear, elástico, homogêneo e isotrópico submetido a um carregamento pontual e Donald Burmister (1943, 1945) que desenvolveu a teoria do sistema de duas camadas, a primeira sendo o pavimento e a segunda semi-infinita (subleito), logo depois estendeu sua teoria para o sistema de três camadas

elásticas, resolvendo problemas que se apresentavam nos cálculos de fundações e de pavimentos de aeródromos. Boussinesq e Burmister são apenas dois exemplos de grandes estudiosos entre outros que contribuíram para o avanço da mecânica dos pavimentos.

### **2.1.1. Pavimento**

Pavimento é um sistema composto por múltiplas camadas de diferentes espessuras, projetadas especialmente para suportarem os esforços oriundos do tráfego e as ações climáticas.

Estes esforços oriundos do tráfego são caracterizados pelos vários tipos de cargas a diferentes níveis de repetição, sendo umas das maiores dificuldades no dimensionamento de pavimentos, já que é muito difícil conseguir prever a evolução do tráfego ao longo do tempo. Segundo Yoder (1975), entre os fatores mais importantes a serem avaliados em um projeto estrutural de rodovias são os efeitos dos tipos de veículos, espaçamentos entre os pneus, carga por pneu, pressão de inflação dos pneus e o volume de tráfego previsto para um determinado período de tempo. E, as ações climáticas caracterizam-se pelas precipitações atmosféricas e a radiação solar.

Todo o pavimento é construído após a preparação do terreno, para isso, pode ser necessária a realização de terraplanagens ou escavações de forma que o terreno possa ficar mais plano, assegurando ao futuro tráfego mais comodidade, segurança e economia.

Segundo Medina e Motta (2005), historicamente, o objetivo da pavimentação de estradas e ruas é melhorar as estradas de terra, protegendo-as da ação da água, do desprendimento de poeira e pedras, enfim, tornando-as mais cômodas e seguras ao tráfego e mais duráveis. Além disso, proporciona aos usuários uma redução no custo operacional dos veículos, que dependem muito do estado em que se encontra a superfície do pavimento.

Os pavimentos podem ser classificados quanto a sua deformabilidade. Dividem-se em duas categorias que diferem entre si pelos materiais utilizados no revestimento. São eles os Pavimentos Rígidos (constituídos de placas de cimento Portland) e os Pavimentos Flexíveis (constituídos por um revestimento betuminoso). Para alguns autores como Medina e Motta existe ainda uma terceira categoria, os pavimentos semi-rígidos, formados por uma base cimentada e um revestimento betuminoso.

Segundo Balbo (2007), a principal diferença entre um pavimento flexível e um pavimento rígido é a forma como cada qual distribui os esforços sobre si aplicados no



subleito, ou seja, quando uma carga atua sobre um pavimento flexível, as tensões impostas a esta estrutura agem de forma muito concentrada nas proximidades do ponto de aplicação desta carga. Já em pavimentos rígidos, as tensões impostas pela carga são distribuídas em toda a extensão da placa, diminuindo as pressões sobre o subleito.

A estrutura básica de um pavimento é distribuída da seguinte maneira: subleito, sub-base, base e revestimento. No caso de um pavimento rígido, os objetivos do revestimento e da base são preenchidos ao mesmo tempo pelas placas de concreto. A espessura e os materiais utilizados nas respectivas camadas dependem do método de dimensionamento adotado.

Para garantir comodidade e segurança aos seus usuários, é preciso manter o pavimento em bom estado, para isso são necessárias manutenções a fim de que a degradações causadas pelo tráfego e pelas ações do clima não se tornem deformações permanentes difíceis de ser recuperadas, pois as obras de pavimentação custam milhões aos cofres públicos e por isso a sua vida útil deve ser otimizada.

### **2.1.2. Pavimento Flexível**

Um pavimento é dito flexível quando possui um revestimento betuminoso sobre uma base granular.

Em 1870, foi construído o primeiro pavimento com revestimento betuminoso em Newark, New Jersey (EUA), por intermédio do químico belga E. J. DeSmedt; em Washington (D.C.) se executava pela primeira vez o revestimento betuminoso do tipo *sheet asphalt* com material asfáltico importado de lago (Asphalt Institute, 1973) (BALBO, 2007).

No Brasil, a primeira obra de expressivo porte foi realizada durante o século XX, na construção da estrada Caminho do Mar de São Paulo a Cubatão, nela foi empregada misturas asfálticas em sua maior extensão.

De acordo com Medina e Motta (2005), o surto dos pavimentos asfálticos deu-se quando do desenvolvimento da indústria de refinação do petróleo, a partir de 1950, pois o resíduo asfáltico passava a ser abundante.

Ainda hoje, a maioria dos projetos de pavimentação são executados utilizando-se misturas asfálticas. Além das rodovias e ruas asfaltadas, ainda são considerados pavimentos flexíveis os calçamentos, alvenaria poliédrica e os paralelepípedos.

Um pavimento flexível é estruturado geralmente da seguinte forma: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento, conforme mostrado na Figura 1. Cada camada

possui uma ou mais funções específicas, que devem proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte e rolamento (BALBO, 2007).

Podemos descrever as camadas que compõem um pavimento flexível da seguinte forma:

Subleito: terreno de fundação constituído de material consolidado e compactado.

Reforço do subleito: como o próprio nome já diz, serve para reforçar o terreno de fundação a fim de que o subleito receba pressões de menor magnitude.

Sub-base: camada complementar à base. Quando a camada de base é muito espessa, ela é dividida em duas partes por razões de ordem econômica e construtiva.

Base: camada projetada para resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego, aliviando as pressões sobre as camadas inferiores.

Revestimento: camada considerada a mais nobre, deve ser tanto quanto possível impermeável, é ela que recebe diretamente a ação do tráfego dos veículos e destina-se a melhorar as condições de rolamento e a resistir aos esforços horizontais atuantes.

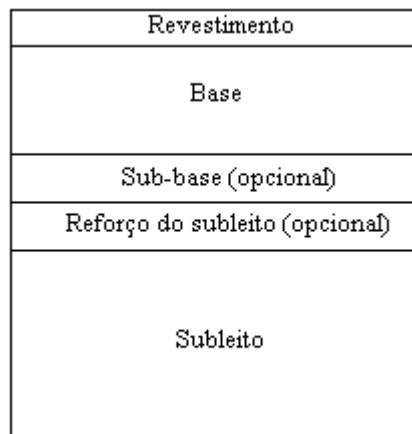


Figura 1 – Composição de um pavimento flexível

As passagens repetidas das cargas dos veículos produzem a flexão da camada do revestimento betuminoso ou asfáltico, gerando trincas, geralmente na parte inferior do revestimento propagando-se até a superfície. Estes e outros defeitos serão explicitados na seção que segue.

### **2.1.3. Defeitos Estruturais de um Pavimento Flexível**

O defeito estrutural tem como causa principal as ações do tráfego e suas respectivas cargas ao longo dos anos. Surge quando o pavimento já não possui mais o desempenho estrutural adequado, ou seja, começam a haver falhas significativas como trincas e afundamentos, provocando deformações que podem ser recuperáveis ou permanentes.

A identificação do tipo de defeito estrutural é de fundamental importância no processo de restauração, pois desta forma é possível verificar o melhor procedimento a ser utilizado na reabilitação da serventia do pavimento. As trincas, por exemplo, quando chegam à superfície permitem uma maior penetração de água e umidade na estrutura, causando maiores danos.

Nos pavimentos flexíveis, os danos de maior intensidade e mais comuns oriundos do tráfego são o trincamento por fadiga e o afundamento em trilha de roda, ambos comprometedores do desempenho estrutural.

Deve-se considerar também, que apesar das cargas dos veículos serem a principal causa das deformações nos pavimentos, outros fatores devem ser considerados ao realizar uma análise estrutural, como: as espessuras das camadas (adequadas ou não), a qualidade dos materiais, os processos de construção e restauração e as condições climáticas.

#### **2.1.3.1. Trincamento por fadiga**

O fenômeno da fadiga relaciona-se ao fato de que muitos materiais, sendo sucessivamente solicitados em níveis de tensão inferiores àqueles de ruptura (para dado modo de solicitação), pouco a pouco desenvolvem alterações em sua estrutura interna, que resultam na perda de características estruturais originais. Isso gera um processo de microfissuração progressiva que culmina no desenvolvimento de fraturas e, conseqüentemente, no rompimento do material (BALBO, 2007).

Pode-se dizer que o trincamento por fadiga dos materiais de pavimentação é causado diretamente pelas solicitações do tráfego, mas nesse caso, apenas uma única aplicação de determinada carga não causa deformação suficiente para levar o pavimento à ruptura, ou seja, o que o levará a ruptura são as sucessivas aplicações desta carga e o acúmulo das tensões (inferiores à ruptura do material) e deformações causadas por ela.

O trincamento por fadiga tanto pode iniciar nas fibras inferiores da camada do revestimento asfáltico, propagando-se por toda a espessura até o surgimento das trincas na

superfície, quanto pode iniciar pelo topo da camada do revestimento asfáltico, devido ao surgimento de tensões críticas na fibra superior da camada, agravadas pelo enrijecimento ocasionado pelo envelhecimento, dependendo também da espessura da camada (FRANCO, 2000).

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) apresenta a relação para o trincamento de misturas betuminosas, do tipo:

$$N_f = k.(\varepsilon_t)^{-n} \quad (1)$$

Onde:

$N_f$  = número de repetições devidas ao carregamento até o início do trincamento por fadiga;

$\varepsilon_t$  = deformação específica máxima de tração ocorrente na mistura betuminosa sob a ação do carregamento;

$k$ ,  $n$  = constantes que dependem principalmente da rigidez e do teor de asfalto da mistura betuminosa (obtidos em laboratório).

A Figura 2 mostra a superfície de um pavimento com ruptura por fadiga.



Figura 2 – Trincamento por fadiga

Franco (2007) apresenta em sua tese de doutorado alguns dos principais modelos de fadiga de pavimentos asfálticos, são eles:

#### Modelo da Shell Oil

Shook *et al.* (1982 *apud* Huang, 1993) apresentaram um modelo que hoje é conhecido como modelo da Shell. No modelo originalmente desenvolvido para o método de 1978, os autores substituíram o módulo de rigidez pelo módulo dinâmico. Além desta substituição,

eliminaram o parâmetro teor de asfalto como variável de entrada, generalizando ainda mais a forma do modelo. As alterações resultaram na Equação (2).

$$N_f = 0,0685 \cdot \varepsilon_t^{-5,671} \cdot |E^*|^{-2,363} \quad (2)$$

Onde:

$N_f$  é o número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;

$\varepsilon_t$  é a deformação específica máxima de tração;

$|E^*|$  é o módulo dinâmico da mistura asfáltica, em psi.

Os dados utilizados para o desenvolvimento foram obtidos de ensaios de flexão repetida de vigotas à deformação controlada. Como o modelo é parte de um método de dimensionamento, acredita-se que esteja calibrado para as condições específicas do método da Shell.

#### Instituto do Asfalto (MS-1)

O modelo apresentado na Equação (3) faz parte do manual de dimensionamento de pavimentos de rodovias e ruas do Instituto do Asfalto dos Estados Unidos – MS-1, de 1969 e reeditado pela nona vez em 1991.

$$N_f = 18,4 \cdot C \cdot [4,325 \cdot 10^{-3} (\varepsilon_t)^{-3,291} \cdot |E^*|^{-0,854}] \quad (3)$$

Onde:

$$C = 10^M$$

$$M = 4,84 \cdot \left( \frac{V_{asf}}{V_{ar} + V_{asf}} - 0,69 \right)$$

$V_{asf}$  é o teor de asfalto em volume na camada asfáltica;

$V_{ar}$  é o volume de vazios com ar na camada asfáltica;

$N_f$  é o número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;

$\varepsilon_t$  é a deformação específica de tração da camada asfáltica;

$|E^*|$  é o módulo dinâmico da camada asfáltica, em psi.

Esta lei de fadiga foi obtida a partir de um conjunto de dados obtidos de ensaios de laboratório realizados à tensão controlada em flexão repetida e calibrada com dados de seções selecionadas da AASHTO Road Test. O fator 18,4 na equação pode ser entendido como fator de calibração campo-laboratório que permite estimar o número mínimo de repetições de carga de eixo simples equivalente de 80kN para que o pavimento acumule um dano equivalente a uma área trincada por fadiga de pelo menos 20% em relação à área total (Asphalt Institute, 1982).

### Modelo do Guia de Projeto da AASHTO

O modelo utilizado no Guia de Projeto da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (NCHRP - National Cooperative Highway Research Program, 2004) é baseado no modelo do Instituto do Asfalto, mas com uma nova calibração dos coeficientes determinada por otimização numérica e por outros modos de comparação de dados.

O modelo final obtido e utilizado no Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004) é o expresso na Equação (4).

$$N_f = 0,00432.k_1'.C.\left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492}\left(\frac{1}{|E^*|}\right)^{1,281} \quad (4)$$

Onde:

$$C = 10^M$$

$$M = 4,84.\left(\frac{V_{asf}}{V_{ar} + V_{asf}} - 0,69\right)$$

$V_{asf}$  é o teor de asfalto em volume na camada asfáltica;

$V_{ar}$  é o volume de vazios com ar na camada asfáltica;

$N_f$  é o número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;

$\varepsilon_t$  é a deformação específica de tração da camada asfáltica; e

$|E^*|$  é o módulo dinâmico da camada asfáltica, em psi.

O parâmetro  $k_1'$  foi inserido no modelo para prever uma correção no dano de fadiga devido ao efeito da espessura da camada asfáltica. O parâmetro  $k_1'$  pode ser obtido por meio

das expressões (5) e (6) dependendo se o tipo de fadiga ocorre da base da camada para o topo ou do topo para a base (trincamento longitudinal), respectivamente.

Para o trincamento da base para o topo:

$$k_1' = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 \cdot hac)}}} \quad (5)$$

Para o trincamento do topo para a base:

$$k_1' = \frac{1}{0,0001 + \frac{29,844}{1 + e^{(30,544 - 5,7357 \cdot hac)}}} \quad (6)$$

Onde: *hac* é a espessura total da camada asfáltica.

As duas previsões são realizadas concomitantemente, desde que ocorram tensões de tração nos pontos críticos no período de análise para o carregamento selecionado.

O Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004) ainda desenvolveu modelos que estimam a área trincada a partir do dano de fadiga calculado. As funções de transferência, como os modelos foram chamados, estão apresentados nas Equações (7) e (8).

Para o trincamento da base para o topo:

$$FC_{bottom} = \left( \frac{6000}{1 + e^{(C_1' + C_2' \cdot \log_{10}(D \cdot 100))}} \right) \left( \frac{1}{60} \right) \quad (7)$$

Onde:

$FC_{bottom}$  é o trincamento da base para o topo, %;

$D$  é o dano da fadiga da base para o topo;

$C_1' = -2 \cdot C_2'$ ,  $C_2' = -2,40874 \cdot (1 + hac)^{-2,856}$

Para o trincamento do topo para a base:

$$FC_{bottom} = \left( \frac{1000}{1 + e^{(2,8-1,4 \cdot \log_{10}(D \cdot 100))}} \right) \cdot (10,56) \quad (8)$$

Onde:

$FC_{bottom}$  é o trincamento do topo para a base, ft/miles;

$D$  é o dano da fadiga do topo para a base;

A calibração dos modelos de fadiga foi realizada com base em informações e dados de observação ao longo do tempo de 82 trechos experimentais localizados em 24 estados americanos e canadenses. A maioria dos trechos avaliados pertence ao programa LTPP - Long Term Pavement Performance - de instrumentação e acompanhamento de diversas seções de rodovias americanas que produz um banco de dados bastante amplo de informações sobre as propriedades e performance dos pavimentos.

#### Modelo de Pinto (1991)

Pinto (1991) sugeriu uma lei de previsão de vida de fadiga baseada em uma análise de 82 pontos de ensaios de fadiga à tensão controlada de seis misturas asfálticas, a 25°C. O método de ensaio utilizado foi o de compressão diametral, com aplicação de 60 pulsos de carga por minuto e 0,14 segundos de duração da aplicação da carga repetida.

O modelo desenvolvido por Pinto (1991), que fornece o número de aplicações de carga necessário para a ruptura do corpo-de-prova, está apresentado na Equação (9).

$$N_{lab} = 9,07 \cdot 10^{-9} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{2,65} \cdot \left( \frac{1}{M_R} \right)^{-0,033} \quad (9)$$

Onde:

$N_{lab}$  é a vida de fadiga em laboratórios

$\varepsilon_t$  é a deformação específica de tração;

$M_R$  é o módulo de resiliência da mistura asfáltica em kgf/cm<sup>2</sup>

Pinto (1991) realizou a calibração do seu modelo com base em observações e análises do comportamento no campo de trechos da rodovia BR-101. O autor citado definiu curvas para estimar os valores mínimos e máximos do fator campo-laboratório para o seu modelo,



associados à deformação específica inicial e às diferenças de tensões no revestimento dos trechos da rodovia analisados. Atualmente, diversos órgãos e institutos de pesquisa vêm utilizando o coeficiente  $f_{cl}$  igual a  $10^4$  como fator campo-laboratório para esse modelo, que corresponde a cerca de 20% da área trincada do pavimento a uma temperatura de 54°C e em termos da variação da tensão, segundo Pinto (1991).

### Modelos para materiais estabilizados quimicamente

O desempenho de um pavimento semi-rígido é fortemente condicionado pelo trincamento por fadiga da base estabilizada quimicamente.

Segundo Medina (1997), a vida de fadiga de misturas cimentadas ( $N_f$ ) pode se correlacionar com as tensões ou deformações de tração ( $y$ ) por meio dos modelos  $y = N_f^b$  ou  $y = a + b \cdot \log N_f^b$ . A fadiga pode ser correlacionada também com a densidade de energia de deformação em que se busca eliminar a dependência direcional das deformações ou tensões, utilizando-se os invariantes de tensões.

Segundo Rodrigues (1998) os estudos para definição de um critério de ruptura levam a recomendação de que se deve limitar a deformação de tração sob a camada cimentada. Esse parâmetro explica melhor o trincamento por fadiga do que a tensão de tração.

Rodrigues (1998) cita o modelo desenvolvido a partir de ensaios de laboratório realizados por Pretorius em 1970 em um material cimentado com solo do tipo A-1-0 não plástico. O modelo apresentado na Equação (10) é também citado por Ayres (1997) e Franco (2000) como modelo log-log do Corpo dos Engenheiros do Exército Norte-Americano (USACE), e utilizados no programas AYMA e PAVE.

$$N_f = \left( \frac{142}{\varepsilon_t} \right)^{20.3} \quad (10)$$

Onde:

$N_f$  é o número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;

$\varepsilon_t$  é a deformação de tração no fundo da camada cimentada ( $\times 10^{-6}$ ).

Ayres (1997) e Franco (2000) utilizam mais dois modelos em seus programas, além do modelo apresentado anteriormente. São eles: o modelo semilog da USACE, representado na

Equação (11), e o desenvolvido por Thompson (1986 *apud* Ayres, 1997), que é apresentado na Equação (12). Esse modelo também utilizado no Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004) com novos fatores de calibração.

$$N_f = 10^{(9,110 - 0,0578 \cdot \varepsilon_t)} \quad (11)$$

$$N_f = 10^{\left(\frac{0,972 - \sigma_t / M_R}{0,0825}\right)} \quad (12)$$

Onde:

$N_f$  é o número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;

$M_R$  é o módulo de resiliência da camada cimentada;

$\sigma_t$  é a tensão de tração.

Ceratti (1991) obteve curvas de fadiga para seis misturas diferentes de solo cimento ensaiadas com modo de carregamento à flexão. As curvas de fadiga são expressas segundo as Equações (13) e (14).

$$\%RF = a + b \cdot \log(N_f) \quad (13)$$

$$\varepsilon_t = a + b \cdot \log(N_f) \quad (14)$$

Onde:

$\%RF$  é a relação entre a tensão aplicada no ensaio e a resistência à tração na flexão do material;

$\varepsilon_t$  é a deformação inicial de tração imposta ao material;

$a$  e  $b$  são parâmetros experimentais.

Trichês (1994) apresentou um método para dimensionamento de pavimentos semi-rígidos que contenham camada de concreto compactado a rolo (CCR). Nesta pesquisa, o autor desenvolveu modelos de comportamento à fadiga para misturas de CCR com consumo de

cimento na faixa de 60 a 120 kg/m<sup>3</sup>. Os modelos, que caracterizam duas condições de deterioração, estão apresentados nas Equações (15) a (18).

Aparecimento de fissuras de 2,5 mm de profundidade na face tracionada:

$$N_f = 10^{(15,082-15,753.SR)} \text{ probabilidade de 50\% para a ruptura} \quad (15)$$

$$N_f = 10^{(14,306-15,753.SR)} \text{ probabilidade de 95\% para a ruptura} \quad (16)$$

Ruptura total da camada:

$$N_f = 10^{(14,911-15,074.SR)} \text{ probabilidade de 95\% para a ruptura} \quad (17)$$

$$N_f = 10^{(14,222-15,074.SR)} \text{ probabilidade de 95\% para a ruptura} \quad (18)$$

Onde:

$SR$  é a relação entre a tensão aplicada no ensaio e a resistência à tração na flexão do material aos 28 dias;

$N_f$  é o número de repetições de carga que levam à ruptura por fadiga.

#### Modelo do MEPDG

O MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) também possui um modelo de fadiga para pavimentos asfálticos, o qual é apresentado nas seguintes Equações:

$$N_f = Ck_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \left( \frac{1}{E} \right)^{k_3} \quad (19)$$

$$C = 10^M \quad (20)$$

$$M = 4,84 \left( \frac{V_b}{V_a - V_b} - 0,69 \right) \quad (21)$$

Onde:

$N_f$  é o número de repetições de carga para atingir o trincamento por fadiga;

$\varepsilon_t$  é a deformação de tração no revestimento;

$E$  é o módulo de rigidez do material;

$k_1, k_2, k_3$  são coeficientes de regressão obtidos em laboratório;

$C$  é o fator de ajuste de campo

$V_a$  é o volume de vazios (%).

$V_b$  é o efetivo teor de ligante (%).

### 2.1.2.3. Afundamento em trilha de roda

Os afundamentos em trilha de roda são uma das principais deformações permanentes ocorridas em pavimentos flexíveis.

Tal tipo de processo ocorrerá com maior ou menor participação de cada camada da estrutura do pavimento. Essa condição de ruptura está bastante associada à ruptura funcional, ou seja, à perda de qualidade de rolamento, sendo mais evidenciada em situações onde há baixa resistência de camadas inferiores (critério do CBR - California Bearing Ratio) ou, ainda, quando o fluxo de veículos comerciais (ônibus e caminhões) é muito canalizado em faixas de rolamento estreitas (comum em vias urbanas segregadas) que empregam materiais dúcteis como revestimento (BALBO, 2007).

Os carregamentos do tráfego contribuem para a formação das trilhas de roda de diversas maneiras, como:

- Quando as pressões causadas pelas cargas repetidas no pavimento acumulam pequenas deformações ao longo dos anos e acabam causando o afundamento nas trilhas de rodas.
- Quando as cargas aplicadas ao pavimento produzem esforços suficientes para causar cisalhamento, provocando deslizamentos no interior do pavimento.
- Quando cargas estáticas permanecem por longos períodos sobre materiais de comportamento viscoso.

Este tipo de deformação é considerada de natureza viscoplástica, pois, ainda segundo Balbo (2007), as misturas asfálticas, além de apresentarem comportamento elastoplástico (a deformação sofrida tem duas componentes, uma de natureza elástica e outra de natureza plástica), possuem também comportamento viscoelástico, isto é, apresentam deformações elásticas dependentes do tempo de aplicação de carga. A deformação plástica encontra-se atrelada exatamente à deformação viscosa (elástica).

Os afundamentos em trilhas de roda (Figura 3) também podem causar muitos prejuízos, pois afeta a dinâmica das cargas, diminui a qualidade de rolamento, aumenta o custo operacional dos veículos e podem ocasionar acidentes, principalmente pelo acúmulo de água em dias de chuva.

A seguir, serão apresentados os principais modelos de previsão de afundamento em trilhas de roda para vários tipos de materiais utilizados nas obras de pavimentação asfálticas, explicitados por Franco (2007).



Figura 3 – Afundamento em trilha de roda

### Materiais granulares

Ayres (1997) e Franco (2000) utilizaram em seus programas de avaliação de pavimentos o método que estima a deformação permanente usando um modelo mecanístico-empírico desenvolvido por Tseng e Lytton (1989). A deformação permanente de trilha de roda é estimada de acordo com o modelo da Equação (22).

$$\delta_a(N) = \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left( \frac{\rho}{N_f} \right)^\beta} \cdot \varepsilon_v \cdot h \quad (22)$$

Onde:

$\delta_a(N)$  é a deformação permanente da camada;

$N_f$  é o Número de repetições de carga;

$h$  é a espessura da camada granular;

$\varepsilon_0$ ,  $\rho$  e  $\beta$  são propriedades dos materiais;

$\varepsilon_r$  é a deformação específica resiliente imposta nos ensaios de laboratório para se obter os parâmetros  $\varepsilon_0$ ,  $\rho$  e  $\beta$  ;

$\varepsilon_v$  é a deformação específica vertical média resiliente.

Os coeficientes  $\rho$  e  $\beta$  e a relação  $\varepsilon_0/\varepsilon_r$  são parâmetros dos materiais obtidos a partir de ensaios de deformação permanente. A estimativa desses parâmetros é realizada por meio de outros modelos complexos (Franco, 2000), em função do estado de tensões, do módulo de resiliência e da umidade dos materiais.

O modelo utilizado no Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004) baseou-se no mesmo modelo desenvolvido por Tseng e Lytton (1989), mas com modificações para se conseguir uma calibração satisfatória com os dados de acompanhamento de trechos. Além da introdução do fator de calibração  $\beta_{GB}$  igual a 2,2, as mudanças permitiram eliminar o termo referente à tensão no modelo e modificar as equações para as formas apresentadas a seguir, que permitem estimar os coeficientes  $\rho$  e  $\beta$  e a relação  $\varepsilon_0/\varepsilon_r$  .

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638.W_c \quad (23)$$

$$\log \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = \frac{(e^{(\rho)^\beta} \cdot a_1 M_R^{b_1}) + (e^{(\rho/10^7)^\beta} \cdot a_7 M_R^{b_7})}{2} \quad (24)$$

$$C_0 = \ln \left[ \frac{(a_1 M_R^{b_1})}{(a_7 M_R^{b_7})} \right] \quad (25)$$

$$\rho = 10^7 \cdot \left[ \frac{C_0}{1 - (10^7)^\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (26)$$

$$W_c = 51,712 \cdot \left[ \left( \frac{M_R}{2555} \right)^{0.64} \right]^{-0.3586.GWT^{0.1192}} \quad (27)$$

Onde:

$W_c$  é o teor de umidade (%);

$M_R$  é o Módulo de resiliência do material (psi);

$GWT$  é a profundidade do nível d'água (ft);

$a_1 = 1,0942 \cdot 10^{-18}$ ;  $b_1 = 3,520049$ ;

$a_7 = 0,03162278$ ; e  $b_7 = 0,5$ .

E o modelo final calibrado é apresentado na expressão (26) com  $R^2 = 0,6235$ ;  $N=387$ ;  
 $Se = 0,014in$ ;  $Se/Sy = 0,519$ , é:

$$\delta_\alpha(N) = 2,2 \cdot \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) \cdot e^{-\left( \frac{\rho}{N_f} \right)^\beta} \cdot \epsilon_v \cdot h \quad (28)$$

### Misturas asfálticas

O modelo de deformação permanente de misturas asfálticas utilizado pelo Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004) é uma relação constitutiva baseada em dados de ensaios triaxiais de carga repetida calibrados com dados de observações de campo analisados estatisticamente. O modelo escolhido pelo Guia, apresentado na Equação (29), foi baseado na extensa pesquisa conduzida por Leahy (1989) e Ayres (1997) e foi parcialmente calibrado com dados de campo obtidos de 88 seções do LTPP localizadas em 28 estados americanos.

$$\frac{\epsilon_\rho}{\epsilon_r} = k_1 \cdot 10^{-3,51108} T^{1,5606} N_f^{0,479244} \quad (29)$$

Onde:

$\epsilon_\rho$  é a deformação permanente na n-ésima repetição de carga;

$\epsilon_r$  é a deformação específica resiliente como função das propriedades da mistura, temperatura e frequência de carregamento;

$N_f$  é o Número de repetições de carga;

$T$  é a Temperatura do material em °F.

O fator  $K$  é função da espessura da camada asfáltica e da profundidade do ponto de análise e foi introduzido para promover uma previsão mais acurada possível do afundamento de trilha de roda. A sua determinação foi obtida por meio de ensaios realizados em trincheiras

em seções da Pesquisa de acompanhamento de trechos de pavimentos do Departamento de Transportes do estado de Minnesota (MnRoad).

$$K = (C_1 + C_2 \cdot z) \cdot 0,328196^z \quad (30)$$

$$C_1 = -0,1039 \cdot H_{ac}^2 + 2,4868 \cdot H_{ac} - 17,342 \quad (31)$$

$$C_2 = 0,0172 \cdot H_{ac}^2 - 1,7331 \cdot H_{ac} + 27,428$$

Onde:

$H_{ac}$  é a espessura da camada asfáltica em polegadas;

$z$  é a profundidade de análise em polegadas.

### Subleito

Os programas de análises de pavimentos de Ayres (1997) e Franco (2000) utilizam o mesmo modelo de Tseng e Lyton (1989), diferenciando-se apenas nas equações de determinação dos coeficientes  $\rho$  e  $\beta$  e a relação  $\epsilon_0/\epsilon_r$  que são específicas para materiais de subleito.

O Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004) utiliza para solos finos o mesmo modelo modificado para materiais granulares citado no item anterior. A diferença está no fator de calibração  $\beta_{SG}$  que é igual a 8,0. O modelo para material do subleito é o apresentado na Equação (32).

$$\delta_\alpha(N) = 8,0 \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) \cdot e^{-\left( \frac{\rho}{N_f} \right)^\beta} \cdot \epsilon_v \cdot h \quad (32)$$

Onde:

$$R^2 = 0,1908 ; N=387 ; Se = 0,056in ; Se/Sy = 0,92 .$$

A análise da deformação permanente para o subleito deve ser abordada de uma forma diferente das análises realizadas para as camadas do pavimento, pois no método de dimensionamento adotado, o subleito é considerado como sendo uma camada de profundidade infinita.



Ayres (1997) desenvolveu um método aproximado para determinar a deformação permanente do subleito a partir das deformações específicas permanentes no topo do subleito e a 15 cm de profundidade.

A partir de diversos resultados, Ayres (1997) verificou que a deformação específica permanente ao longo do subleito vai reduzindo exponencialmente, segundo a relação apresentada na Equação (33).

$$\varepsilon_{\rho}(z) = \varepsilon_{\rho}(z=0) \cdot e^{-k \cdot z} \quad (33)$$

Onde:

$\varepsilon_{\rho}(z=0)$  é a deformação específica permanente no topo do subleito;

$\varepsilon_{\rho}(z)$  é a deformação específica permanente na profundidade  $z$ ;

$z$  é a profundidade medida a partir do topo do subleito, em pol;

$$k = \frac{1}{6} \cdot \ln \left( \frac{\varepsilon_{\rho, z=0}}{\varepsilon_{\rho, z=6''}} \right)$$

Assim, Aires (1997), em seu programa AYMA, calcula a deformação permanente do subleito do pavimento pela seguinte relação:

$$\delta_{SL} = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\rho}(z) \cdot dz = \frac{1}{k} \cdot \varepsilon_{\rho}(z=0) \quad (34)$$

Monismith e Brown (1999) apresenta também o modelo utilizado pelo método de dimensionamento do Laboratoire Central des Ponts et Chaussées da França, Equação (35), para estimar a deformação vertical limite no topo do subleito.

$$N_f = 2,227 \cdot 10^{-9} \cdot \varepsilon_c^{-4,505} \quad (35)$$

Papagiannakis e Masad (2008) traz o modelo de dimensionamento para estimar a deformação vertical limite no topo do subleito do Asphalt Institute, Equação (36).

$$N_f = 1,365 \cdot 10^{-9} \cdot \varepsilon_c^{-4,477} \quad (36)$$

Onde:

$N_f$  é o número de repetições de carga para atingir a deformação permanente;

$\varepsilon_c$  é a deformação de compressão no topo do subleito.

Os modelos do Laboratoire Central des Ponts et Chaussées da França e do Asphalt Institute utilizam a mesma lei de evolução utilizada pelo método da Shell Oil, porém com outros valores para os parâmetros “A” e “B”. Elas estão apresentadas de forma desenvolvida, ou seja “ $N_f$ ” em função de “ $\varepsilon_c$ ”.

## ***2.2. LIMITES DE CARGA E LEGISLAÇÃO***

A Lei que instituiu o Código de Trânsito Brasileiro foi sancionada no dia 23 de setembro de 1997 e entrou em vigor em 22 de janeiro de 1998, com o objetivo de ordenar as relações e regras de trânsito no país (DENATRAN, 2009).

Para este trabalho, os artigos do Código de Trânsito Brasileiro de maior importância são aqueles que regem o transporte rodoviário de cargas, sendo eles:

Art. 99. Somente poderá transitar pelas vias terrestres o veículo cujo peso e dimensões atenderem aos limites estabelecidos pelo CONTRAN.

§ 1º O excesso de peso será aferido por equipamento de pesagem ou pela verificação de documento fiscal, na forma estabelecida pelo CONTRAN.

§ 2º Será tolerado um percentual sobre os limites de peso bruto total e peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias, quando aferido por equipamento, na forma estabelecida pelo CONTRAN.

§ 3º Os equipamentos fixos ou móveis utilizados na pesagem de veículos serão aferidos de acordo com a metodologia e na periodicidade estabelecidas pelo CONTRAN, ouvido o órgão ou entidade de metrologia legal.

Art. 100. Nenhum veículo ou combinação de veículos poderá transitar com lotação de passageiros, com peso bruto total, ou com peso bruto total combinado com peso por eixo, superior ao fixado pelo fabricante, nem ultrapassar a capacidade máxima de tração da unidade tratora.

Parágrafo único. O CONTRAN regulamentará o uso de pneus extralargos, definindo seus limites de peso.

Art. 117. Os veículos de transporte de carga e os coletivos de passageiros deverão conter, em local facilmente visível, a inscrição indicativa de sua tara, do peso bruto total (PBT), do peso bruto total combinado (PBTC) ou capacidade máxima de tração (CMT) e de sua lotação, vedado o uso em desacordo com sua classificação.

Art. 209. Transportar, sem autorização, bloqueio viário com ou sem sinalização ou dispositivos auxiliares, deixar de adentrar as áreas destinadas à pesagem de veículos ou evadir-se para não efetuar o pagamento do pedágio.

Art. 231. Transitar com o veículo:

IV - com suas dimensões ou de sua carga superiores aos limites estabelecidos legalmente ou pela sinalização, sem autorização:

V - com excesso de peso, admitido percentual de tolerância quando aferido por equipamento, na forma a ser estabelecida pelo CONTRAN:

Art. 257. As penalidades serão impostas ao condutor, ao proprietário do veículo, ao embarcador e ao transportador, salvo os casos de descumprimento de obrigações e deveres impostos a pessoas físicas ou jurídicas expressamente mencionadas neste Código.

§ 5º O transportador é o responsável pela infração relativa ao transporte de carga com excesso de peso nos eixos ou quando a carga proveniente de mais de um embarcador ultrapassar o peso bruto total.

§ 6º O transportador e o embarcador são solidariamente responsáveis pela infração relativa ao excesso de peso bruto total, se o peso declarado na nota fiscal, fatura ou manifesto for superior ao limite legal.

Art. 275. O transbordo da carga com peso excedente é condição para que o veículo possa prosseguir viagem e será efetuado às expensas do proprietário do veículo, sem prejuízo da multa aplicável.

Parágrafo único. Não sendo possível desde logo atender ao disposto neste artigo, o veículo será recolhido ao depósito, sendo liberado após sanada a irregularidade e pagas as despesas de remoção e estada.

Art. 278. Ao condutor que se evadir da fiscalização, não submetendo veículo à pesagem obrigatória nos pontos de pesagem, fixos ou móveis, será aplicada a penalidade prevista no art. 209, além da obrigação de retornar ao ponto de evasão para fim de pesagem obrigatória.

Parágrafo único. No caso de fuga do condutor à ação policial, a apreensão do veículo dar-se-á tão logo seja localizado, aplicando-se, além das penalidades em que incorre, as estabelecidas no art. 210.

Art. 327. A partir da publicação deste Código, somente poderão ser fabricados e licenciados veículos que obedeçam aos limites de peso e dimensões fixados na forma desta Lei, ressalvados os que vierem a ser regulamentados pelo CONTRAN.

Considera-se excesso de peso de um veículo, quando este veículo transitando em uma rodovia transmitir ao pavimento, através de seus pneumáticos uma massa maior do que aquela prevista no projeto de pavimentação adotado para a respectiva rodovia.

O fato de alguns veículos transitarem nas rodovias com excesso de peso é bastante preocupante, pois leis deixam de serem cumpridas, os danos causados ao pavimento aumentam e a segurança dos usuários fica comprometida.

O Código de Trânsito Brasileiro ainda instituiu algumas resoluções com o propósito de facilitar a interpretação e a execução da nova Lei. Dentre estas resoluções, destacam-se:

Resolução CONTRAN Nº 12/98 (DENATRAN, 2009) – Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem em vias terrestres.

Art. 2º Os limites máximos de peso bruto total e peso bruto transmitido por eixo de veículo, nas superfícies das vias públicas, são os seguintes:

I – peso bruto total por unidade ou combinações de veículos: 45t;

II – peso bruto por eixo isolados: 10t;

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

IV – peso bruto por conjunto de dois eixos não em tandem, quando a distância entre os dois planos verticais, que contenham os centros das rodas for superior a 1,20m e inferior ou igual a 2,40m: 15t;

V – peso bruto por conjunto de três eixos em tandem, aplicável somente a semi reboque, quando a distância entre os três planos verticais, que contenham os centros das rodas, for superior a 1,20 m e inferior ou igual a 2,40 m: 25,5t;

VI – peso bruto por conjunto de dois eixos, sendo um dotado de quatro pneumáticos e outro de dois pneumáticos interligados por suspensão especial, quando a distância entre os dois planos verticais que contenham os centros das rodas for:

a) inferior ou igual a 1,20m: 9t;

b) superior a 1,20m e inferior ou igual a 2,40m: 13,5t.

§ 1º Considerar-se-ão eixos *em tandem* dois ou mais eixos que constituam um conjunto integral de suspensão, podendo qualquer deles ser ou não motriz.

Resolução CONTRAN Nº 102/99 (DENATRAN, 2009) – Dispõe sobre a tolerância máxima de 7,5% sobre os limites do peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias públicas.

Resolução CONTRAN N° 104/99 (DENATRAN, 2009) – Dispõe sobre a tolerância máxima de peso bruto de veículos e estabelece o critério de PBT para aplicação de multas.

Resolução CONTRAN N° 114/00 (DENATRAN, 2009) – Autoriza uma tolerância de 5% sobre o peso bruto declarado na nota fiscal.

O CONTRAN instituiu também a resolução N° 62/98 que regulamenta o uso de pneus extralargos em eixo tandem de semi-reboques e reboques dotados de suspensão pneumática.

Os pneus extralargos são uma amostra evidente do avanço da tecnologia desenvolvida para melhorar os lucros do transporte rodoviário. A idéia dos pneus extralargos é a de substituir dois pneus num eixo com rodado duplo por um só em cada lado, capaz de suportar a mesma carga. Estes pneus prometem alguns benefícios aos seus usuários, como redução na tara de composição (diminuição do peso, pois se elimina dois costados de pneus do rodado duplo) e economia de combustível (o pneu apresenta uma área de contato menor com o pavimento e em conseqüência disto precisa de menos energia para girar). O que ainda não se sabe com precisão é que tipo de impacto tem estes pneus sobre a estrutura do pavimento, se esta substituição de dois para apenas um pneu diminui ou aumenta a degradação do pavimento.

O Código de Trânsito Brasileiro ainda está em fase de aperfeiçoamento, mas vem sendo considerado uma agressão às obras de pavimentação, já que a tolerância máxima de 7,5% sobre o limite máximo do peso bruto transmitido por eixo é considerada excessiva. A decisão sobre a tolerância máxima decorreu de negociações ente Governo e caminhoneiros após uma paralisação da categoria em julho de 1999. Se pelo lado técnico não há estudos que embasem esta decisão, pelo lado prático do uso das rodovias pelos caminhoneiros, esta decisão é justificada pelo fato de que o transporte rodoviário deixou de ser uma atividade muito lucrativa, e este peso a mais pode ser uma forma de melhorar o ganho do frete.

Todavia, considerando que esta tolerância de 7,5% caracteriza sim a sobrecarga do veículo e, em conseqüência disto, a sobrecarga também do pavimento, tem-se então o aumento da degradação asfáltica, trazendo maior custo para a manutenção das rodovias e quem paga este prejuízo acaba sendo a sociedade como um todo, inclusive os próprios caminhoneiros.

### 2.3. FUNDAMENTOS DA TEORIA DA ELASTICIDADE

A Teoria da Elasticidade estuda as tensões, deformações e deslocamentos de um corpo elástico causados por ações de forças externas. Essas tensões, deformações e deslocamentos são analisados considerando as hipóteses da teoria clássica, que são:

- A matéria de um corpo é distribuída continuamente, assim, as tensões, deformações e deslocamentos são contínuos;
- A matéria é homogênea (mesmas propriedades físicas para quaisquer elementos retirados de qualquer parte do corpo) e isotrópica (as propriedades físicas são as mesmas em todas as direções).

Este tópico toma como base Timoshenko e Goodier (1970).

#### 2.3.1. Notação para forças e tensões

As forças externas que atuam sobre um corpo elástico, normalmente são classificadas em dois tipos: as forças de superfície, que são distribuídas sobre a superfície de um corpo, como a pressão de um corpo sobre o outro ou pressão hidrostática; e as forças de massa, que são forças distribuídas sobre o volume de um corpo, tal como as forças gravitacionais, forças magnéticas, ou o caso de um corpo em movimento e forças de inércia. As forças de superfície por unidade de área são decompostas em três componentes, que são  $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ . A força de massa por unidade de volume também possuem três componentes, de notação  $X, Y, Z$  (Timoshenko e Goodier, 1970).

As letras  $\sigma$  e  $\tau$  são usadas para denotar, respectivamente, tensão normal e tensão cisalhante, sendo que para indicar a direção do plano onde a tensão está atuando, estas mesmas letras são usadas de forma subscrita. Assim, considerando um elemento cúbico muito pequeno num ponto P, com as faces paralelas aos eixos coordenados, as notações para as componentes da tensão atuante nas faces deste elemento e as direções tomadas como positivas são as indicadas na Figura 4.

Por exemplo, nas faces do elemento que são perpendiculares ao eixo  $y$ , as componentes da tensão normal atuantes são denotadas por  $\sigma_y$ , sendo que a letra subscrita  $y$

indica que a tensão está atuando num plano normal ao eixo  $y$ . A tensão normal é considerada positiva quando produzir tração, e negativa quando produzir compressão.

A tensão cisalhante é decomposta em duas componentes paralelas aos outros dois eixos coordenados. Nesse caso, são usadas duas letras subscritas, a primeira indica a direção da normal ao plano considerado e a segunda indica a direção da componente da tensão. As direções positivas das componentes da tensão cisalhante em qualquer face do elemento cúbico são tomadas como as direções positivas dos eixos coordenados se uma tensão de tração da mesma face tiver o sentido correspondente. Se a tensão de tração tiver direção oposta, as direções positivas das componentes da tensão de cisalhamento deverão ser invertidas.

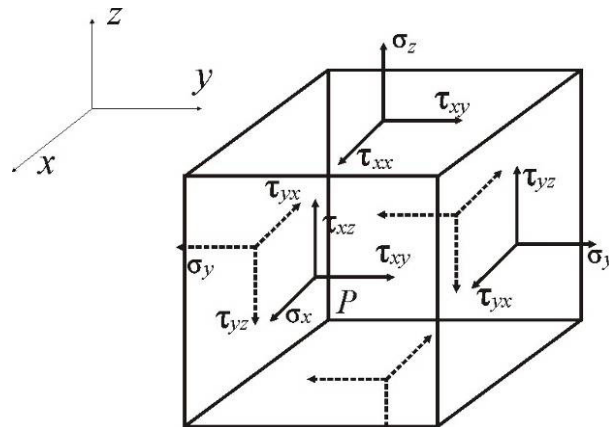


Figura 4 - Elemento cúbico sujeito a tensões nas faces

### 2.3.2. Componentes de tensões

Para cada par de faces paralelas de um elemento cúbico, como na Figura 4, tem-se uma componente de tensão normal e duas componentes de tensão cisalhante. Assim, para representar as tensões atuantes nas seis faces de um elemento cúbico temos as componentes  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  para indicar as tensões normais, e as componentes  $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$  para indicar as tensões cisalhantes.

Quando não houver momento corporal, pode-se provar que somente três das seis componentes de tensões de cisalhamento são independentes. Portanto, para duas faces perpendiculares de um elemento cúbico, as componentes da tensão de cisalhamento perpendiculares à linha de intersecção destas faces são iguais (Figura 5):

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad \tau_{zy} = \tau_{yz}$$

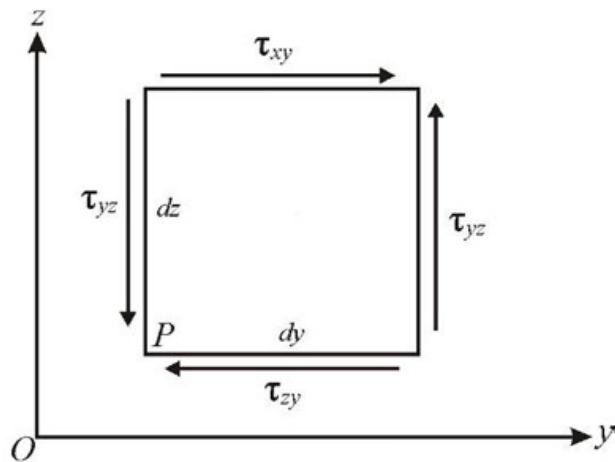


Figura 5 - Tensões em uma das faces do elemento cúbico

### 2.3.3. Componentes de deformações

Em um corpo elástico, presume-se que nenhum deslocamento de partículas deste corpo seja possível sem que haja uma deformação do mesmo.

Considera-se um pequeno elemento  $dx \, dy \, dz$  de um corpo elástico (Figura 6). Se este corpo sofre uma deformação e, sendo  $u$ ,  $v$  e  $w$  as componentes do deslocamento do ponto  $O$  e paralelas aos eixos coordenados  $x, y, z$  respectivamente, o deslocamento linear do ponto  $A$  na direção  $x$  é dado por:

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \quad (37)$$

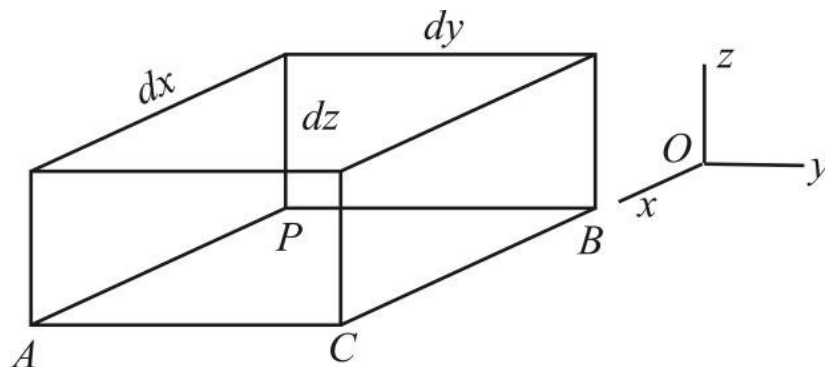


Figura 6 - Pequeno elemento  $dx \, dy \, dz$  de um corpo elástico



Através da Figura 7, é possível observar os demais deslocamentos ocorridos no elemento, sendo eles:

Deslocamento linear do ponto B na direção  $y$  :  $v + \frac{\partial v}{\partial y} dy$ ;

Deslocamento angular do ponto A na direção  $y$  :  $v + \frac{\partial v}{\partial x} dx$ ;

Deslocamento angular do ponto B na direção  $x$  :  $u + \frac{\partial u}{\partial y} dy$ ;

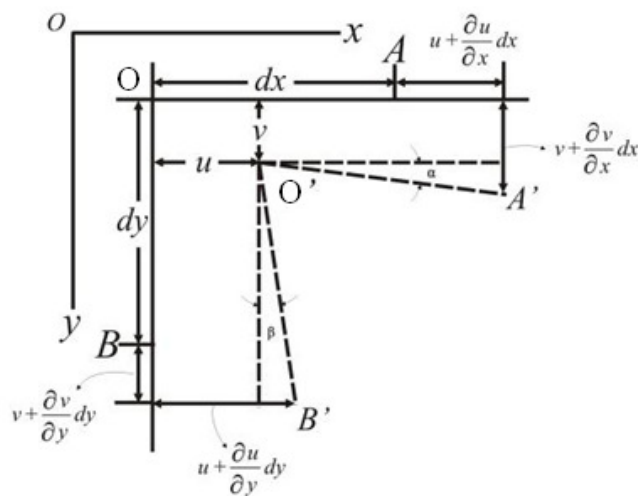


Figura 7 - Deformações no plano  $xy$

Observa-se ainda na Figura 7, que os alongamentos unitários ou deformações lineares unitárias no ponto P, são  $\frac{\partial u}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial v}{\partial y}$  e  $\frac{\partial w}{\partial z}$  nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente.

O ângulo AOB também sofreu uma redução  $\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$  chamada deformação angular.

Usando a letra  $\varepsilon$  para representar o alongamento unitário ou deformação normal e a letra  $\gamma$  para a deformação angular e ainda usando os mesmo índices das componentes de tensão para indicar as direções têm-se as componentes de deformação:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}, & \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, & \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad (38)$$

### 2.3.4. Estado plano de tensões e estado plano de deformações

Por vezes, o meio contínuo elástico pode ser modelado utilizando apenas duas coordenadas espaciais definidoras de um plano. Esse é o caso do estado plano de tensões e do estado plano de deformações, considerados aqui nas coordenadas  $x$  e  $y$  (SORIANO, 2003).

Desta forma, em um modelo bidimensional, como é o caso dos modelos utilizados neste trabalho, o estado de tensão é especificado pelas componentes  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ , as quais não variam com a espessura e pode ser definido pelas seguintes condições:

$$\begin{cases} \sigma_x \neq 0, \sigma_y \neq 0, \sigma_z = 0 \\ \tau_{xy} \neq 0, \tau_{xz} = 0, \tau_{yz} = 0 \end{cases} \quad (39)$$

Em um domínio  $V$  de espessura  $t$ .

Já o estado plano de deformações é representado pelas componentes  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  e  $\gamma_{xy}$ , as quais não variam ao longo do comprimento e pode ser definido pelas seguintes condições:

$$\begin{cases} \varepsilon_x \neq 0, \varepsilon_y \neq 0, \varepsilon_z = 0 \\ \gamma_{xy} \neq 0, \gamma_{xz} = 0, \gamma_{yz} = 0 \end{cases} \quad (40)$$

Em um domínio  $V$  de espessura unitária representativa do sólido.

Assim, o problema de deformação plana, como o problema de tensão plana, reduz-se à determinação do  $\sigma_x, \sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  como funções de  $x$  e  $y$  somente. E, através da lei de Hooke, as componentes de deformação se relacionam com as componentes de tensão, conforme apresentado a seguir.

### 2.3.5. Lei de Hooke

As componentes de tensão e as componentes de deformação se relacionam entre si através da Lei de Hooke.

Por exemplo, no ensaio de tração, tem-se um alongamento unitário na direção  $x$  da forma:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (41)$$

Este alongamento na direção  $x$  é acompanhado das seguintes contrações laterais em  $y$  e  $z$ :

$$\varepsilon_y = -\mu \frac{\sigma_x}{E} \quad \varepsilon_z = -\mu \frac{\sigma_x}{E} \quad (42)$$

Onde  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\mu$  é o coeficiente de Poisson.

Tem-se ainda, a relação entre as deformações angulares e as tensões cisalhantes dadas em função de  $E$  e  $\mu$ :

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (43)$$

Sendo  $G$  o módulo de elasticidade transversal ou módulo de cisalhamento e dado por:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (44)$$

E no caso do estado plano de tensões e material isótropo, tem-se:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{xy} \end{cases} \quad (45)$$

Onde  $E$  e  $\mu$  são, respectivamente, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, propriedades do material.

### 2.3.6. Equações Diferenciais de Equilíbrio

A Figura 8 representa um pequeno bloco retangular em equilíbrio com espessura unitária e arestas  $h$  e  $k$ . As tensões que atuam nas faces 1, 2, 3 e 4 e seus sentidos positivos estão indicados na Figura 8.

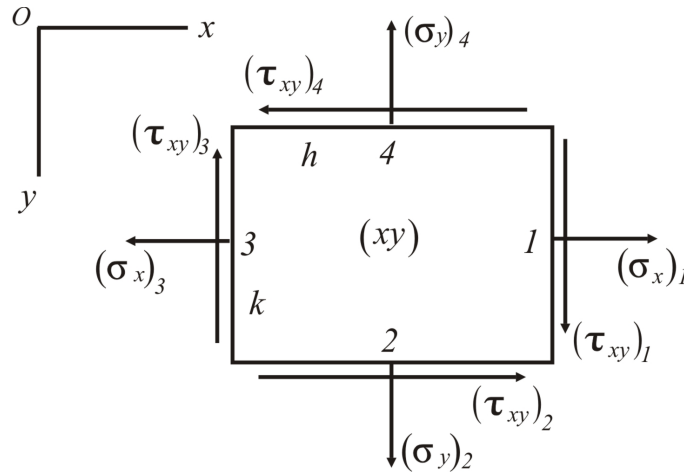


Figura 8 – Tensões em um bloco retangular

Se  $X$  e  $Y$  são denotadas as componentes da força de massa por unidade de volume, a equação de equilíbrio para as forças na direção  $x$  é:

$$(\sigma_x)_1 k - (\sigma_x)_3 k + (\tau_{xy})_2 h - (\tau_{xy})_4 h + Xhk = 0 \quad (46)$$

Ou, dividindo por  $hk$ :

$$\frac{(\sigma_x)_1 - (\sigma_x)_3}{h} + \frac{(\tau_{xy})_2 - (\tau_{xy})_4}{k} + X = 0 \quad (47)$$

Agora, se o bloco fica cada vez menor, ou seja,  $h \rightarrow 0$  e  $k \rightarrow 0$  tem-se os seguintes limites pela definição de derivada:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \left[ \frac{(\sigma_x)_1 - (\sigma_x)_3}{h} \right] = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \quad (48)$$

$$\lim_{k \rightarrow 0} \left[ \frac{(\tau_{xy})_2 - (\tau_{xy})_4}{k} \right] = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}$$

As equações de equilíbrio para as forças na direção  $y$  podem ser obtidas da mesma maneira:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + Y &= 0\end{aligned}\tag{49}$$

Em aplicações práticas, o peso do corpo é a única força de massa. Então, tomando o eixo  $Y$  na direção para baixo e chamando  $\rho$  a massa por unidade de volume do sólido, tem-se:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \rho g &= 0\end{aligned}\tag{50}$$

Sendo estas as equações diferenciais de equilíbrio para problemas bidimensionais.

### 2.3.7. Condições de Contorno

As Equações (49) e (50) devem ser satisfeitas em todos os pontos do volume do corpo. Os componentes de tensão variam ao longo do volume da placa, e quando chega-se ao contorno, é preciso que estas tensões estejam em equilíbrio com as forças externas, de modo que as forças externas possam ser consideradas uma continuação da distribuição das tensões internas. Tomando o pequeno prisma retangular  $OBC$  (Figura 9), de modo que o lado  $BC$  coincida com o limite da placa, como mostrado na Figura 10, e denotado por  $\bar{X}$  e  $\bar{Y}$  as componentes da forças de superfície por unidade de área neste ponto do contorno, tem-se:

$$\begin{aligned}\bar{X} &= l\sigma_x + m\tau_{xy} \\ \bar{Y} &= m\sigma_y + l\tau_{xy}\end{aligned}\tag{51}$$

Onde  $l$  e  $m$  são os cossenos diretores da normal  $N$  ao contorno. As Equações (51) representam as condições de contorno a serem consideradas.

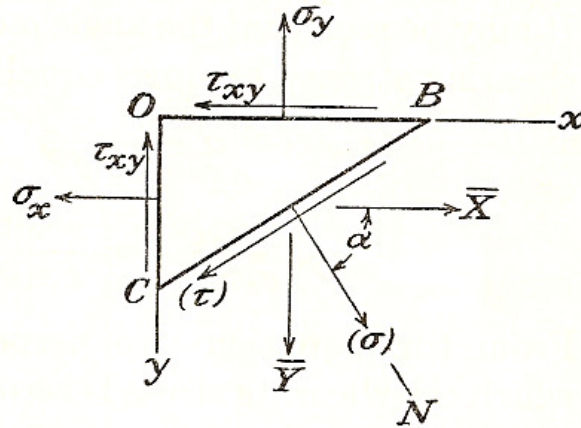


Figura 9 – Pequeno prisma retangular

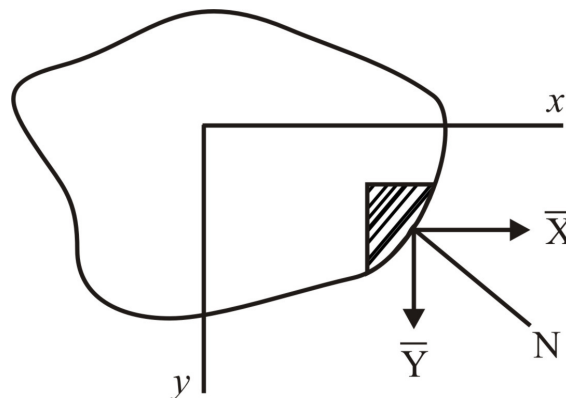


Figura 10 – Tensões no contorno

#### 2.4. RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Segundo Balbo (2007), a resistência de um material diz respeito à medida do valor da força ou pressão que causa sua ruptura, ou seja, que impõe um nível de deformação de ruptura do material.

Para realizar a análise da resistência de uma estrutura, é necessário conhecer e considerar o estado de tensões e deformações atuantes.

### 2.4.1. Tensões, Deformações e Deslocamentos

Considerando a análise da seguinte barra (Figura 11):

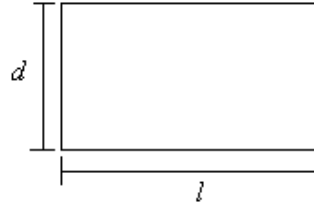


Figura 11 – Barra qualquer

Quando esta barra é submetida a uma força axial  $F$ , ela sofre uma variação de comprimento em suas dimensões (Figura 12):

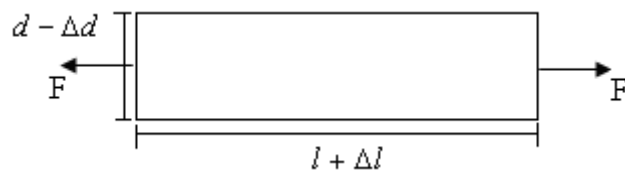


Figura 12 – Barra submetida a uma força  $F$

Logo, define-se por tensão normal, o quociente entre a força  $F$  e a área  $A$  onde esta está sendo aplicada :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (52)$$

E, define-se como deformação normal, o quociente entre a variação do comprimento e o comprimento inicial:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \quad \varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d} \quad (53)$$

Quando duas forças  $F$  e  $F'$  são aplicadas em uma barra, na direção transversal, ocorre um tipo diferente de tensão, que chamamos de tensão de cisalhamento:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (54)$$

Onde  $A$  é a área da seção transversal.

### 2.4.2. Módulo de Elasticidade ou Módulo de Resiliência

O módulo de elasticidade ou o módulo de resiliência é a capacidade de o material não resguardar deformações depois de cessada a ação da carga. São as constantes elásticas empregadas habitualmente na formalização de análises de sistemas de camadas, como os pavimentos.

É sabido que a maioria dos materiais de pavimentação não são elásticos, no entanto, se a carga aplicada é pequena em comparação com a resistência do material e esta é repetida em um grande número de vezes, a deformação em cada repetição de carga é quase que totalmente recuperável e pode ser considerada elástica (HUANG, 2004).

O módulo resiliente dos materiais de pavimentação é determinado normalmente de duas maneiras: em laboratório ou em campo. Experimentalmente, o módulo resiliente é determinado pela relação entre a tensão aplicada ( $\sigma$ ) e a respectiva deformação ( $\varepsilon$ ) sofrida:

$$M_R = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad (55)$$

Segundo Medina e Motta (2005) é importante ressaltar que o módulo de resiliência de misturas asfálticas tem influência marcante do tipo de ligante asfáltico e da granulometria dos agregados, tendo uma influência menor do teor de ligante.

A Figura 13 mostra as formas de ensaios para medidas de módulos resilientes de materiais.

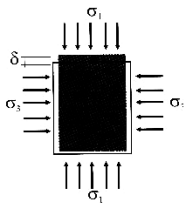
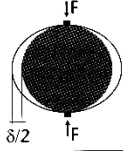

ENSAIO	ESQUEMA DO ENSAIO	APLICAÇÕES
Compressão		Solos Britas graduadas Misturas Solo-agregado SMC SB SCA (módulo de resiliência)
Tração indireta		BGTC CA SC SMC (resistência, módulo de resiliência e fadiga)
Tração na flexão		CA CCR CCP (resistência, módulo de resiliência e fadiga)

Figura 13 – Ensaio para medidas de módulos resilientes

Fonte: Balbo, 2007



Os ensaios para medidas de módulos resilientes mais conhecidos são o Ensaio triaxial dinâmico (ou de cargas repetidas – confinamento) e o Ensaio de compressão diametral (tração indireta), conhecido também como Brazilian Test.

Nos ensaios de cargas repetidas, a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de um valor zero a um máximo, voltando a anular-se ou atingir um valor mínimo definido para voltar a atuar após pequeno intervalo de repouso (fração de segundo), de maneira a reproduzir as condições de campo.

Defini-se módulo de resiliência, no ensaio triaxial dinâmico:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (56)$$

Onde:

$\sigma_d$  é a tensão desvio ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )

$$\varepsilon_r \text{ é a deformação resiliente axial (vertical): } \varepsilon_r = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (57)$$

Onde:

$\Delta h$  é o deslocamento vertical máximo

$h_0$  é a altura inicial de referência do corpo-de-prova cilíndrico.

No ensaio triaxial, pode-se verificar que a cada aplicação da tensão desvio, a deformação axial tem uma parcela pequena de natureza plástica ou permanente,  $\varepsilon_p$ ; então:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_r + \varepsilon_p \quad (58)$$

Na determinação do módulo de resiliência, considera-se apenas a primeira parcela,  $\varepsilon_r$ .

O Ensaio de compressão diametral consiste em um corpo-de-prova cilíndrico, coloca-se um elemento rígido de topo e outro de fundo, que garantem a distribuição, ao longo da altura da amostra, de uma força aplicada na direção diametral da amostra. É realizado o registro do deslocamento horizontal sofrido pela amostra em suas extremidades, a cada aplicação de carga, possibilitando a determinação do módulo resiliente do material, bem como de sua resistência à tração indireta.

No ensaio de compressão diametral, considera-se o estado plano de tensões e toma-se também  $\tau_{xy} = 0$ . Se  $\sigma_z = 0$ , pode-se resumir para o estado plano a deformação em x como a Lei de Hooke generalizada:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x + \mu\sigma_y) \quad (59)$$

Sendo:

$$\sigma_y = \frac{2F}{\pi dh} \left[ \frac{4d^2}{d^2 + 4x^2} - 1 \right] \quad (60)$$

$$\sigma_x = \frac{2F}{\pi dh} \left[ \frac{d^2 - 4x^2}{d^2 + 4x^2} \right]^2 \quad (61)$$

Tem-se:

$$\varepsilon_x = \frac{2F}{\pi dh E} \left[ \frac{d^4 - 8d^2 x^2 + 16x^4}{d^2 + 4x^2} + \nu \left( \frac{3d^2 + 4x^2}{d^2 + 4x^2} \right) \right] \quad (62)$$

O deslocamento total na horizontal ( $\delta$ ) é obtido pela integração ao longo do diâmetro na horizontal das deformações sofridas:

$$\delta = \int_{-d/2}^{+d/2} \varepsilon_x dx = \frac{F}{tE} \left( \frac{4}{\pi} + \mu - 1 \right) \quad (63)$$

Assim, medido o valor de  $\delta$  durante ciclos repetidos de carregamento, tem-se experimentalmente o módulo de resiliência:

$$M_R = \frac{F}{t\delta} (\mu + 0,2734) \quad (64)$$

### 2.4.3. Coeficiente de Poisson

O módulo resiliente das camadas do pavimento governa o comportamento elástico da estrutura juntamente com o coeficiente de Poisson.

O coeficiente de Poisson, cujo conhecimento é imprescindível nas análises de sistemas de camadas elásticas, é dado pela razão entre a deformação lateral ou radial e a deformação vertical, e pode ser considerado constante se estas duas direções forem principais, como no ensaio de compressão triaxial.

$$\mu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \quad (65)$$

Segundo Franco (2007), o coeficiente de Poisson das misturas asfálticas normalmente varia entre 0,15 e 0,50 e é, também, muito influenciado pela temperatura.

### 2.4.4. Comportamento elástico e comportamento plástico dos materiais

Considerando o diagrama tensão-deformação da Figura 14:

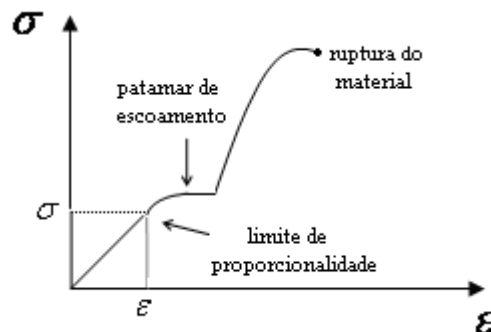


Figura 14 – Exemplo da relação entre a tensão e a deformação para uma barra de aço tracionada

No início do gráfico, a relação entre a tensão e deformação é linear, ou seja, a tensão  $\sigma$  é proporcional a deformação  $\varepsilon$ . Após um trecho, elas deixam de ser proporcionais, a deformação passa a aumentar sem que a tensão aumente, levando ao escoamento do material.

Quando o material de uma estrutura é submetido no máximo a uma tensão igual ao limite de proporcionalidade, este é dito elástico, ou seja, um material tem comportamento

elástico quando as deformações causadas por um certo carregamento desaparece quando este é retirado.

A partir de uma certa deformação, a tensão  $\sigma$  volta a aumentar com a deformação  $\varepsilon$ , sem que haja proporcionalidade entre elas. Após passar por um valor máximo, a deformação continua aumentando até levar o material a ruptura.

Se o material atingir o escoamento e se deformar, dizemos que ele sofreu uma deformação permanente ou plástica.

Para a maior parte dos materiais, a deformação plástica atingida não depende apenas da máxima tensão a que o material fica sujeito, mas depende também do tempo decorrido até a retirada do carregamento. A parcela da deformação plástica que depende da tensão é chamada deformação lenta do material, e a parcela que depende do tempo de carregamento e da temperatura é chamada fluência (BEER e JOHNSTON, 1995).

### 3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O método de elementos finitos surgiu em 1955 como a evolução da análise matricial de modelos reticulados (concebida no início a década de 1930 na indústria aeronáutica britânica), com a disponibilidade de computadores digitais e devido à necessidade de projetar estruturas de modelos contínuos. Os primeiros elementos foram concebidos por engenheiros aeronáuticos para análise de distribuição de tensões em chapas de asa de avião. Sua formulação foi tratada pioneiramente por Argyris e Kelsey em 1955 (republicada em 1960) e por Turner, Clough, Martin e Topp (1956). Assim, o computador digital e a engenharia aeronáutica são os responsáveis pela origem do método de elementos finitos (SORIANO, 2003).

O Método de Elementos Finitos é uma técnica de análise numérica para obter solução aproximada de muitos problemas em engenharia e ciências, que envolvem meios contínuos. Tem como um dos principais objetivos a determinação do estado de tensão e deformação de uma estrutura sujeita a ações exteriores.

No Método de Elementos Finitos – MEF – o meio contínuo é dividido em elementos fictícios de dimensões finitas, ligados entre si por pontos nodais que se assimilam a articulações sem atrito (MEDINA e MOTTA, 2005).

Os elementos fictícios são compostos de arestas (faces) e nós (pontos de interseção das arestas), formando o que chamamos de malha, e podem ter diferentes formas geométricas, como triângulos e quadriláteros, dependendo da espécie de problema a ser resolvido. Quanto melhor for a discretização da malha, mais próximos da solução serão os resultados obtidos. Na Figura 15 está representada uma malha de elementos quadrangulares.

Segundo Assan (2003), ao invés de buscar uma função admissível que satisfaça as condições de contorno para todo o domínio, no método de elementos finitos as funções admissíveis são definidas no domínio de cada elemento finito.

A análise estrutural pelo método de elementos finitos tem sido a principal abordagem mecanicista para a análise de pavimentos flexíveis devido a sua capacidade de incorporar modelos de caracterização de materiais para prever com maior precisão a carga de roda que induz às respostas como deformações e tensões na estrutura do pavimento (KIM, *et al*, 2009).

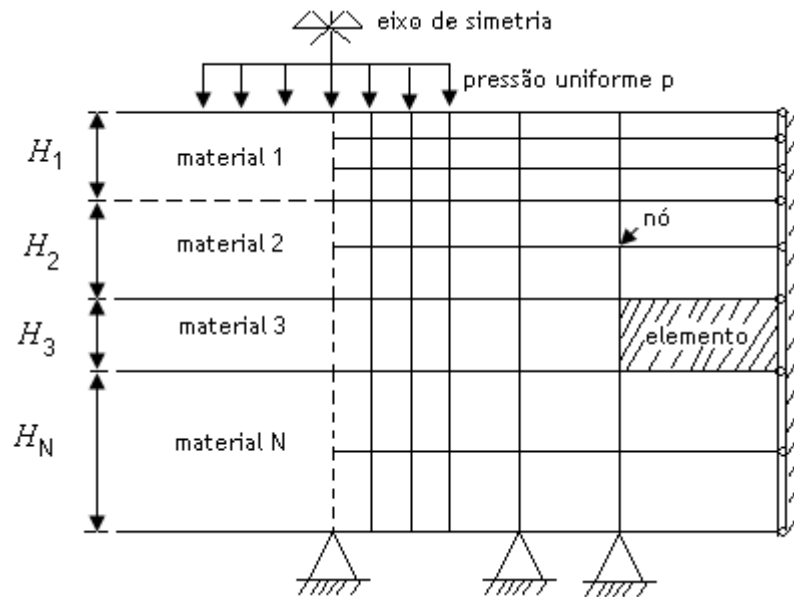


Figura 15- Configuração de elementos finitos – elemento quadrangular

Fonte: Medina e Motta, 2005

### 3.1. ETAPAS PARA A FORMULAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

#### 3.2.1. Etapa 1: Discretização do Domínio

Para iniciar a formulação pelo método de elementos finitos é preciso conhecer o problema físico a ser simulado, idealizar sua estrutura e definir o modelo de cálculo. Neste processo, é imprescindível a escolha certa do elemento a ser utilizado na construção da malha de elementos finitos.

Cada elemento e cada nó recebem uma numeração única e global. Cada elemento fica identificado por uma sequência de nós listados no sentido anti-horário. Os elementos são mapeados em elementos padronizados que usam um sistema de eixos local de coordenadas  $(\xi, \eta)$ . A relação entre o sistema de coordenadas global  $(x, y)$  e local  $(\xi, \eta)$  é dada pela matriz Jacobiana do mapeamento (SILVA, 2002).

Para problemas bidimensionais, o software Ansys utiliza o sistema de referência global e local baseado no primeiro quadrante, isto é, com o eixo  $x$  (ou  $\xi$ ) horizontal e positivo

para a direita e o eixo  $y$  (ou  $\eta$ ) vertical e positivo para cima. A Figura 16 representada a numeração local para o elemento retangular utilizando neste trabalho.

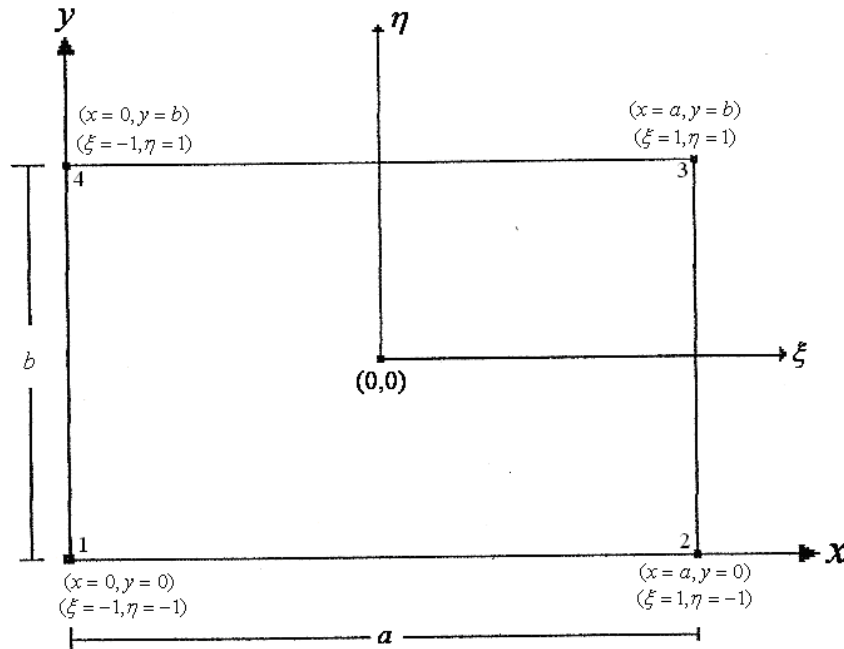


Figura 16 – Numeração local para o elemento quadrado usado neste trabalho

### 3.1.2. Etapa 2: Selecionar as funções de interpolação

As funções de interpolação são formadas por variáveis referidas aos nós do elemento (parâmetros nodais) e por funções denominadas funções de forma. Em problemas de segunda ordem bidimensionais, a correspondência entre o número de nós (que é igual ao número de termos do polinômio de aproximação) e o grau do polinômio não é única. Por exemplo, o polinômio

$$u(x, y) = c_1 + c_2x + c_3y \quad (66)$$

contém três termos linearmente independentes e é linear em  $x$  e  $y$ . Por outro lado, o polinômio

$$u(x, y) = c_1 + c_2x + c_3y + c_4xy \quad (67)$$

contém quatro termos linearmente independentes, mas também é linear em  $x$  e  $y$ . O primeiro exige um elemento com três nós, e o último, um elemento com quatro nós. Um elemento bidimensional com três nós é um triângulo com os nós nos vértices. Já, quando o número de nós é igual a quatro, pode-se escolher um triângulo com o quarto nó no centro ou um retângulo (ou quadrilátero) com os nós nos vértices, como é o caso do elemento utilizado neste trabalho.

Segundo Reddy (1984), considerando a aproximação (67) e usando um elemento retangular de lados  $a$  e  $b$  (Figura 16), podemos por conveniência, escolher um sistema de coordenadas locais  $(\xi, \eta)$  para derivar as funções de interpolação. Logo, assumimos que

$$u(\xi, \eta) = c_1 + c_2\xi + c_3\eta + c_4\xi\eta \quad (68)$$

Que requer:

$$\begin{aligned} u_1 &= u(0,0) = c_1 \\ u_2 &= u(a,0) = c_1 + c_2a \\ u_3 &= u(a,b) = c_1 + c_2a + c_3b + c_4ab \\ u_4 &= u(0,b) = c_1 + c_3b \end{aligned} \quad (69)$$

Resolvendo para  $c_i = (i = 1,2,3,4)$ , obtemos:

$$\begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & 0 & 0 \\ 1 & a & b & ab \\ 1 & 0 & b & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = \frac{1}{ab} \begin{bmatrix} ab & 0 & 0 & 0 \\ -b & b & 0 & 0 \\ -a & 0 & 0 & a \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} \quad (70)$$

Substituindo a eq. (73) na eq. (71) temos:

$$\begin{aligned} u(\xi, \eta) &= \{1 \quad \xi \quad \eta \quad \xi\eta\} \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{Bmatrix} = \{N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4\} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} \\ &= \sum_{i=1}^4 u_i N_i(\xi, \eta) \end{aligned} \quad (71)$$



Onde:

$$\begin{aligned}
 N_1(\xi, \eta) &= \left(1 - \frac{\xi}{a}\right) \left(1 - \frac{\eta}{b}\right) \\
 N_2(\xi, \eta) &= \frac{\xi}{a} \left(1 - \frac{\eta}{b}\right) \\
 N_3(\xi, \eta) &= \frac{\xi}{a} \frac{\eta}{b} \\
 N_4(\xi, \eta) &= \left(1 - \frac{\xi}{a}\right) \frac{\eta}{b}
 \end{aligned} \tag{72}$$

### 3.1.3. Etapa 3: Formular a matriz das propriedades dos elementos

A matriz das propriedades dos elementos (matriz de rigidez) representa a relação força-deslocamento, ou seja, procura-se estabelecer uma relação entre as forças externas (conhecidas) aplicadas aos nós de um elemento e os deslocamentos (desconhecidos) sofridos por estes nós. Esta relação pode ser escrita como:

$$[K]^{(e)} \{d\}^{(e)} = \{F\}^{(e)} \tag{73}$$

Onde:

$[K]^{(e)}$  é a matriz de rigidez do elemento;

$\{d\}^{(e)}$  é o vetor de deslocamentos nodais do elemento;

$\{F\}^{(e)}$  é o vetor das forças nodais aplicadas no elemento.

A formulação da matriz de rigidez pode ser obtida através de diferentes procedimentos, como: o método direto, método variacional, método dos resíduos ponderados e o método de equilíbrio de energia. Segundo Silva (2002), a formulação básica de elementos finitos pode ser encontrada na maioria dos livros textos como:

$$\int_v [B]^T [D] [B] dv \{d\}^{(e)} = c \int_v \langle N \rangle^T dv + \rho \int_A \langle N \rangle^T dA + \{F_n\} \tag{74}$$

Onde:

$$[B] \text{ é a matriz deformação-deslocamento, dada por: } [B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_4}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \end{bmatrix};$$

$[D]$  é a matriz relação constitutiva (matriz tangencial tensão-deformação), dada por:

$$\{d\tau\} = [D]\{d\varepsilon\};$$

$$\text{sendo: } \{d\tau\} = (d\tau_x, d\tau_y, d\tau_z, d\tau_{xy})^T \text{ e } \{d\varepsilon\} = (d\varepsilon_x, d\varepsilon_y, d\varepsilon_z, d\varepsilon_{xy})^T$$

$V$  é o volume do elemento;

$\{d\}^{(e)}$  é o deslocamento nodal do elemento;

$c$  é a força de massa por unidade de volume;

$\langle N \rangle^T$  é um vetor coluna com as funções de interpolação;

$\rho$  é a carga distribuída na superfície por unidade de área;

$\{F_n\}$  é o vetor de cargas nodais concentradas.

Como o modelo estrutural contido neste trabalho é bidimensional, considera-se os elementos com espessura ( $t$ ) unitária. Assim, a integral de volume  $\int_v$  torna-se uma integral sobre a área do elemento  $\int_A$ , e a integral da área torna-se uma integral  $\int_L$  ao longo do comprimento  $L$  do elemento onde estão sendo aplicadas as cargas distribuídas.

Desta forma, a equação de elementos finitos pode ser escrita de forma abreviada como:

$$[K]^{(e)} \{d\}^{(e)} = \{F\}^{(e)} = \{F_b\} + \{F_s\} + \{F_n\} \quad (75)$$

Onde:

$[K]^{(e)}$  é a matriz de rigidez do elemento, dada por:  $t \int_A [B]^T [D] [B] dA$ ;

$\{d\}^{(e)}$  é o vetor de deslocamentos nodais do elemento;

$\{F\}^{(e)}$  é o vetor de forças nodais equivalentes no elemento, com as seguintes componentes:

$\{F_b\}$ : vetor de forças nodais equivalentes devido a forças de massa (c);

$$\{F_b\} = \int_A \langle N \rangle^T dA$$

$\{F_s\}$ : vetor de forças nodais equivalentes devido a forças distribuídas ( $\rho$ );

$$\{F_s\} = t\rho \int_L \langle N \rangle^T dL$$

$\{F_n\}$ : vetor de forças nodais concentradas.

### 3.1.4 Etapa 4: Resolver os sistema de equações

Para cada elemento, pode-se montar um vetor de forças global,  $\{F\} = \langle F_{x1}, F_{1y}, \dots, F_{xN}, F_{yN} \rangle^T$ , onde N é o número total de nós da malha. Também é possível denotar os deslocamentos de toda a malha por um vetor de deslocamentos global,  $\{d\} = \langle u_1, v_1, \dots, u_N, v_N \rangle^T$ . Os vetores  $\{F\}$  e  $\{d\}$  tem (2N) elementos em duas dimensões e se relacionam através da expressão:

$$[K] \cdot \{d\} = \{F\} \quad (76)$$

Onde  $[K]$  é a matriz de rigidez global do sistema.

Esta matriz é montada a partir das matrizes de rigidez  $[K]^{(e)}$  de cada elemento da malha. Cada um destes elementos contribui com termos específicos na matriz global  $[K]$  e no vetor global  $\{F\}$  de acordo com a numeração dos nós do elemento.

A partir da solução do sistema de equações lineares da Equação (76), determinam-se os deslocamentos nodais para toda a malha. Os deslocamentos nodais podem ser representados da seguinte forma:

$$\{d\} = [K]^{-1} \{F\} \quad (77)$$

Onde  $[K]^{-1}$  é a inversa da matriz de rigidez global.

Assim, com o conhecimento desses deslocamentos e do campo de deslocamentos tem-se o comportamento de cada elemento finito da malha.

## 4. DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTRUTURAIS

Neste capítulo está descrito como se realizou a construção dos modelos estruturais no *Software ANSYS* de forma detalhada, bem como os parâmetros envolvidos para a realização das análises estruturais.

### 4.1. MODELO ESTRUTURAL (ME)

Para a implementação do modelo estrutural utilizo-se o *Software ANSYS*. Desenhou-se um modelo geométrico de um pavimento bi-dimensional, simétrico e discretizado por elementos quadráticos, com quatro nós cada elemento, utilizando a interpolação linear, formando assim a malha (Figura 17). Logo após, aplicou-se um refinamento na malha obtida, a fim de obterem-se resultados mais precisos. Também foram simulados os apoios nas laterais e na parte inferior do pavimento, criando-se as condições de contorno, indispensáveis para evitar deslocamentos nestes locais. E, por fim, foram aplicadas às cargas.

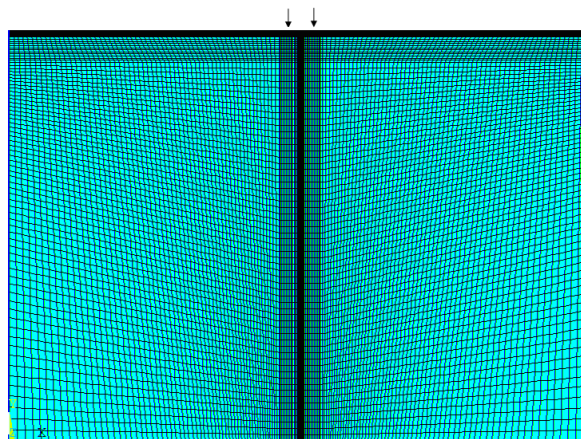


Figura 17 - Malha de elementos finitos

Após implementado o modelo estrutural, as simulações foram divididas em três etapas, de acordo com a variação dos parâmetros envolvidos no processo, sendo estas: Modelo Estrutural I, Modelo Estrutural II e Modelo Estrutural III.

#### 4.1.1. Modelo Estrutural I (ME I)

Para o Modelo Estrutural I, foram utilizados três diferentes módulos de rigidez do revestimento, simulando diferentes tipos de misturas asfálticas, sendo considerados materiais no regime linear, com propriedades elásticas e isotrópicas. Sendo que as características dos materiais da camada de revestimento, de base e de subleito estão apresentadas na Figura 18 (Onde E é o módulo de rigidez,  $\mu$  é o coeficiente de Poisson e h é a espessura da camada).

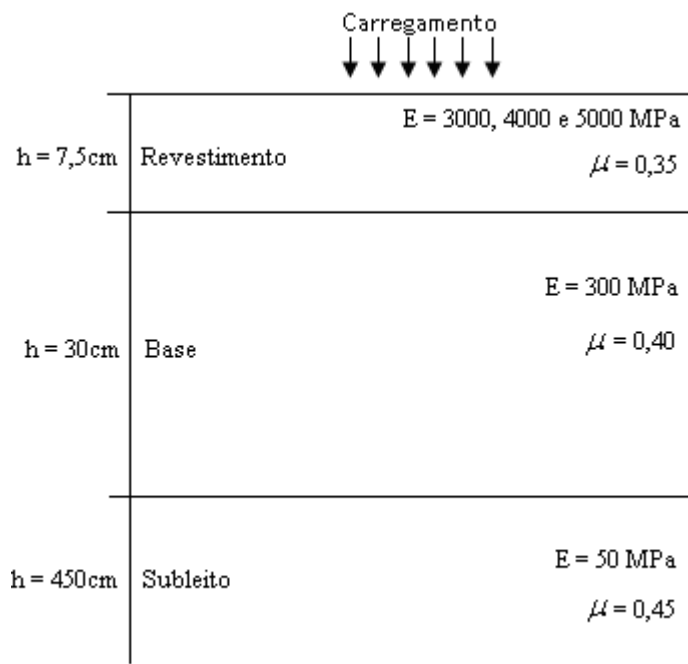


Figura 18 – Características dos materiais utilizados na construção do modelo estrutural

Para cada diferente módulo de rigidez foram simuladas diferentes cargas, tendo como referência um veículo rodoviário de eixo simples de roda dupla (Figura 19) com carga de 80kN, ou seja, a carga por roda de 20kN, com área circular de contato de 0,0363m<sup>2</sup> (equivalente a tensão de 0,55 MPa), com base em dados de Medina (2005) e considerado neste trabalho, como carga padrão. Para a avaliação dos excessos foram simulados carregamentos com percentagens a mais sobre a carga considerada referência e para fins de comparações foram simulados ainda carregamentos com percentagens a menos do que a carga considerada referência (de -20 a +40%). Neste trabalho, esta relação é denominada RC (Relação entre a variação da carga e a carga padrão) e apresentada na Equação 78.

$$RC = \left( \frac{\Delta \text{Carga}}{\text{Carga padrão}} \right) \cdot 100 \quad (78)$$

Neste modelo, apesar da variação das cargas, a área circular de contato foi considerada a mesma em todas as simulações.



Figura 19 – Semi-eixo de rodado duplo

#### 4.1.2. Modelo Estrutural II (ME II)

No Modelo Estrutural II, além dos parâmetros utilizados no Modelo Estrutural I, ainda foram utilizadas diferentes pressões de inflação dos pneus, sendo elas: 552, 620 e 689 kPa. Estas pressões geram variações na área de contato pneu/pavimento e conseqüentemente variações nas tensões internas do pavimento.

Tais pressões de inflação foram obtidas segundo dados experimentais de Albano (1998), que em sua dissertação de mestrado obteve, através de dados experimentais, a área de contato circular para três diferentes cargas por eixo e três diferentes pressões de inflação dos pneus, obtendo os dados mostrados na Tabela 1.

Com base nestes dados, fez-se um ajuste linear (Figura 20) a fim de obter funções com as quais se pôde conhecer as diferentes áreas de contato pneu/pavimento de acordo com a variação dos carregamentos e das pressões de inflação consideradas.

Tabela 1 – Dados experimentais obtidos por Albano (1998)

Carga/Eixo (kN)	Pressão de Inflação (kPa)	Área circular de um pneu (cm <sup>2</sup> )
120	689	428,58
100	689	407,18
82	689	383,88
120	620	426,23
100	620	400,85
82	620	382,38
120	552	468,03
100	552	432,43
82	552	400,75

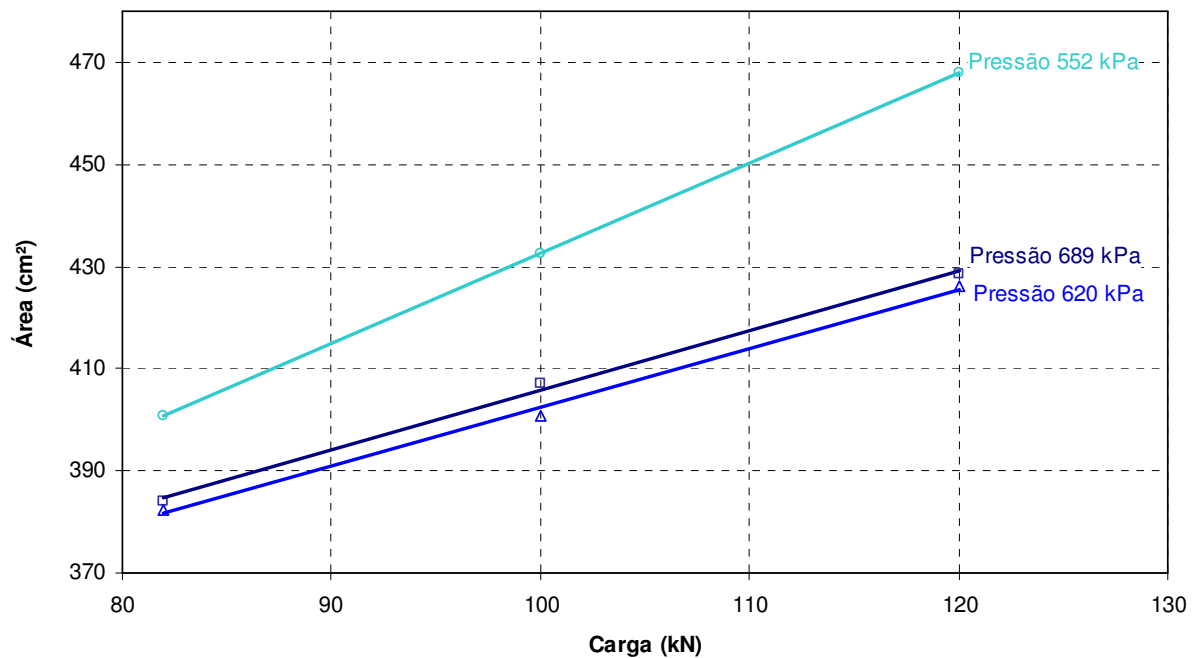


Figura 20 – Ajuste linear dos dados obtidos por Albano (1998)

Assim, para a pressão de inflação de 552 kPa, obteve-se a seguinte equação:

$$AC = 1,7707P + 255,49 \quad (79)$$

Sendo  $AC$  a área de contato pneu/pavimento em cm<sup>2</sup> e  $P$  a carga (em kN) por eixo, obteve-se então, diferentes áreas para os diferentes carregamentos, e conseqüentemente diferentes tensões, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Área de contato pneu/pavimento para pressão de inflação de 552 kPa

RC (%)	Carga/Eixo (kN)	Área de contato de um pneu (m <sup>2</sup> )
-20	64	0,03688
-15	68	0,03759
-10	72	0,03830
-5	76	0,03901
0	80	0,03971
10	88	0,04113
20	96	0,04255
30	104	0,04396
40	112	0,04538

Da mesma forma, obteve-se as equações para as demais pressões de inflação consideradas, sendo elas:

Pressão de inflação de 620 kPa:

$$AC = 1,1744P + 288,33 \quad (80)$$

Pressão de inflação de 689 kPa:

$$AC = 1,1561P + 286,78 \quad (81)$$

As Tabelas 3 e 4 mostram as variações do carregamento para as pressões de inflação citadas acima.

Tabela 3 - Área de contato pneu/pavimento para pressão de inflação de 620 kPa

RC (%)	Carga/Eixo (kN)	Área de contato de um pneu (m <sup>2</sup> )
-20	64	0,03635
-15	68	0,03682
-10	72	0,03729
-5	76	0,03776
0	80	0,03823
10	88	0,03917
20	96	0,04011
30	104	0,04105
40	112	0,04199



Tabela 4 - Área de contato pneu/pavimento para pressão de inflação de 689 kPa

RC (%)	Carga/Eixo (kN)	Área de contato de um pneu (m <sup>2</sup> )
-20	64	0,03608
-15	68	0,03654
-10	72	0,03700
-5	76	0,03746
0	80	0,03793
10	88	0,03885
20	96	0,03978
30	104	0,0407
40	112	0,04163

Diferentemente do Modelo I, no Modelo II é possível considerar as variações da área de contato pneu/pavimento devido ao fato de novos parâmetros (diferentes pressões de inflação) terem sido incorporados à análise.

#### 4.1.3. Modelo Estrutural III (ME III)

No Modelo Estrutural III, além dos módulos de rigidez e espessuras das camadas e variação das cargas (de -20% a +40%) utilizadas nos Modelos Estruturais I e II, considera-se também o uso dos pneus extralargos. Assim, para a implementação do ME III, utilizou-se como referência um veículo rodoviário de pneus extralargos (Figura 21), com carga de 80 kN e a carga por roda de 40 kN. Porém, para uma melhor análise, dividiu-se o ME III em duas situações distintas: na Situação 1, a área de contato pneu/pavimento considerada foi de 0,0889m<sup>2</sup>, segundo dados obtidos por BRITO *et. al* (2009); já na Situação 2, a área de contato pneu/pavimento foi de 0,0726m<sup>2</sup> (equivalente ao dobro da área de contato considerada no Modelo I). A utilização neste trabalho das duas diferentes áreas para o pneu extralargo se dá pelo fato de que ainda existem poucos dados na literatura, principalmente no que diz respeito a medidas experimentais. Desta forma, para fins de comparação, achou-se prudente utilizar as duas áreas de contato citadas acima, pois qualquer mudança nesta área de contato faz com que as tensões e as deformações tenham significativas alterações.

Assim como no ME I, no ME III, apesar da variação das cargas, a área circular de contato foi considerada fixa tanto na Situação 1 quanto na Situação 2.



Figura 21 – Semi-eixo de pneu extralargo

#### 4.2. ANSYS

O *ANSYS* é um poderoso software que permite a resolução de inúmeros problemas em engenharia devido a sua versatilidade e robustez na realização de análises. Possui seu código algoritmo baseado no Método de Elementos Finitos, permitindo a obtenção das tensões, deformações e deslocamentos em análises estruturais.

Enquanto que no passado muitos dos utilizadores do Método de Elementos Finitos estavam também envolvidos na respectiva programação em computador, verifica-se hoje em dia que a quase totalidade dos projetistas de estruturas apenas se preocupa com a utilização do correspondente software e com a interpretação dos resultados obtidos.

O *Software ANSYS* permite ao usuário identificar através de gráficos as regiões onde ocorrem as tensões, deformações e os deslocamentos, possibilitando uma melhor interpretação dos resultados e auxiliando no dimensionamento dos pavimentos.

A versatilidade do software se dá pelo fato de que, ao realizar as simulações, é possível levar em conta diversos parâmetros, como por exemplo:

- Módulo de rigidez;
- Coeficiente de Poisson;
- Espessuras das camadas do pavimento;

- Aplicação de diferentes cargas e área de contato pneu/pavimento, etc.

Desta forma, a utilização do software como ferramenta neste trabalho, serviu para identificar os fatores de maior influência na degradação asfáltica através das análises e variações dos parâmetros envolvidos.

#### 4.2.1. Construção do Modelo Estrutural no Software Ansys

Neste tópico apresentam-se passo a passo as etapas que levaram à construção do Modelo Estrutural para a realização deste trabalho, utilizando o *Software ANSYS*. A Figura 22 apresenta a interface do software.

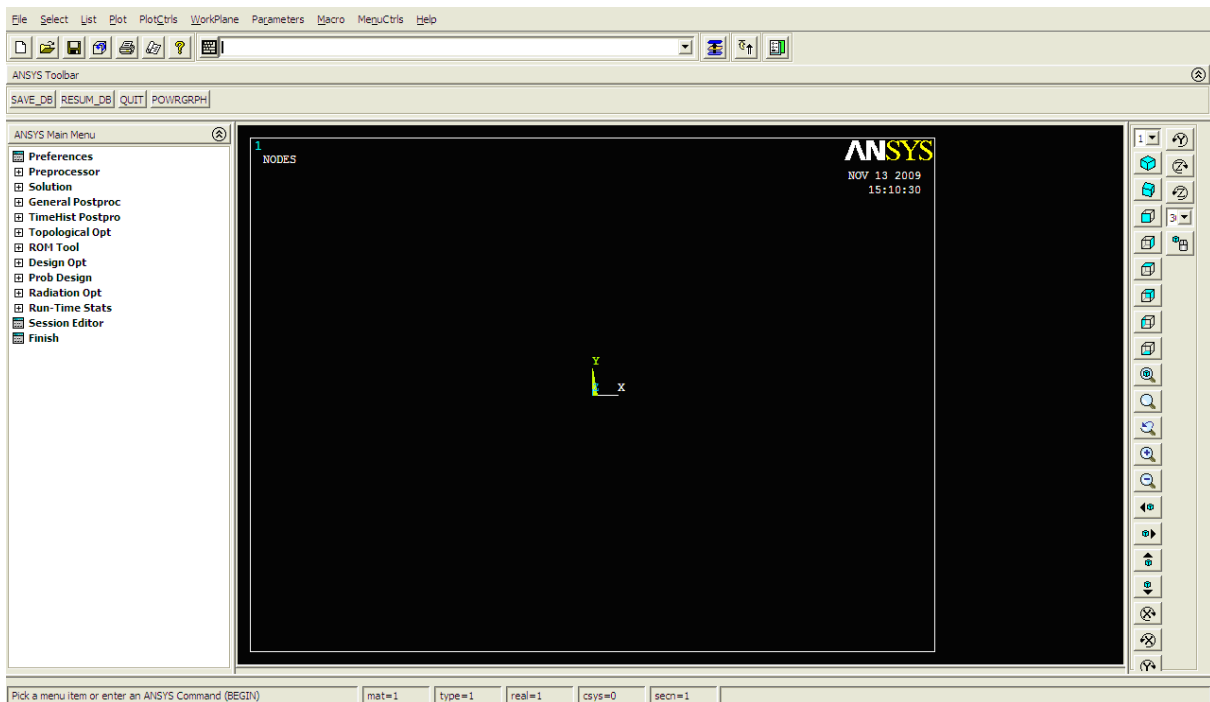


Figura 22 – Interface do Software Ansys

#### Etapa 1: Pré – Processor

O primeiro passo foi idealizar a estrutura através das formas geométricas, tanto para todo o domínio como também para os elementos finitos e, tendo estas informações foi possível fazer a escolha do elemento. Para tanto, escolheu-se o elemento PLANE42, usado em estruturas sólidas, retangular e com 4 nós. A escolha do elemento foi feita segundo a Figura 23.

Após a escolha do elemento, fez-se necessário definir o plano de análise, no caso deste trabalho, defini-se como plano de deformação, pois o foco é a análise das deformações críticas, conforme Figura 24.

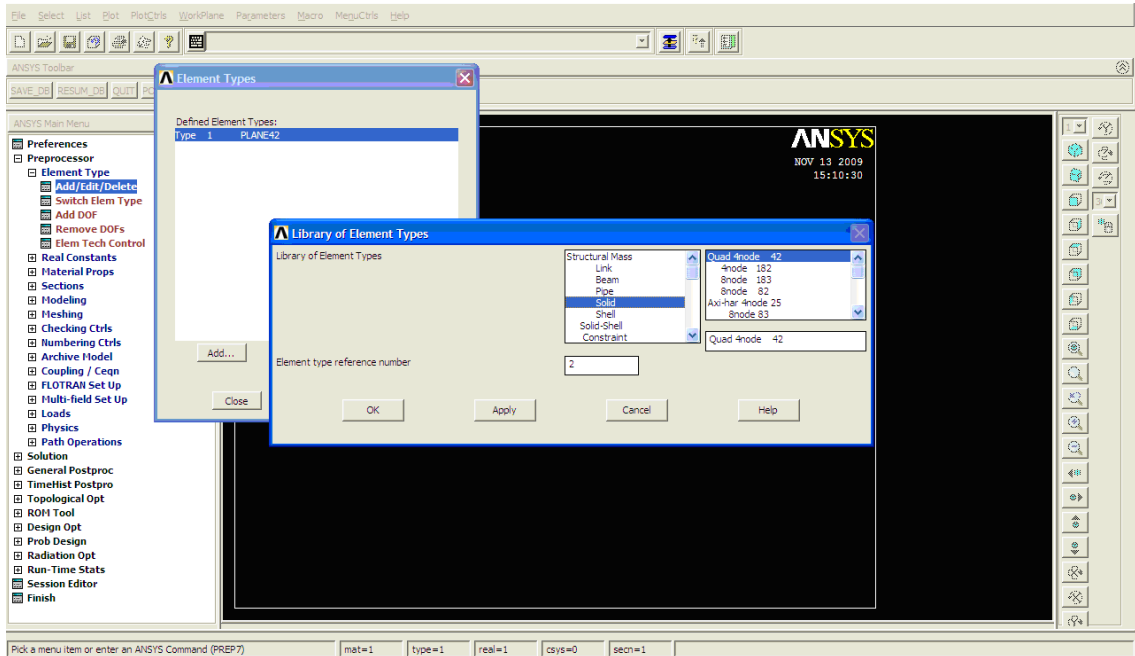


Figura 23 – Escolha do elemento no ANSYS

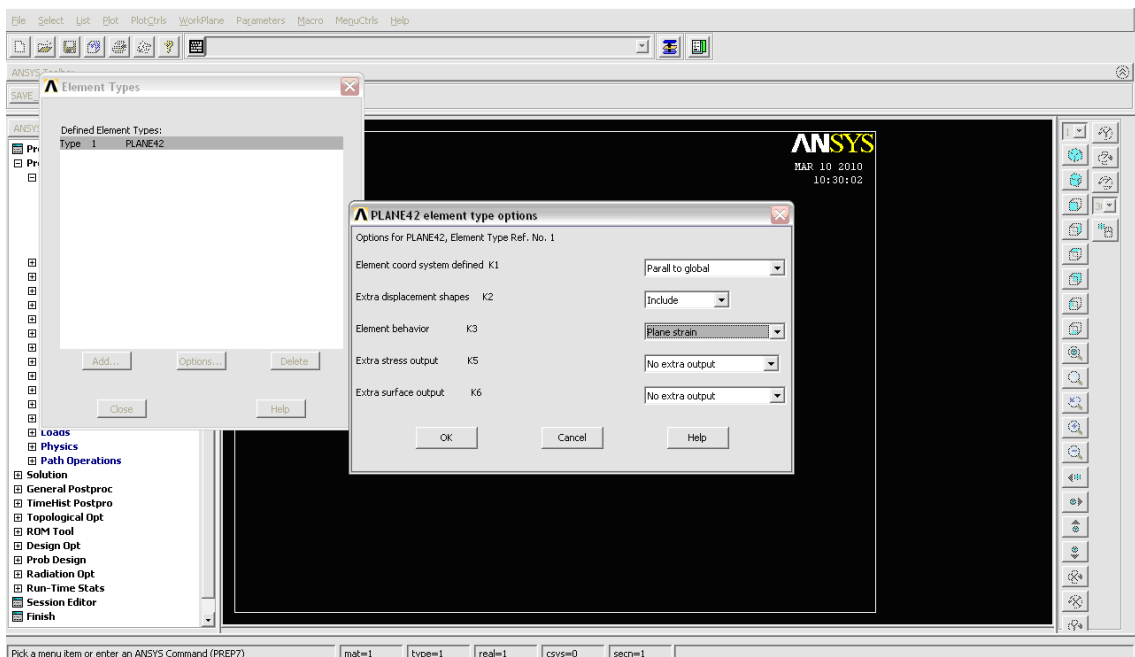


Figura 24 – Escolha do plano de deformação

Após a escolha do elemento, fez-se necessário informar as características dos materiais utilizados, que são: materiais no regime linear, elásticos e isotrópicos, e também as propriedades dos materiais que compõem as camadas da estrutura. No caso da estrutura de um pavimento bidimensional utilizada neste trabalho em específico, as propriedades a serem informadas foram os módulos de rigidez e o coeficiente de Poisson de cada camada, conforme Figura 25. Como, para cada camada existem diferentes materiais, indicou-se como Material 1, 2 e 3 as propriedades dos materiais das camadas do revestimento, base e subleito respectivamente.

Tendo informado o tipo de elemento, as características e as propriedades dos materiais, construiu-se, então, o modelo geométrico do pavimento com suas respectivas camadas. Observe na Figura 26, a caixa de texto no centro da interface é para que sejam numerados os nós e informadas as suas coordenadas nos eixos x e y.

Após a numeração dos nós, fez-se necessário unir um nó ao outro através de linhas e conectar estas linhas obtendo as áreas nestes locais, e assim, obteve-se o modelo geométrico de fato, de acordo com as Figuras 27 e 28.

Ao finalizar todas as conexões entre as linhas do modelo, tem-se todas as áreas referentes ao mesmo, estando este pronto para a implementação do método de elementos finitos (Figura 29).

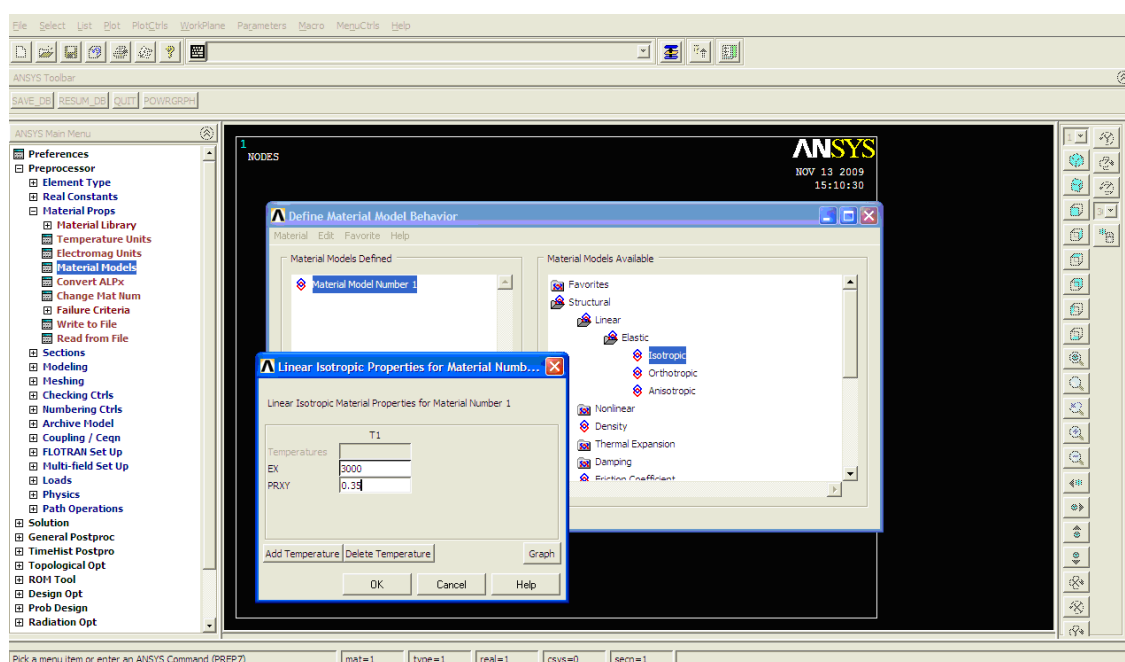


Figura 25 – Escolha das características e propriedades dos materiais

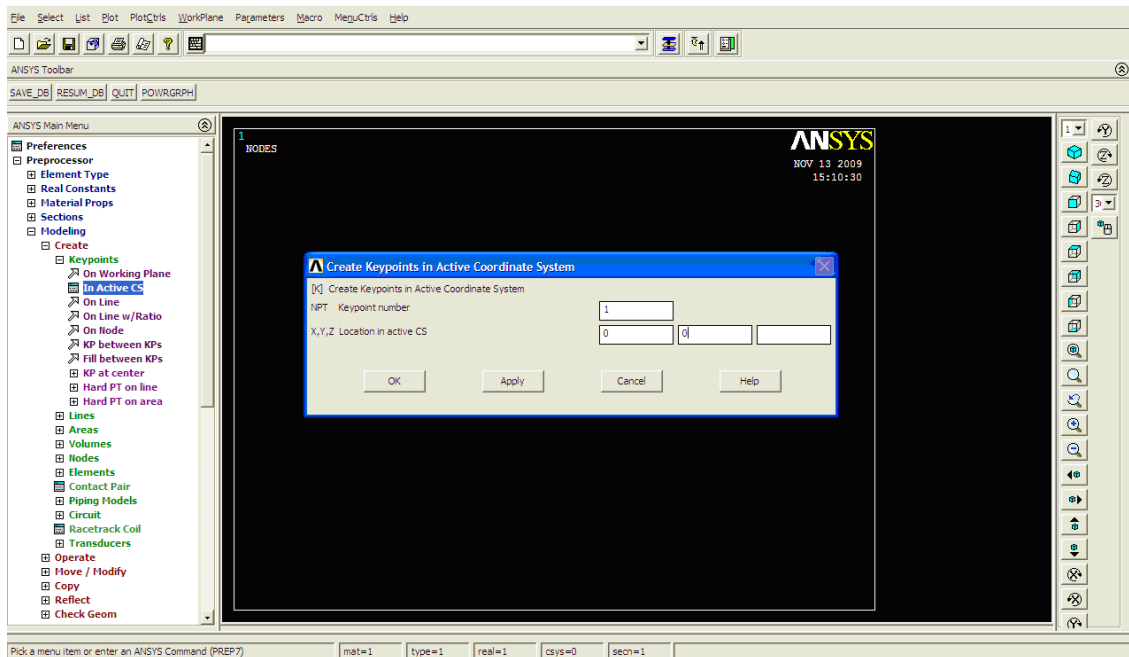


Figura 26 – Construção do modelo geométrico: numeração dos nós

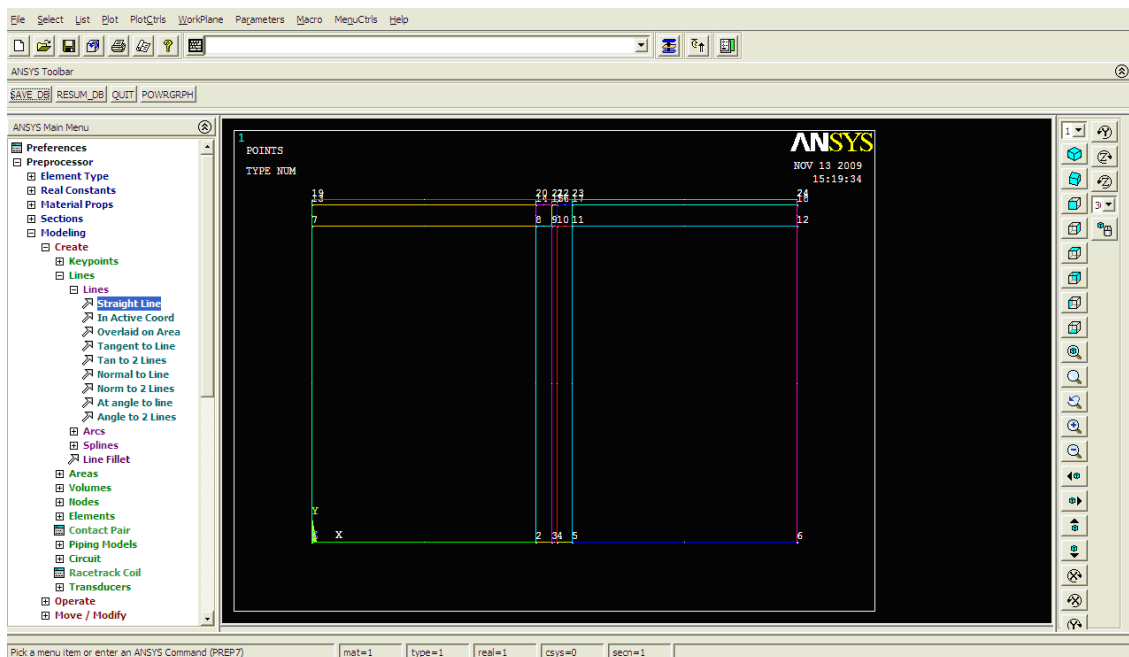


Figura 27 – Modelo geométrico para um pavimento bidimensional e simétrico: união entre nós

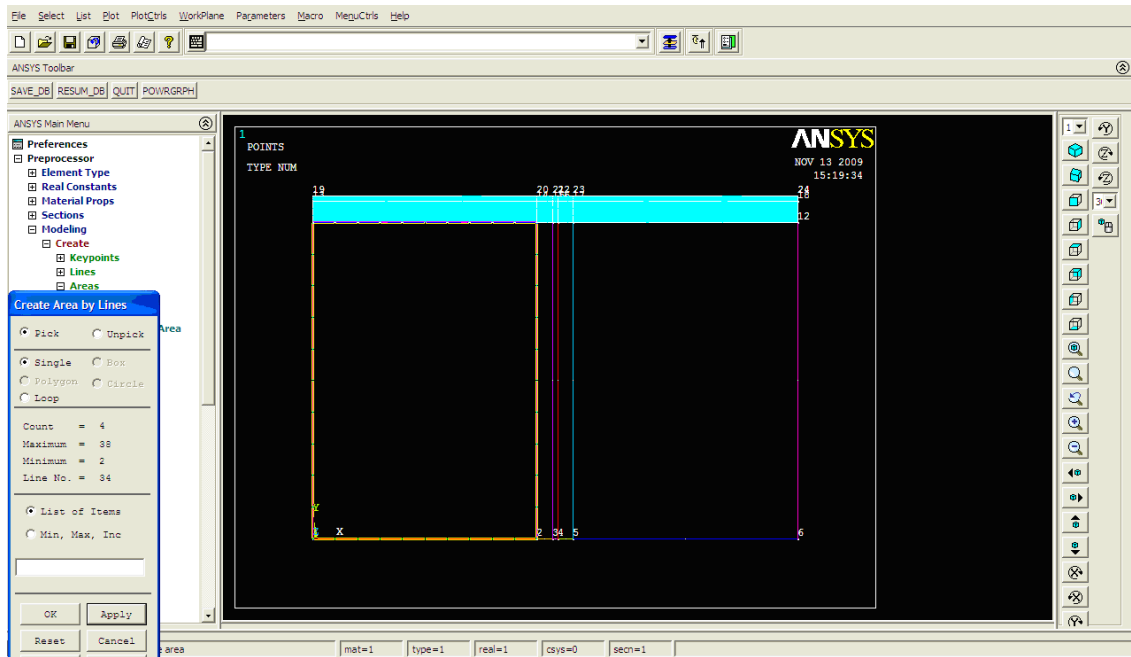


Figura 28 – Conexão entre as linhas para a obtenção das áreas

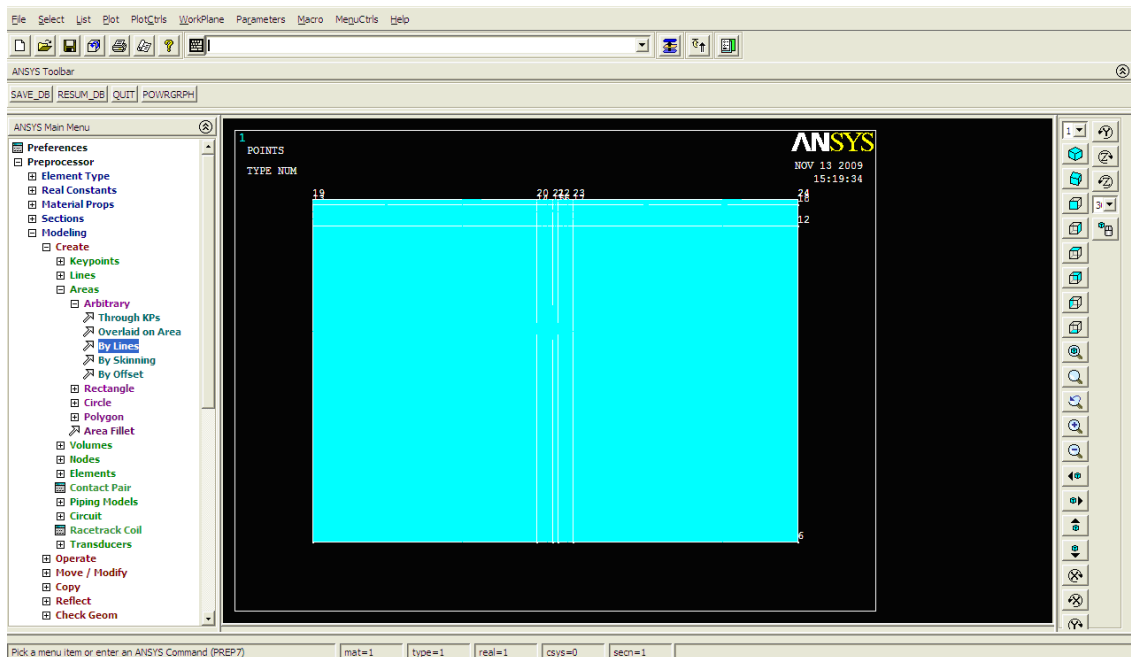


Figura 29 – Áreas do modelo geométrico

Construído o modelo geométrico, é preciso aplicar a ele todas aquelas características e propriedades indicadas anteriormente, no início de sua construção. As propriedades devem ser aplicadas camada por camada, de acordo com o indicado na escolha das mesmas, como na Figura 30.

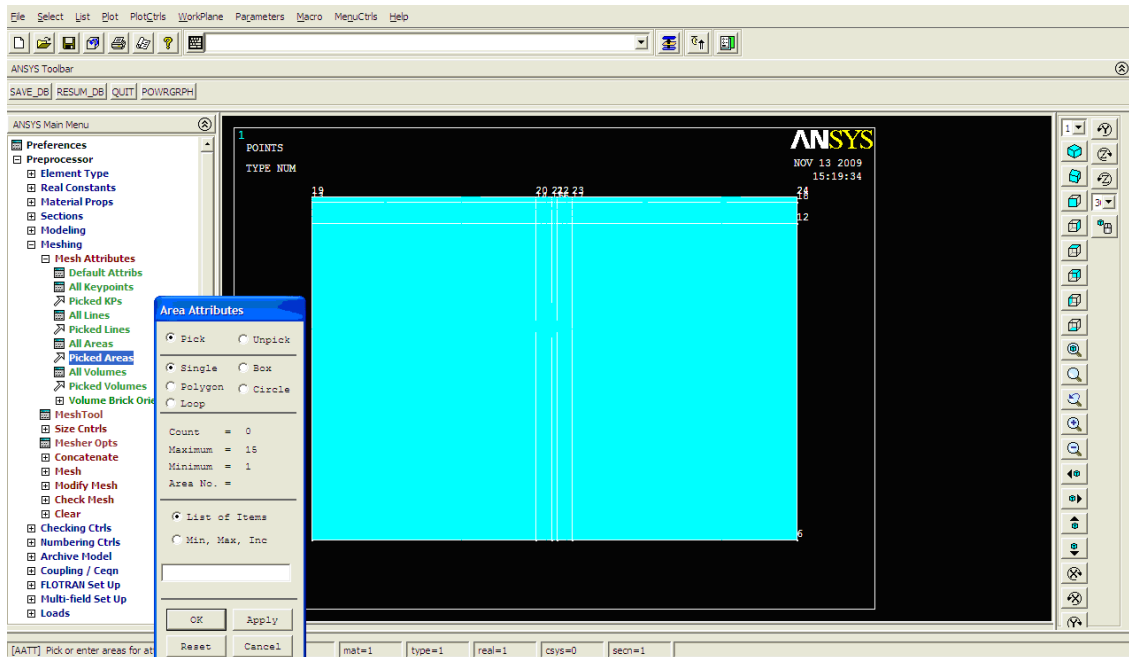


Figura 30 – Aplicação das características e propriedades dos materiais

Por exemplo: para aplicar as propriedades da camada do subleito, indicadas como Material 3, foi necessário selecionar com a seta as áreas desta camada e aplicar o respectivo material, conforme Figuras 31 e 32.

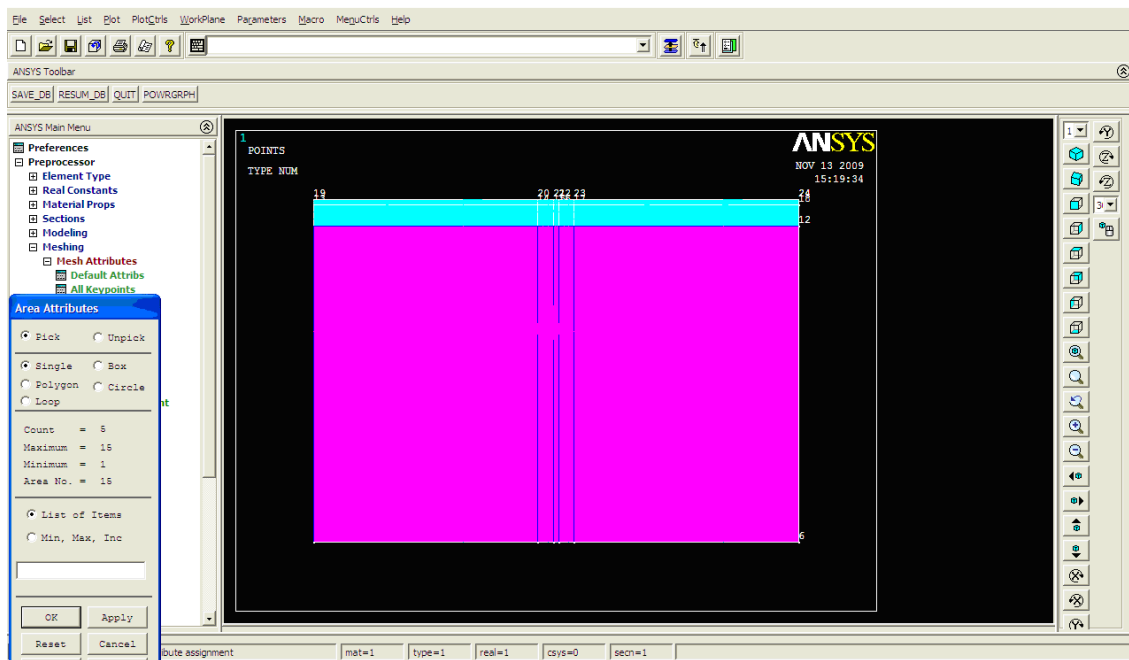


Figura 31 – Áreas selecionadas (em rosa) do subleito



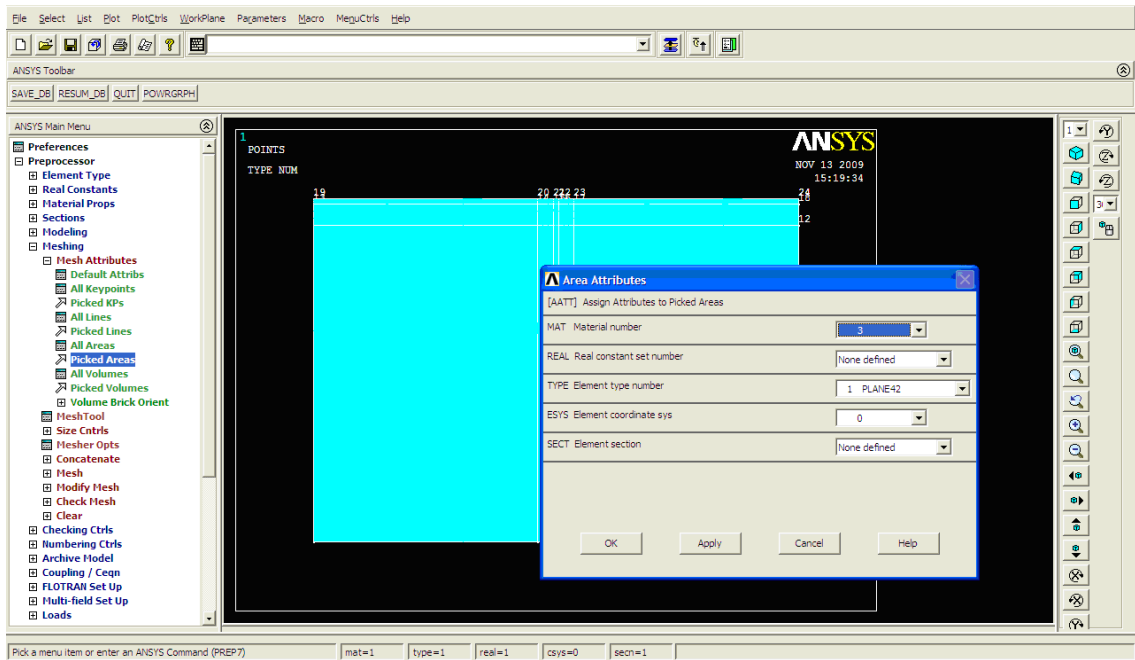


Figura 32 – Escolha do Material 3 para aplicação na área selecionada (subleito)

Aplicados os materiais, foi preciso selecionar todo o domínio para dar início à criação da malha, segundo Figura 33.

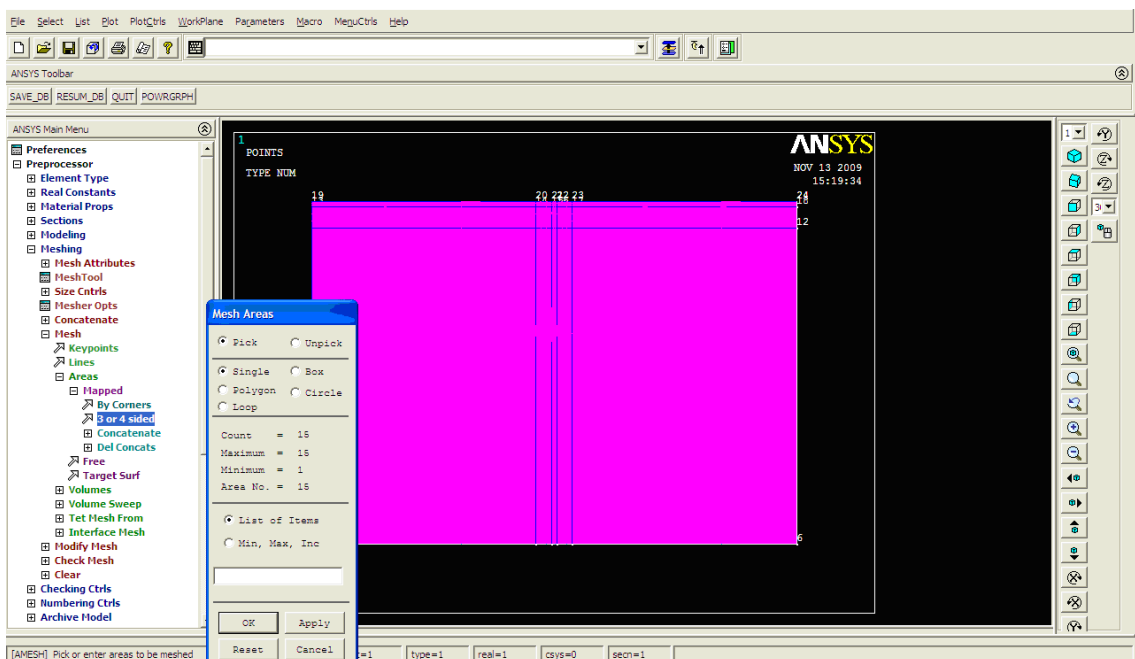


Figura 33 – Áreas selecionadas para a criação da malha

Após selecionada as áreas, aplicou-se um comando chamado Mapped: 3 or 4 sided, o qual cria automaticamente a malha (Figura 34).

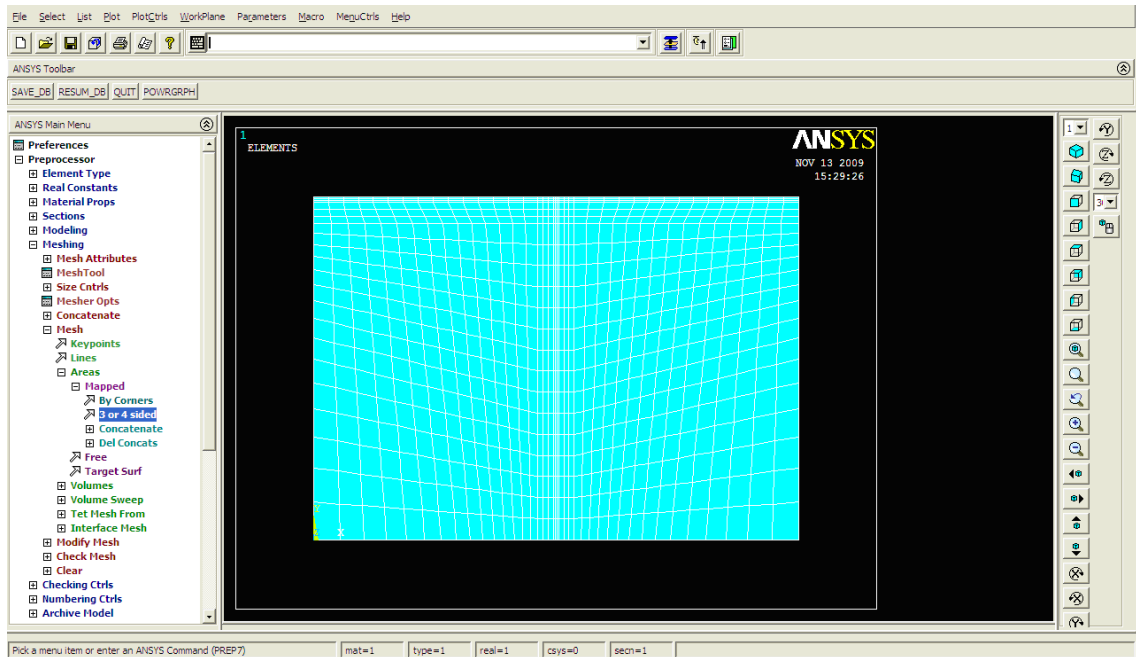


Figura 34 – Malha de elementos finitos

Observe que os elementos estão bastante grandes, o que daria resultados menos precisos, então, aplicou-se outro comando (Modify mesh: refine at), selecionou-se todas as áreas novamente a fim de possibilitar o refinamento da malha, e assim, obter resultados mais precisos (Figuras 35 e 36).

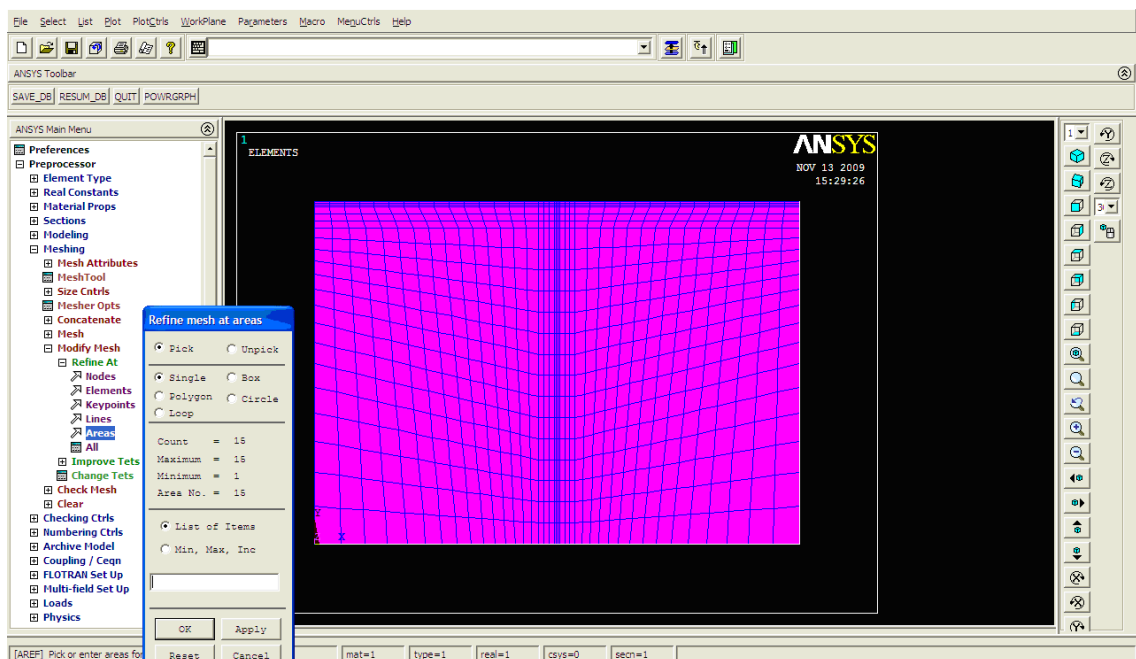


Figura 35 – Áreas selecionadas para o refinamento da malha

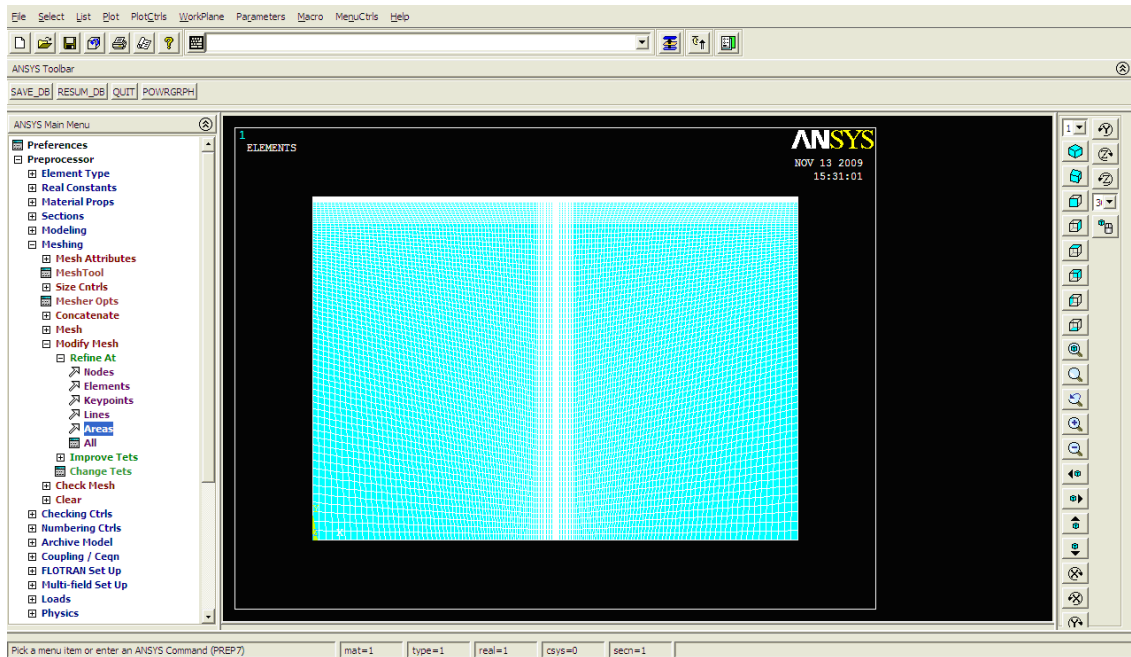


Figura 36 – Malha de elementos finitos refinada

Estando com a malha de elementos finitos pronta, partiu-se para a criação dos vínculos da estrutura, ou seja, “fixou-se” os locais onde não devem ocorrer deslocamentos. Para este trabalho foram selecionados as laterais (deslocamentos em x) e a parte inferior (deslocamento em y) da estrutura para a aplicação dos vínculos, veja Figuras 37 e 38.

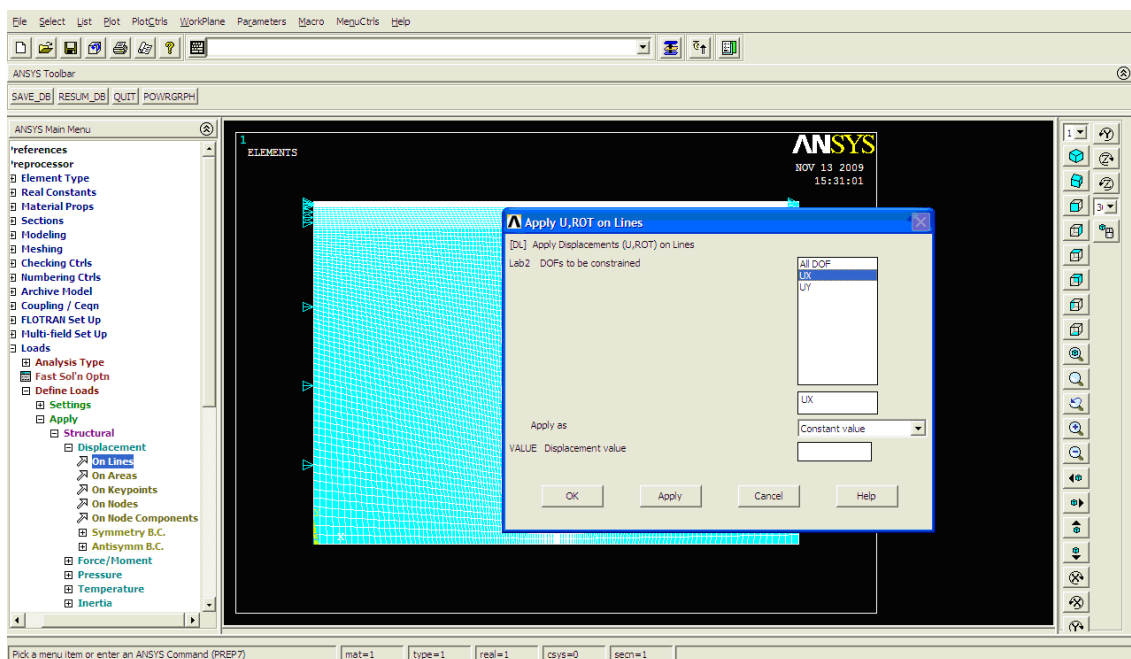


Figura 37 – Aplicação dos vínculos em x e y

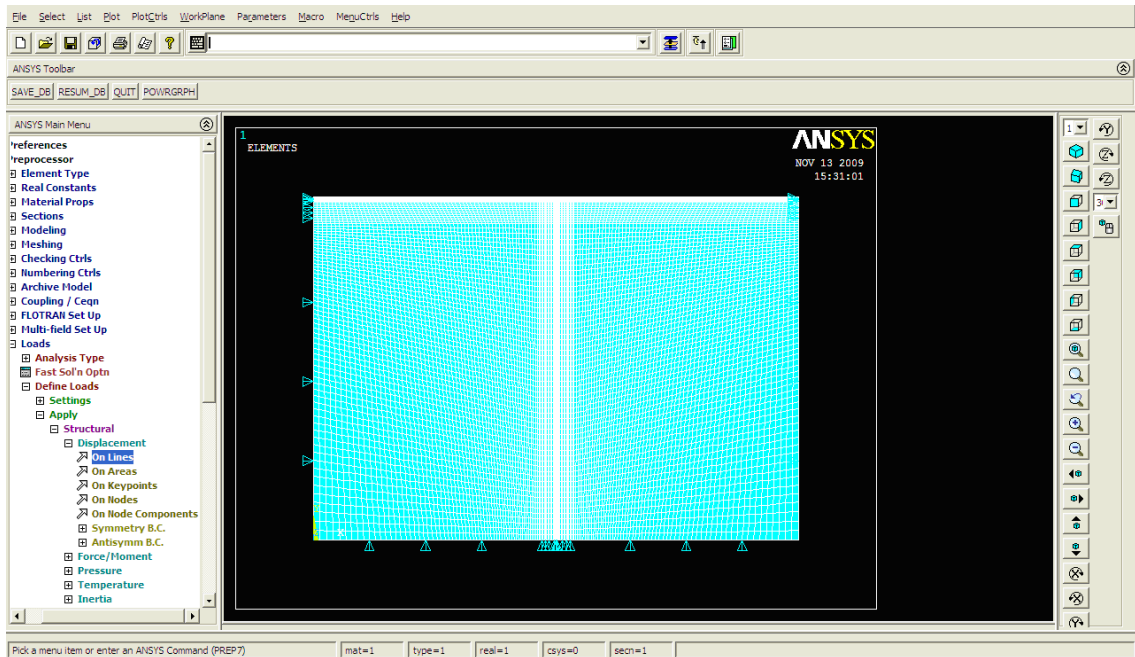


Figura 38 – Vínculos já aplicados

Após aplicados os vínculos, passou-se a aplicar o carregamento. Os carregamentos aplicados neste trabalho representam um semi-eixo rodoviário com duas rodas com área de contato circular, os quais foram aplicados como tensões em MPa. Porém, como a estrutura é bidimensional, este carregamento é aplicado nas linhas acima do revestimento, com a medida do diâmetro da área circular, conforme procedimentos apresentados nas Figuras 39 e 40.

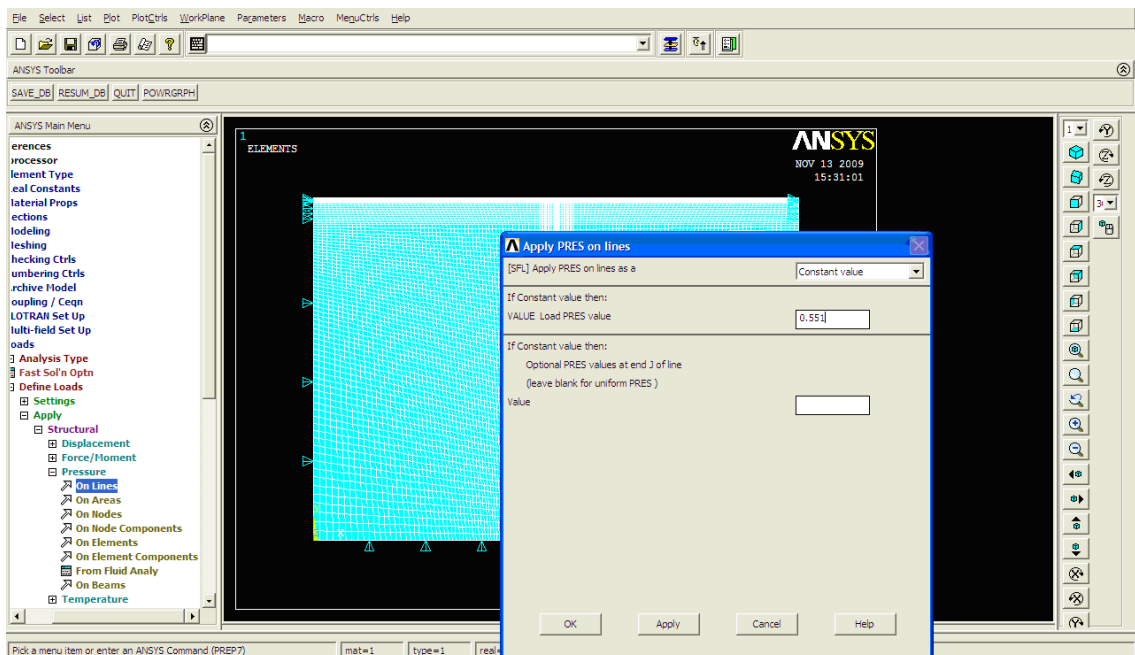


Figura 39 – Comandos para a aplicação do carregamento

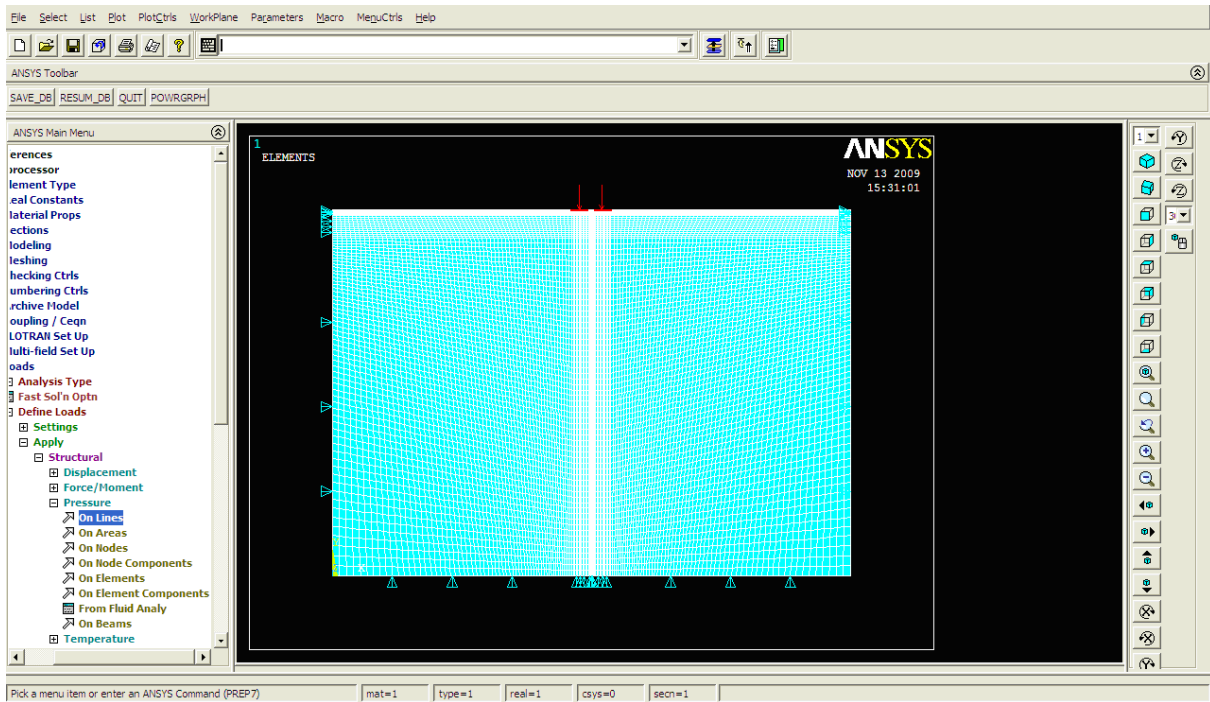


Figura 40 – Carregamentos já aplicados (setas em vermelho)

A aplicação do carregamento encerra a Etapa 1: Pré-Processor, passa-se agora a Etapa 2.

## Etapa 2: Solution

O *Software ANSYS* resolve o problema pelo método de elementos finitos automaticamente, mas para isto precisamos acionar o comando Solve, conforme a Figura 41.

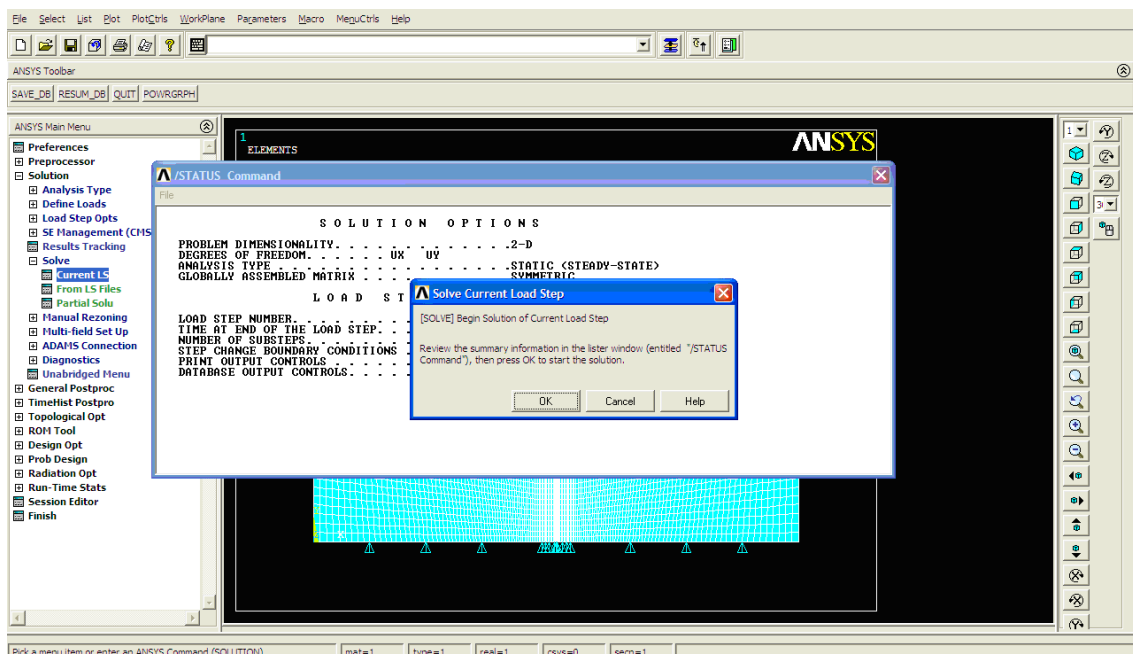


Figura 41 – Comando para obter o resultado do problema

Observe que a janela no centro da interface traz informações básicas da formulação estrutural, como por exemplo: dimensão do problema, graus de liberdade, tipo de análise, carregamento, entre outras. Ao clicar em Ok tem-se o problema resolvido.

### Etapa 3: Pós - Processor

Após resolver o problema, visualiza-se os resultados através de imagens gráficas. Neste trabalho, utilizou-se a visualização das soluções considerando a solução nodal. A Figura 42 mostra as opções para a visualização da solução nodal.

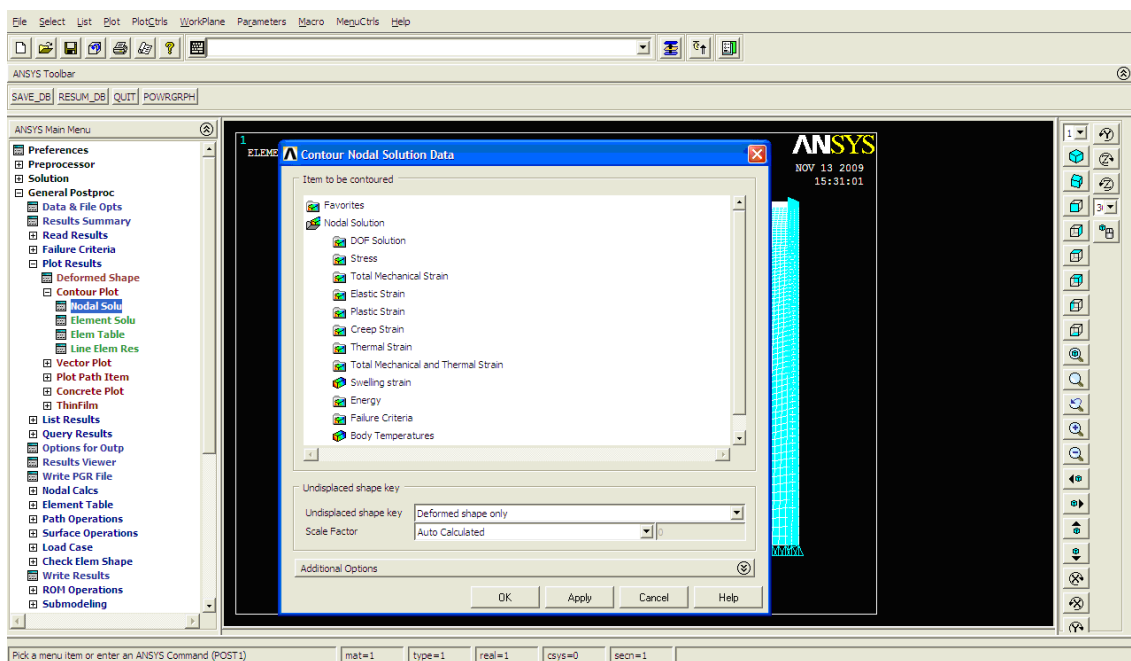


Figura 42 – Opções para a visualização dos resultados através da solução nodal

Como o interesse deste trabalho é visualizar a deformação crítica de tração na camada de revestimento e a deformação crítica de compressão no topo do subleito, responsáveis pela fadiga e pela deformação permanente nos pavimentos flexíveis respectivamente, utilizou-se duas das opções para a visualização das mesmas.

Para uma melhor visualização da deformação crítica de tração no revestimento, foi necessário selecionar apenas os elementos da camada de revestimento, veja nas Figuras 43 e 44.

Após selecionados os elementos da camada de revestimento, aplicou-se o comando Total Strain: 1st Principal total strain para a visualização do resultado para a deformação crítica de tração (Figura 45).

A Figura 46 apresenta a imagem gráfica para a visualização da deformação crítica de tração no revestimento, estando esta representada pela cor vermelha e localizado abaixo e entre as rodas do veículo. A máxima deformação de tração é dada pela variável SMX.

Para a visualização da deformação crítica de compressão no topo do subleito também selecionou-se apenas os elementos da camada de subleito e utilizou-se a opção de visualização para tal: Total Strain: Y Component of total strain (Figura 47).

A Figura 48 apresenta a imagem gráfica para a visualização da deformação crítica de compressão, estando esta representada pela cor azul. A deformação está localizada no centro da estrutura pelo fato de que a tensão aplicada nas duas rodas acaba se sobrepondo ao serem distribuídas no subleito. A máxima deformação de compressão é dada pela variável SMN.

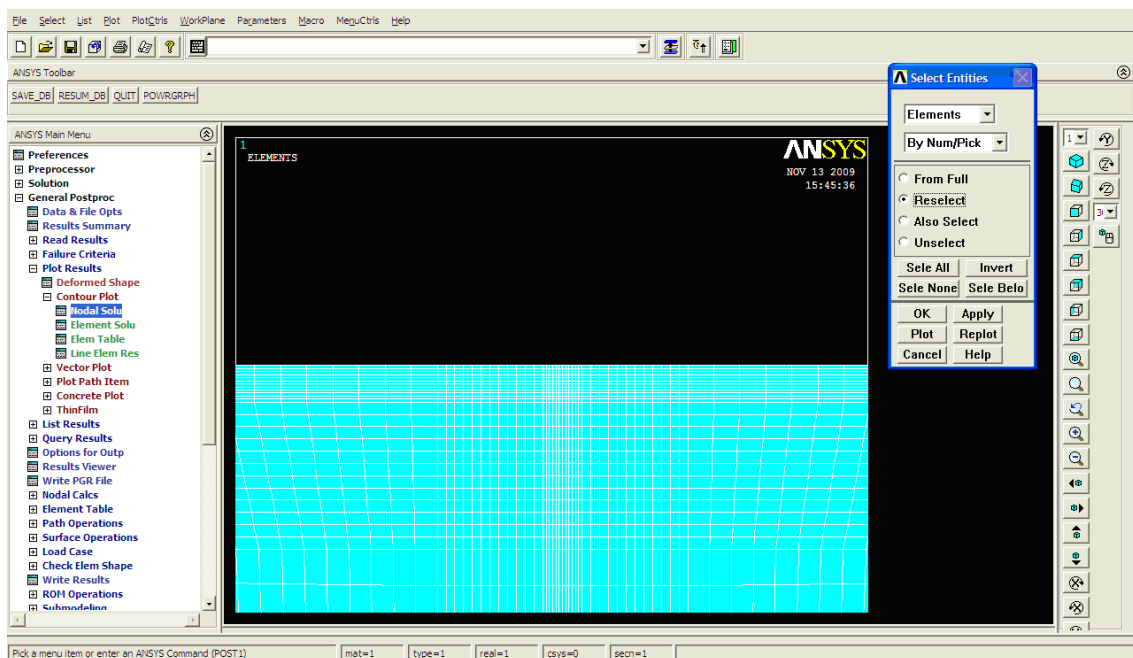


Figura 43 – Comando para selecionar apenas os elementos da camada de revestimento

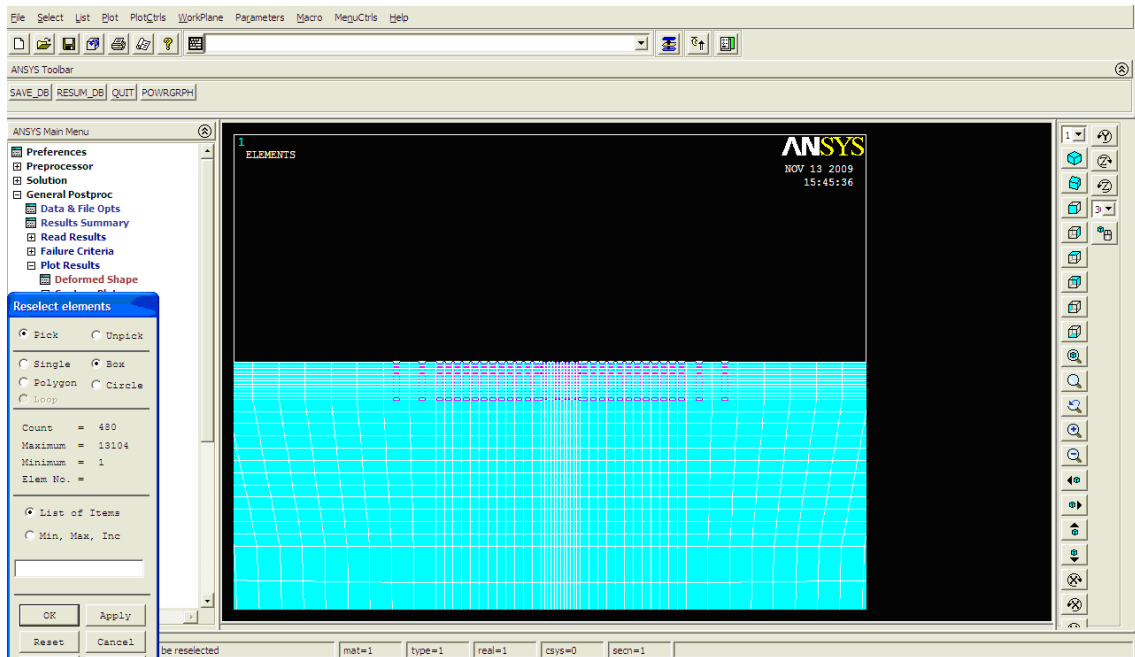


Figura 44 – Elementos da camada de revestimento já selecionados

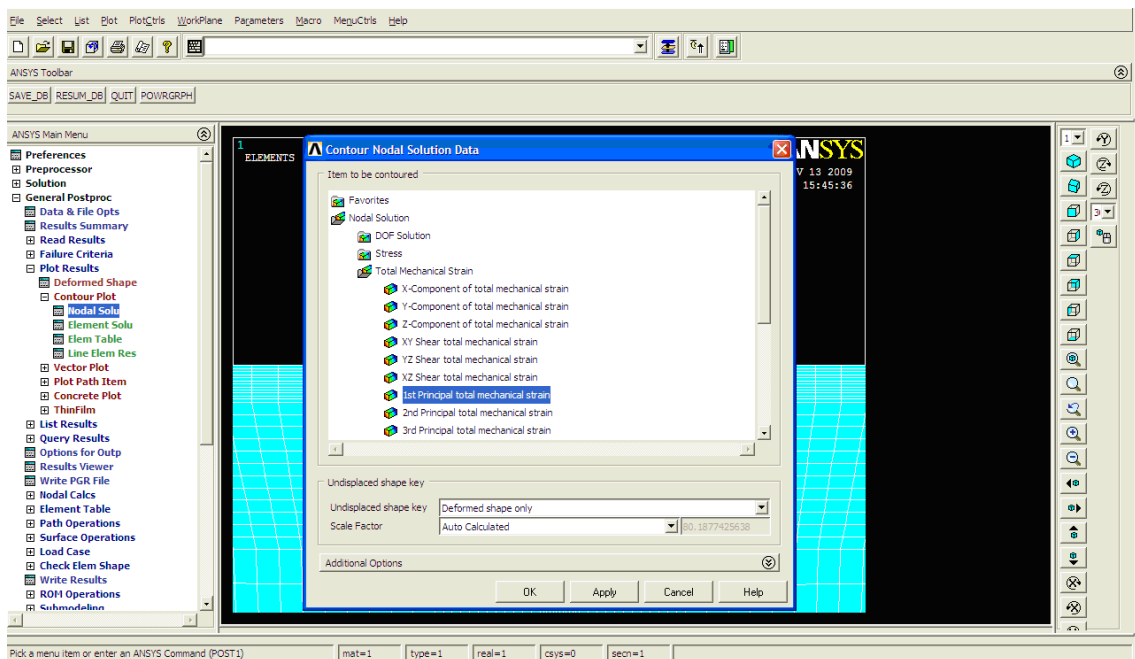


Figura 45 – Comando para a visualização da deformação crítica de tração



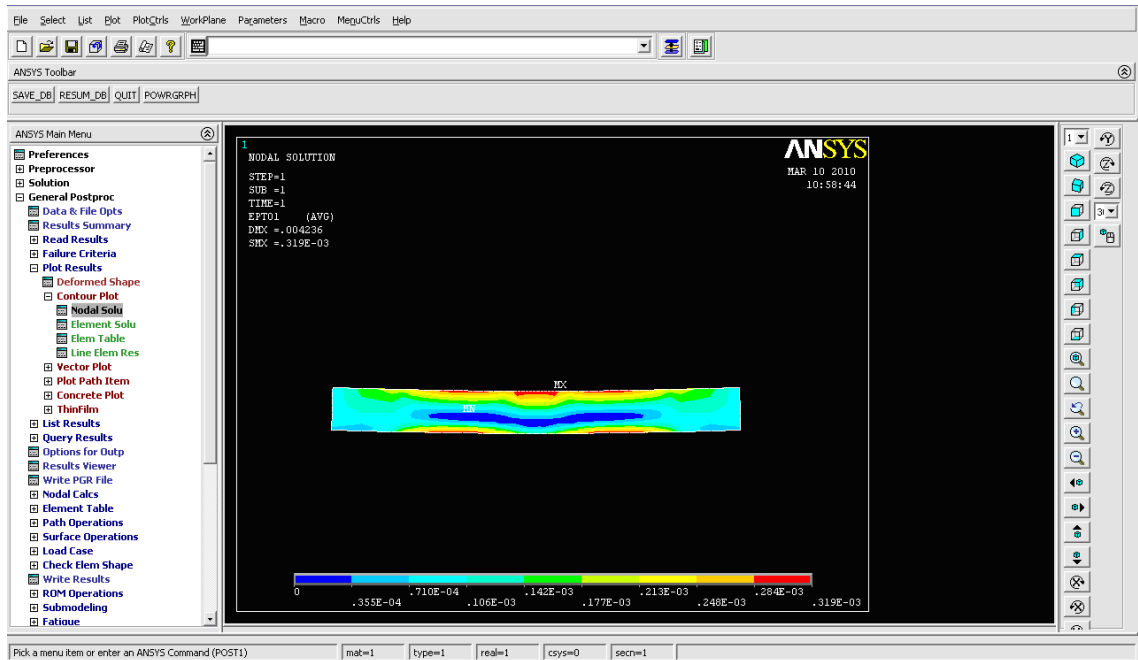


Figura 46 – Visualização da deformação crítica de tração no revestimento

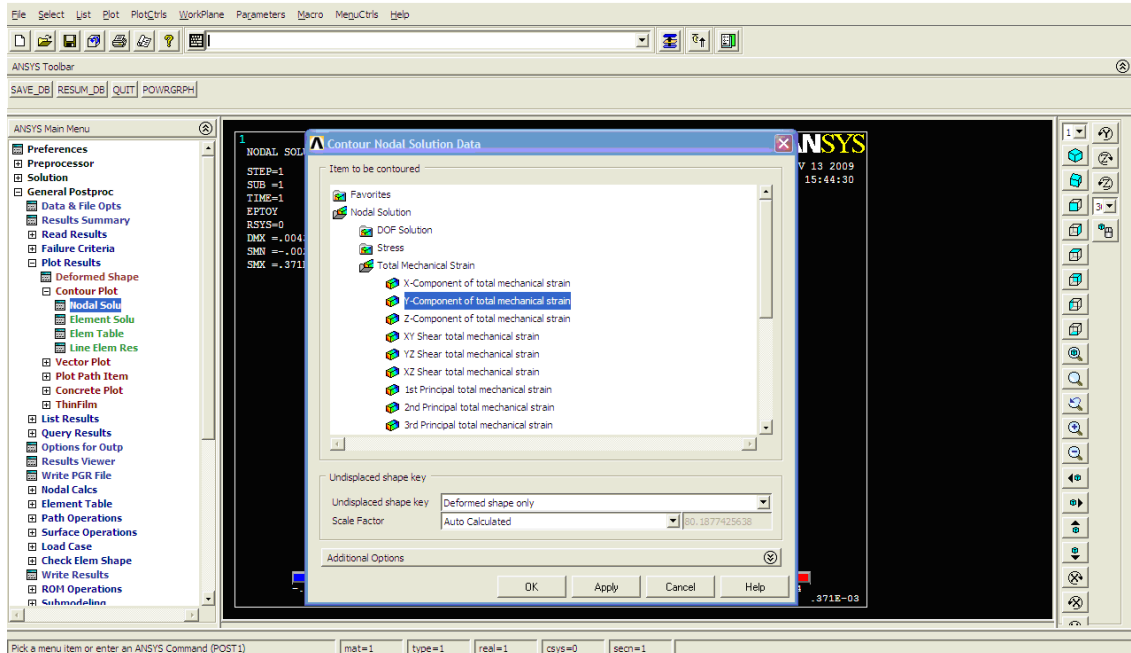


Figura 47 – Comando para a visualização da deformação crítica de compressão

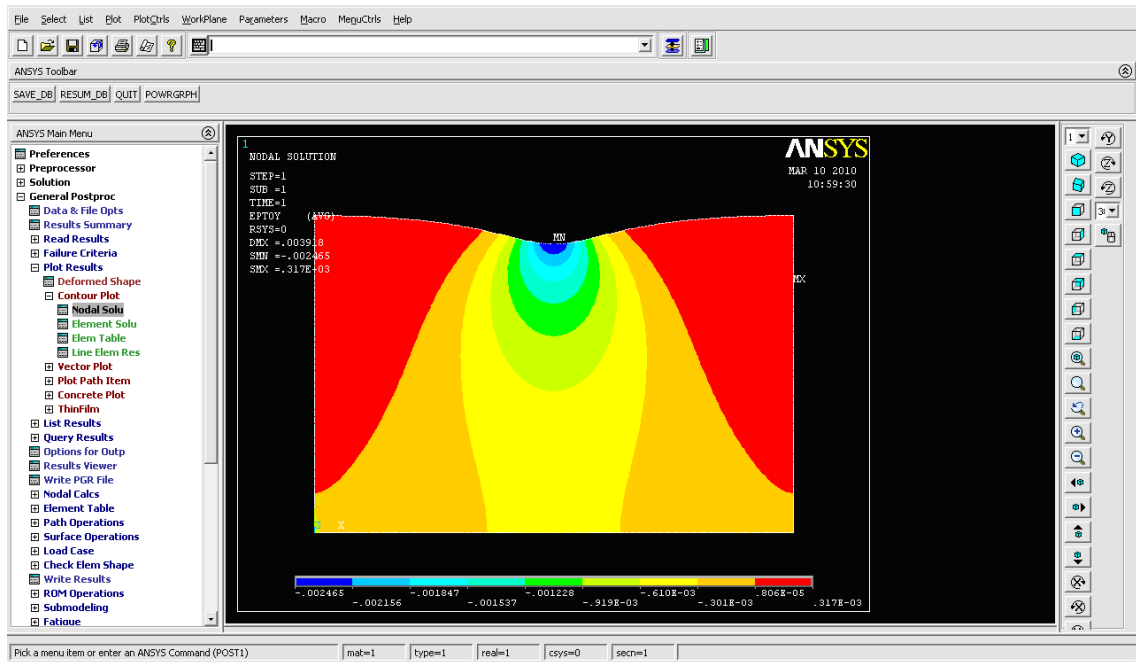


Figura 48 – Visualização da deformação crítica de compressão no topo do subleito

Após realizar todos os processos mostrados acima, obteve-se os dados de maior interesse para este trabalho, a deformação crítica de tração no revestimento e a deformação crítica de compressão no topo do subleito, com as quais se fez então, a análise dos danos no pavimento, conforme item a seguir.

### 4.3. ANÁLISE DOS DANOS NO PAVIMENTO

Ao realizar as simulações no *Software ANSYS*, obtêm-se a deformação crítica de tração que ocorre na fibra inferior de revestimento, a qual é responsável por iniciar o processo de trincamento por fadiga e também a deformação crítica de compressão que ocorre no topo do subleito, a qual ocasiona a deformação permanente. Após a obtenção destes parâmetros, é possível calcular o número  $N_f$  (indicador da vida útil do pavimento) para cada dano.

O modelo de fadiga de pavimentos asfálticos utilizado para o cálculo do  $N_f$  foi o modelo do MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) já apresentado na equação (19).

$$N_f = Ck_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \left( \frac{1}{E} \right)^{k_3} \quad (19)$$

$$C = 10^M$$

$$M = 4,84 \left( \frac{V_b}{V_a - V_b} - 0,69 \right)$$

Onde:

$N_f$  : número de repetições de carga para atingir o trincamento por fadiga;

$\varepsilon_t$  : deformação de tração crítica no revestimento;

$E$  : módulo de rigidez do material;

$k_1, k_2, k_3$  : coeficientes de regressão obtidos em laboratório, com os seguintes valores utilizados neste trabalho:  $k_1 = 0,00432$ ,  $k_2 = 3,291$  e  $k_3 = 0,854$ .

$C$  : fator de ajuste de campo;

$V_a$  : volume de vazios (%); valor utilizado no cálculo:  $V_a = 4,00$

$V_b$  : efetivo teor de ligante (%); valor utilizado no cálculo:  $V_b = 5,32$

Já o modelo de deformação permanente utilizado foi o apresentado pelo Asphalt Institute, e representado pela equação (32).

$$N_f = 1,365 \cdot 10^{-9} \cdot \varepsilon_c^{-4,477} \quad (36)$$

Onde:

$N_f$  : número de repetições de carga para atingir a deformação permanente;

$\varepsilon_c$  : deformação de compressão no topo do subleito.

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo encontram-se os resultados obtidos considerando cada modelo estrutural construído, bem como as comparações realizadas entre eles, evidenciando os parâmetros de maior influência na degradação dos pavimentos flexíveis.

### 5.1. RESULTADOS OBTIDOS PARA O MODELO ESTRUTURAL I

No Modelo Estrutural I, onde a área circular de contato foi considerada a mesma em todas as simulações, obteve-se os valores apresentados na Tabela 5 para a  $\varepsilon_t$  (deformação de tração crítica na camada do revestimento) e para a  $\varepsilon_c$  (deformação de compressão no topo do subleito).

Tabela 5 – Valores obtidos nas simulações do ME I para a  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_c$

RC <sup>1</sup> (%)	Carga/ Eixo (kN)	AC <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
				$\varepsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\varepsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\varepsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\varepsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\varepsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\varepsilon_c$ (x 10 <sup>-3</sup> )
-20	64	0,0363	0,44077	2,98	2,02	2,72	1,99	2,56	1,97
-15	68	0,0363	0,46832	3,16	2,14	2,89	2,12	2,71	2,09
-10	72	0,0363	0,49587	3,35	2,27	3,07	2,24	2,87	2,22
-5	76	0,0363	0,52341	3,53	2,39	3,24	2,37	3,03	2,34
0	80	0,0363	0,55096	3,72	2,52	3,41	2,49	3,19	2,46
10	88	0,0363	0,60606	4,09	2,77	3,75	2,74	3,51	2,71
20	96	0,0363	0,66116	4,46	3,02	4,09	2,99	3,83	2,96
30	104	0,0363	0,71652	4,84	3,27	4,43	3,24	4,15	3,21
40	112	0,0363	0,77135	5,21	3,53	4,77	3,49	4,47	3,45

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão

<sup>2</sup>AC = Área de contato pneu/pavimento

### 5.1.1. Análise da Fadiga

A Tabela 6 mostra os valores do  $N_f$  calculado para os diferentes módulos de rigidez após a aplicação dos resultados das simulações na função de transferência do modelo de fadiga utilizado e também a relação  $N_f/N_{f\text{padrão}}$  calculada para facilitar a análise da vida útil do pavimento.

Tabela 6 – Valores do  $N_f$  calculados para os diferentes módulos de rigidez considerando o trincamento por fadiga

RC <sup>1</sup> (%)	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
	$N_f$	$N_f/N_{f\text{padrão}}$	$N_f$	$N_f/N_{f\text{padrão}}$	$N_f$	$N_f/N_{f\text{padrão}}$
-20	$4,93 \times 10^5$	2,04	$5,28 \times 10^5$	2,14	$5,25 \times 10^5$	2,03
-15	$4,06 \times 10^5$	1,68	$4,33 \times 10^5$	1,75	$4,35 \times 10^5$	1,68
-10	$3,35 \times 10^5$	1,39	$3,55 \times 10^5$	1,43	$3,60 \times 10^5$	1,39
-5	$2,86 \times 10^5$	1,19	$2,93 \times 10^5$	1,18	$3,06 \times 10^5$	1,18
0	$2,41 \times 10^5$	1,00	$2,47 \times 10^5$	1,00	$2,58 \times 10^5$	1,00
10	$1,76 \times 10^5$	0,73	$1,81 \times 10^5$	0,73	$1,89 \times 10^5$	0,73
20	$1,31 \times 10^5$	0,54	$1,38 \times 10^5$	0,56	$1,42 \times 10^5$	0,55
30	$9,98 \times 10^4$	0,41	$1,06 \times 10^5$	0,43	$1,09 \times 10^5$	0,42
40	$7,84 \times 10^4$	0,32	$8,32 \times 10^4$	0,34	$8,52 \times 10^4$	0,33

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão

A Figura 49 apresenta os resultados obtidos nos cálculos do  $N_f$  para cada módulo de rigidez considerado. Percebe-se que quanto maior for este módulo, menor será a deformação de tração e conseqüentemente haverá uma redução na fadiga dos materiais do revestimento, todavia, observa-se que a rigidez acaba deixando de influenciar na análise da fadiga quando a sobrecarga é excessiva.

Já a Figura 50 apresenta os resultados obtidos nas simulações para a análise da fadiga em pavimentos flexíveis, onde os valores do  $N_f$  foram normalizados em função do  $N_f$  calculado para o eixo padrão a fim de facilitar a análise quando realizadas as devidas comparações. Verifica-se uma significativa redução da vida útil do pavimento, que pode chegar a ser três vezes menor quando há sobrecarga de 40%, quando comparada a carga de referência.

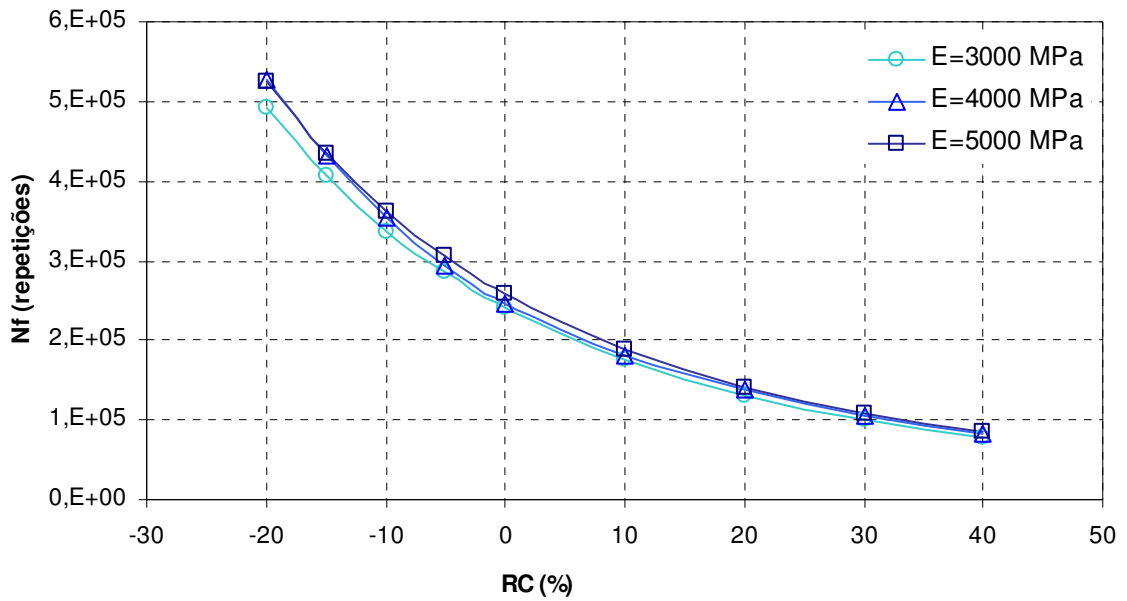


Figura 49 –  $N_f$  calculado para cada módulo de rigidez do ME I, considerando a fadiga

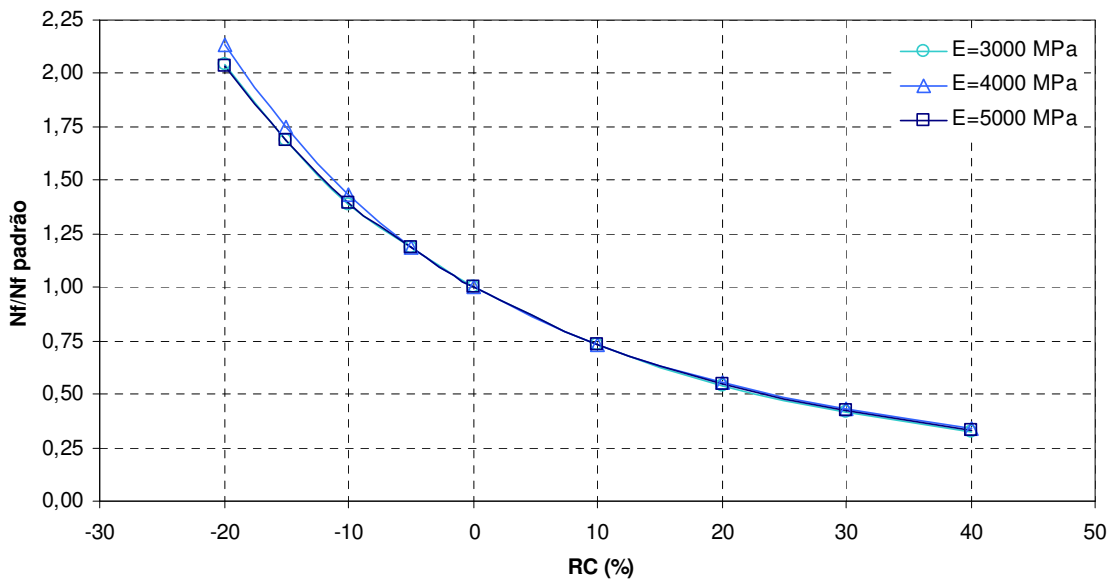


Figura 50 - Relação  $N_f/N_{f \text{ padrão}}$  do ME I, considerando a fadiga

### 5.1.2. Análise da Deformação Permanente

A Tabela 7 mostra os valores do  $N_f$  calculado para os diferentes módulos de rigidez obtidos após a aplicação dos resultados das simulações na função de transferência do modelo de deformação permanente utilizado.

Tabela 7 – Valores do  $N_f$  calculados para os diferentes módulos de rigidez considerando a deformação permanente

RC <sup>1</sup> (%)	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
	$N_f$	$N_f/N_{fpadr\tilde{a}o}$	$N_f$	$N_f/N_{fpadr\tilde{a}o}$	$N_f$	$N_f/N_{fpadr\tilde{a}o}$
-20	$1,60 \times 10^3$	2,72	$1,68 \times 10^3$	2,72	$1,76 \times 10^3$	2,72
-15	$1,22 \times 10^3$	2,07	$1,28 \times 10^3$	2,07	$1,34 \times 10^3$	2,07
-10	$9,44 \times 10^2$	1,60	$9,94 \times 10^2$	1,61	$1,04 \times 10^3$	1,60
-5	$7,41 \times 10^2$	1,26	$7,79 \times 10^2$	1,26	$8,16 \times 10^2$	1,26
0	$5,89 \times 10^2$	1,00	$6,19 \times 10^2$	1,00	$6,49 \times 10^2$	1,00
10	$3,84 \times 10^2$	0,65	$4,04 \times 10^2$	0,65	$4,24 \times 10^2$	0,65
20	$2,60 \times 10^2$	0,44	$2,74 \times 10^2$	0,44	$2,87 \times 10^2$	0,44
30	$1,82 \times 10^2$	0,31	$1,91 \times 10^2$	0,31	$2,00 \times 10^2$	0,31
40	$1,30 \times 10^2$	0,22	$1,37 \times 10^2$	0,22	$1,44 \times 10^2$	0,22

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão

A Figura 51 mostra os resultados das simulações considerando os diferentes módulos de rigidez para a análise da deformação permanente. É possível perceber que, assim como no caso da fadiga, na deformação permanente os diferentes módulos de rigidez considerados não influenciam de forma significativa, ou seja, quando veículos trafegam com sobrecarga excessiva, este acaba sendo o fator de maior influência na degradação dos pavimentos flexíveis.

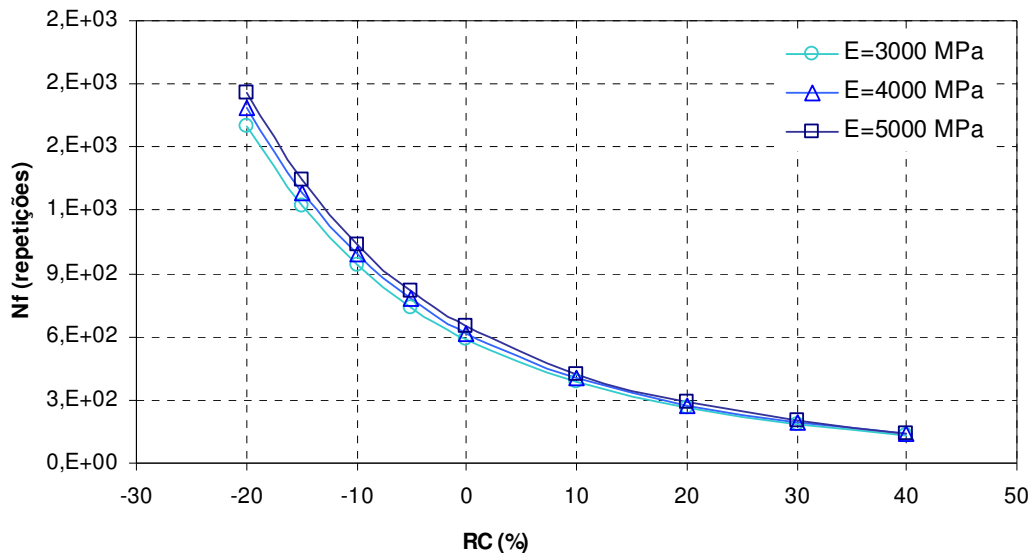


Figura 51 –  $N_f$  calculado para cada módulo de rigidez do ME I, considerando a deformação permanente

Na Figura 52, onde o  $N_f$  calculado para cada módulo foi normalizado em função do  $N_f$  calculado para o eixo padrão, verifica-se que para uma carga com excesso de 40%, a vida útil do pavimento pode ser diminuída cerca de 4,5 vezes em relação a carga padrão.

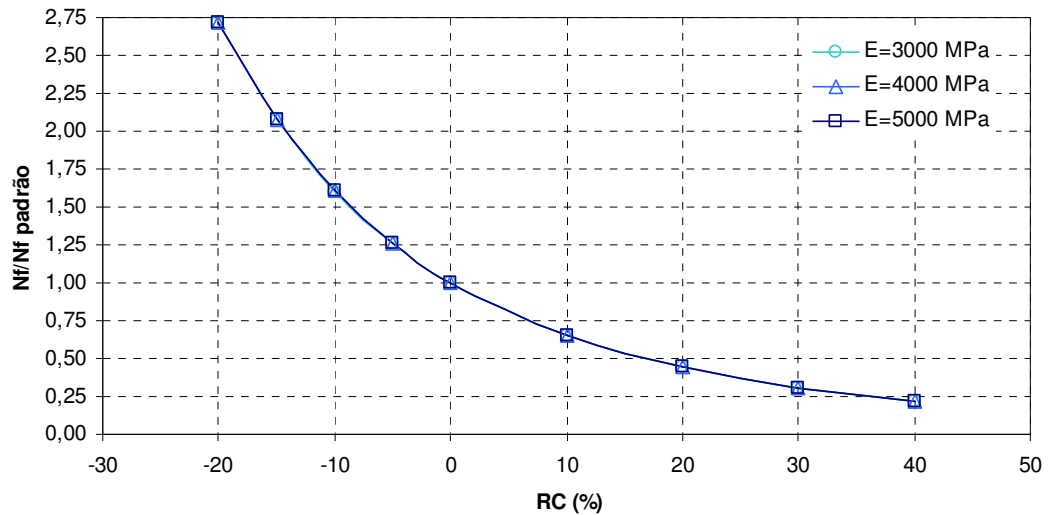


Figura 52 - Relação  $N_f/N_{f \text{ padrão}}$  do ME I, considerando a deformação permanente

## 5.2. RESULTADOS OBTIDOS PARA O MODELO ESTRUTURAL II

No Modelo Estrutural II, onde foram consideradas as diferentes pressões de inflação, e com isso, a variação das áreas de contato, obteve-se para a  $\varepsilon_t$  e para a  $\varepsilon_c$  os valores apresentados nas Tabelas 8 a 10.



Tabela 8 – Valores obtidos nas simulações do ME II para a  $\epsilon_t$  e  $\epsilon_c$  considerando a pressão de inflação de 552 kPa

RC <sup>1</sup> (%)	Carga/ Eixo (kN)	AC <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
				$\epsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\epsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\epsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\epsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\epsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\epsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )
-20	64	0,0369	0,4338	2,93	1,98	2,68	1,96	2,51	1,94
-15	68	0,0376	0,4522	3,05	2,07	2,80	2,04	2,62	2,02
-10	72	0,0383	0,4699	3,17	2,15	2,91	2,12	2,72	2,10
-5	76	0,0390	0,4870	3,29	2,23	3,01	2,20	2,82	2,18
0	80	0,0397	0,5036	3,40	2,30	3,11	2,28	2,92	2,25
10	88	0,0411	0,5349	3,61	2,45	3,31	2,42	3,10	2,39
20	96	0,0425	0,5640	3,81	2,58	3,49	2,55	3,27	2,52
30	104	0,0439	0,5914	3,99	2,70	3,66	2,67	3,43	2,65
40	112	0,0454	0,6170	4,16	2,82	3,81	2,79	3,58	2,76

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão

<sup>2</sup>AC = Área de contato pneu/pavimento

Tabela 9 – Valores obtidos nas simulações do ME II para a  $\epsilon_t$  e  $\epsilon_c$  considerando a pressão de inflação de 620 kPa

RC <sup>1</sup> (%)	Carga/ Eixo (kN)	AC <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
				$\epsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\epsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\epsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\epsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\epsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\epsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )
-20	64	0,0363	0,4402	2,97	2,01	2,72	1,99	2,55	1,97
-15	68	0,0368	0,4617	3,12	2,11	2,85	2,09	2,68	2,06
-10	72	0,0373	0,4827	3,26	2,21	2,98	2,18	2,80	2,16
-5	76	0,0378	0,5032	2,40	2,30	3,11	2,27	2,92	2,25
0	80	0,0382	0,5231	3,53	2,39	3,23	2,36	3,03	2,34
10	88	0,0392	0,5616	3,79	2,57	3,47	2,54	3,26	2,51
20	96	0,0401	0,5983	4,04	2,74	3,70	2,70	3,47	2,68
30	104	0,0411	0,6334	4,28	2,89	3,92	2,86	3,67	2,83
40	112	0,0419	0,6668	4,50	3,05	4,12	3,01	3,87	2,98

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão

<sup>2</sup>AC = Área de contato pneu/pavimento

Tabela 10 – Valores obtidos nas simulações do ME II para a  $\epsilon_t$  e  $\epsilon_c$  considerando a pressão de inflação de 689 kPa

RC <sup>1</sup> (%)	Carga/ Eixo (kN)	AC <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
				$\epsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\epsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\epsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\epsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\epsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\epsilon_c$ (x 10 <sup>-3</sup> )
-20	64	0,0361	0,4435	2,99	2,03	2,74	2,01	2,57	1,98
-15	68	0,0365	0,4652	3,14	2,13	2,88	2,10	2,70	2,08
-10	72	0,0370	0,4865	3,28	2,22	3,01	2,19	2,82	2,18
-5	76	0,0375	0,5072	3,42	2,32	3,14	2,29	2,94	2,27
0	80	0,0379	0,5273	3,56	2,41	3,26	2,38	3,06	2,36
10	88	0,0388	0,5663	3,82	2,59	3,50	2,56	3,28	2,53
20	96	0,0398	0,6033	4,07	2,76	3,73	2,73	3,50	2,69
30	104	0,0407	0,6388	4,31	2,92	3,95	2,89	3,70	2,86
40	112	0,0416	0,6726	4,54	3,07	4,16	3,04	3,90	3,01

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão

<sup>2</sup>AC = Área de contato pneu/pavimento

### 5.2.1. Análise da Fadiga

Na Tabela 11 estão apresentados os resultados do cálculo do  $N_f$  obtidos através da função de transferência do modelo de fadiga do MEPG para os diferentes módulos de rigidez, considerando as diferentes pressões de inflação dos pneus.

Já a Figura 53 expressa os resultados do cálculo do  $N_f$  para cada módulo de rigidez, considerando as diferentes pressões de inflação dos pneus, onde se percebe que os módulos de rigidez continuam não influenciando de forma significativa na análise da fadiga, porém, as pressões de inflação passam a influenciar e ter importância nesta análise.

Através da Figura 54 é possível verificar que, assim como no ME I, no ME II também ocorre a redução da vida útil do pavimento, porém com valores menores para a relação  $N_f/N_{f\text{padrão}}$ , ou seja, para pneus com as pressões de 552, 620 e 689kPa, a vida útil do pavimento quando a sobrecarga é de 40% pode chegar a ser 1,9, 2,0 e 2,2 vezes menor, respectivamente.

Tabela 11 - Valores do  $N_f$  calculados para os diferentes módulos de rigidez e diferentes pressões de inflação dos pneus considerando o trincamento por fadiga.

RC <sup>1</sup> (%)	PI <sup>2</sup> (kPa)	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
		$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$	$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$	$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$
-20	552	$5,21 \times 10^5$	1,61	$5,55 \times 10^5$	1,66	$5,60 \times 10^5$	1,62
-15		$4,56 \times 10^5$	1,41	$4,80 \times 10^5$	1,43	$4,86 \times 10^5$	1,41
-10		$4,02 \times 10^5$	1,24	$4,23 \times 10^5$	1,26	$4,30 \times 10^5$	1,24
-5		$3,61 \times 10^5$	1,11	$3,73 \times 10^5$	1,11	$3,88 \times 10^5$	1,12
0		$3,24 \times 10^5$	1,00	$3,35 \times 10^5$	1,00	$3,46 \times 10^5$	1,00
10		$2,66 \times 10^5$	0,82	$2,73 \times 10^5$	0,81	$2,84 \times 10^5$	0,82
20		$2,19 \times 10^5$	0,68	$2,33 \times 10^5$	0,69	$2,38 \times 10^5$	0,69
30		$1,89 \times 10^5$	0,58	$1,99 \times 10^5$	0,59	$2,04 \times 10^5$	0,59
40		$1,64 \times 10^5$	0,51	$1,74 \times 10^5$	0,52	$1,77 \times 10^5$	0,51
-20	620	$4,98 \times 10^5$	1,74	$5,28 \times 10^5$	1,79	$5,32 \times 10^5$	1,74
-15		$4,24 \times 10^5$	1,48	$4,53 \times 10^5$	1,53	$4,52 \times 10^5$	1,47
-10		$3,67 \times 10^5$	1,28	$3,91 \times 10^5$	1,32	$3,91 \times 10^5$	1,28
-5		$3,24 \times 10^5$	1,13	$3,35 \times 10^5$	1,13	$3,46 \times 10^5$	1,13
0		$2,86 \times 10^5$	1,00	$2,96 \times 10^5$	1,00	$3,06 \times 10^5$	1,00
10		$2,27 \times 10^5$	0,79	$2,33 \times 10^5$	0,79	$2,41 \times 10^5$	0,79
20		$1,81 \times 10^5$	0,63	$1,92 \times 10^5$	0,65	$1,96 \times 10^5$	0,64
30		$1,50 \times 10^5$	0,52	$1,59 \times 10^5$	0,54	$1,63 \times 10^5$	0,53
40		$1,27 \times 10^5$	0,44	$1,35 \times 10^5$	0,46	$1,37 \times 10^5$	0,45
-20	689	$4,87 \times 10^5$	1,75	$5,16 \times 10^5$	1,80	$5,18 \times 10^5$	1,75
-15		$4,15 \times 10^5$	1,49	$4,38 \times 10^5$	1,53	$4,41 \times 10^5$	1,49
-10		$3,59 \times 10^5$	1,29	$3,79 \times 10^5$	1,32	$3,82 \times 10^5$	1,29
-5		$3,18 \times 10^5$	1,14	$3,24 \times 10^5$	1,13	$3,38 \times 10^5$	1,14
0		$2,79 \times 10^5$	1,00	$2,87 \times 10^5$	1,00	$2,96 \times 10^5$	1,00
10		$2,21 \times 10^5$	0,79	$2,27 \times 10^5$	0,79	$2,36 \times 10^5$	0,80
20		$1,77 \times 10^5$	0,63	$1,87 \times 10^5$	0,65	$1,90 \times 10^5$	0,64
30		$1,46 \times 10^5$	0,52	$1,55 \times 10^5$	0,54	$1,59 \times 10^5$	0,54
40		$1,23 \times 10^5$	0,44	$1,31 \times 10^5$	0,46	$1,33 \times 10^5$	0,45

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão

<sup>2</sup>PI = Pressão de inflação do pneu

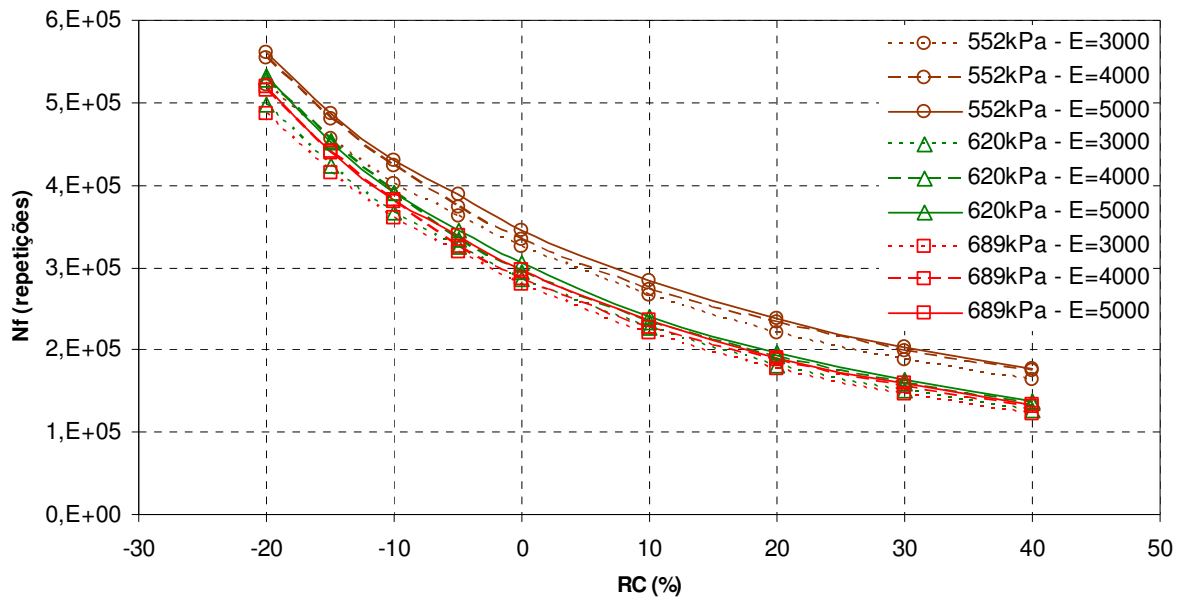


Figura 53 -  $N_f$  calculado para cada módulo de rigidez do ME II, considerando a fadiga

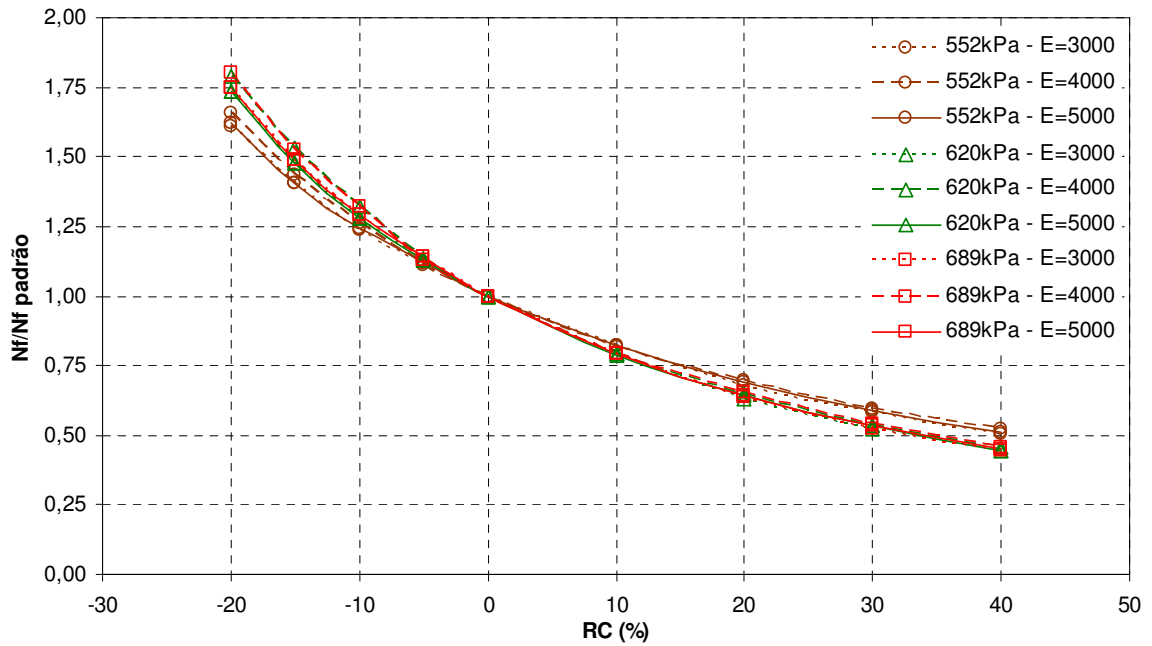


Figura 54 - Relação  $N_f/N_{f \text{ padrão}}$  do ME II, considerando a fadiga

### 5.2.2. Análise da Deformação Permanente

Na Tabela 12 estão os valores do  $N_f$  calculado para os diferentes módulos de rigidez obtidos com a aplicação dos resultados das simulações na função de transferência do modelo de deformação permanente, considerando as pressões de inflação dos pneus.

Tabela 12 – Valores do  $N_f$  calculados para os diferentes módulos de rigidez e diferentes pressões de inflação, considerando a deformação permanente.

RC <sup>1</sup> (%)	PI <sup>2</sup> (kPa)	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
		$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$	$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$	$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$
-20	552	$1,71 \times 10^3$	1,95	$1,81 \times 10^3$	1,95	$1,89 \times 10^3$	1,95
-15		$1,42 \times 10^3$	1,62	$1,50 \times 10^3$	1,62	$1,57 \times 10^3$	1,62
-10		$1,20 \times 10^3$	1,36	$1,26 \times 10^3$	1,37	$1,32 \times 10^3$	1,36
-5		$1,02 \times 10^3$	1,16	$1,07 \times 10^3$	1,16	$1,13 \times 10^3$	1,16
0		$8,79 \times 10^2$	1,00	$9,25 \times 10^2$	1,00	$9,70 \times 10^2$	1,00
10		$6,71 \times 10^2$	0,76	$7,07 \times 10^2$	0,76	$7,41 \times 10^2$	0,76
20		$5,30 \times 10^2$	0,60	$5,57 \times 10^2$	0,60	$5,84 \times 10^2$	0,60
30		$4,29 \times 10^2$	0,49	$4,51 \times 10^2$	0,49	$4,72 \times 10^2$	0,49
40		$3,55 \times 10^2$	0,40	$3,73 \times 10^2$	0,40	$3,91 \times 10^2$	0,40
-20	620	$1,61 \times 10^3$	2,17	$1,69 \times 10^3$	2,17	$1,77 \times 10^3$	2,17
-15		$1,30 \times 10^3$	1,75	$1,37 \times 10^3$	1,75	$1,43 \times 10^3$	1,75
-10		$1,06 \times 10^3$	1,43	$1,12 \times 10^3$	1,43	$1,17 \times 10^3$	1,43
-5		$8,83 \times 10^2$	1,19	$9,29 \times 10^2$	1,19	$9,74 \times 10^2$	1,19
0		$7,42 \times 10^2$	1,00	$7,81 \times 10^2$	1,00	$8,19 \times 10^2$	1,00
10		$5,40 \times 10^2$	0,73	$5,68 \times 10^2$	0,73	$5,95 \times 10^2$	0,73
20		$4,07 \times 10^2$	0,55	$4,28 \times 10^2$	0,55	$4,48 \times 10^2$	0,55
30		$3,15 \times 10^2$	0,42	$3,32 \times 10^2$	0,43	$3,48 \times 10^2$	0,42
40		$2,50 \times 10^2$	0,34	$2,64 \times 10^2$	0,34	$2,76 \times 10^2$	0,34
-20	689	$1,55 \times 10^3$	2,17	$1,64 \times 10^3$	2,17	$1,71 \times 10^3$	2,17
-15		$1,26 \times 10^3$	1,75	$1,32 \times 10^3$	1,75	$1,38 \times 10^3$	1,75
-10		$1,03 \times 10^3$	1,44	$1,08 \times 10^3$	1,44	$1,13 \times 10^3$	1,44
-5		$8,52 \times 10^2$	1,19	$8,97 \times 10^2$	1,19	$9,40 \times 10^2$	1,19
0		$7,16 \times 10^2$	1,00	$7,53 \times 10^2$	1,00	$7,90 \times 10^2$	1,00
10		$5,21 \times 10^2$	0,73	$5,48 \times 10^2$	0,73	$5,74 \times 10^2$	0,73
20		$3,92 \times 10^2$	0,55	$4,13 \times 10^2$	0,55	$4,32 \times 10^2$	0,55
30		$3,03 \times 10^2$	0,42	$3,19 \times 10^2$	0,42	$3,34 \times 10^2$	0,42
40		$2,41 \times 10^2$	0,34	$2,54 \times 10^2$	0,34	$2,66 \times 10^2$	0,34

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão

<sup>2</sup>PI = Pressão de inflação do pneu

Observa-se na Figura 55 que, da mesma forma das análises anteriores, os módulos de rigidez da camada de revestimento deixam de ter significativa influência quando há sobrecarga no veículo.

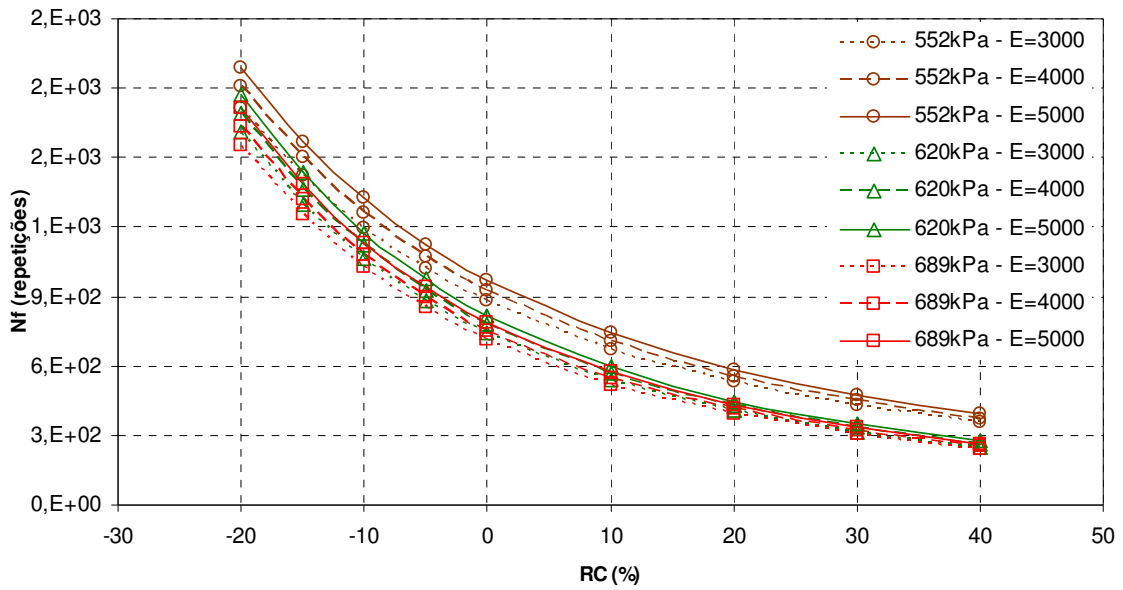


Figura 55 -  $N_f$  calculado para cada módulo de rigidez do ME II considerando a deformação permanente

Já na Figura 56, é possível observar que, ao considerar a análise da deformação permanente, também ocorre uma significativa redução da vida útil do pavimento quando a sobrecarga é excessiva, porém, ao considerarmos as diferentes pressões de inflação dos pneus, está redução é menor do que a obtida através do ME I, ou seja, para uma carga com excesso de 40%, a vida útil do pavimento pode ser reduzida cerca de 2,5 vezes para a pressão de inflação de 552kPa e cerca de 3 vezes para as pressões de 620 e 689 kPa quando comparadas à carga referência.

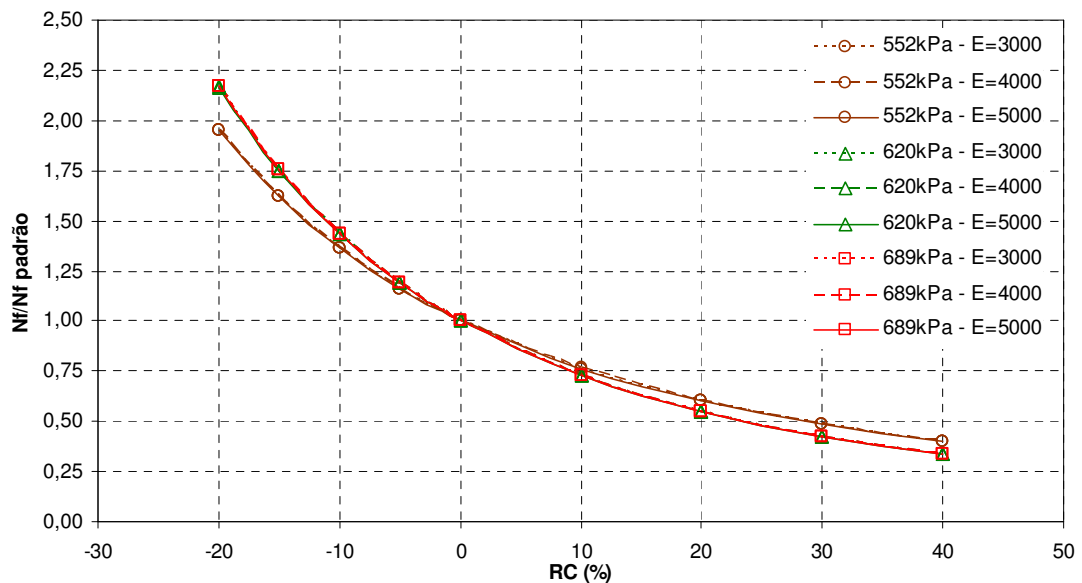


Figura 56 - Relação  $N_f/N_{f \text{ padrão}}$  do ME II considerando a deformação permanente

### 5.3. RESULTADOS OBTIDOS PARA O MODELO ESTRUTURAL III

No Modelo Estrutural III, buscou-se o estudo dos impactos do uso dos pneus extralargos na degradação dos pavimentos flexíveis. Para tanto, analisou-se duas situações distintas (Situação 1 e Situação 2), onde se considerou para cada situação uma área de contato específica.

As Tabelas 13 e 14 apresentam os valores obtidos nas simulações para a  $\varepsilon_t$  e para a  $\varepsilon_c$  considerando as duas situações.

Tabela 13 - Valores obtidos nas simulações do ME III para a  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_c$  considerando a Sit. 1.

RC <sup>1</sup> (%)	Carga/ Eixo (kN)	AC <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
				$\varepsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\varepsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\varepsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\varepsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\varepsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\varepsilon_c$ (x 10 <sup>-3</sup> )
-20	64	0,0889	0,36004	2,45	1,44	2,62	1,42	2,72	1,40
-15	68	0,0889	0,3825	2,61	1,53	2,78	1,51	2,89	1,49
-10	72	0,0889	0,40504	2,76	1,63	2,94	1,60	3,06	1,57
-5	76	0,0889	0,42754	2,91	1,72	3,11	1,69	3,23	1,66
0	80	0,0889	0,45005	3,07	1,81	3,27	1,77	3,40	1,75
10	88	0,0889	0,49505	3,37	1,99	3,60	1,95	3,73	1,92
20	96	0,0889	0,54006	3,68	2,17	3,92	2,13	4,07	2,10
30	104	0,0889	0,58506	3,99	2,35	4,25	2,31	4,41	2,27
40	112	0,0889	0,63007	4,30	2,53	4,58	2,48	4,75	2,45

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão

<sup>2</sup>AC = Área de contato pneu/pavimento

Tabela 14 - Valores obtidos nas simulações do ME III para a  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_c$  considerando a Sit. 2.

RC <sup>1</sup> (%)	Carga/ Eixo (kN)	AC <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
				$\varepsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\varepsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\varepsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\varepsilon_c$ (x10 <sup>-3</sup> )	$\varepsilon_t$ (x10 <sup>-4</sup> )	$\varepsilon_c$ (x 10 <sup>-3</sup> )
-20	64	0,0726	0,44077	3,06	1,62	3,26	1,59	3,34	1,57
-15	68	0,0726	0,46832	3,25	1,72	3,47	1,69	3,55	1,66
-10	72	0,0726	0,49587	3,45	1,82	3,67	1,79	3,76	1,76
-5	76	0,0726	0,52342	3,64	1,92	3,88	1,89	3,96	1,86
0	80	0,0726	0,55096	3,83	2,02	4,08	1,99	4,17	1,96
10	88	0,0726	0,60606	4,21	2,23	4,49	2,19	4,59	2,15
20	96	0,0726	0,66116	4,60	2,43	4,90	2,38	5,01	2,35
30	104	0,0726	0,71625	4,98	2,63	5,30	2,58	5,42	2,54
40	112	0,0726	0,77135	5,36	2,83	5,71	2,78	5,84	2,74

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão

<sup>2</sup>AC = Área de contato pneu/pavimento

### 5.3.1. Análise da Fadiga

Na Tabela 15 encontram-se os valores calculados para o  $N_f$  nas duas situações através da função de transferência do MEPG. O eixo padrão considerado na relação  $N_f/N_{fpadrão}$  continua sendo o eixo citado no ME I.

Tabela 15 – Valores do  $N_f$  calculados para os diferentes módulos de rigidez considerando o trincamento por fadiga nas Situações 1 e 2.

RC <sup>1</sup> (%)	Sit. <sup>2</sup>	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
		$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$	$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$	$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$
-20	1	$9,38 \times 10^5$	3,89	$5,98 \times 10^5$	2,42	$4,30 \times 10^5$	1,66
-15		$7,62 \times 10^5$	3,16	$4,92 \times 10^5$	1,99	$3,52 \times 10^5$	1,36
-10		$6,34 \times 10^5$	2,63	$4,09 \times 10^5$	1,65	$2,92 \times 10^5$	1,13
-5		$5,41 \times 10^5$	2,24	$3,35 \times 10^5$	1,35	$2,48 \times 10^5$	0,96
0		$4,54 \times 10^5$	1,88	$2,84 \times 10^5$	1,15	$2,10 \times 10^5$	0,81
10		$3,34 \times 10^5$	1,38	$2,07 \times 10^5$	0,84	$1,54 \times 10^5$	0,60
20		$2,46 \times 10^5$	1,02	$1,59 \times 10^5$	0,64	$1,16 \times 10^5$	0,45
30		$1,89 \times 10^5$	0,78	$1,22 \times 10^5$	0,49	$8,90 \times 10^4$	0,34
40		$1,47 \times 10^5$	0,61	$9,51 \times 10^4$	0,38	$6,97 \times 10^4$	0,27
-20	2	$4,52 \times 10^5$	1,87	$2,91 \times 10^5$	1,18	$2,19 \times 10^5$	0,85
-15		$3,70 \times 10^5$	1,54	$2,37 \times 10^5$	0,96	$1,79 \times 10^5$	0,69
-10		$3,04 \times 10^5$	1,26	$1,97 \times 10^5$	0,80	$1,48 \times 10^5$	0,57
-5		$2,59 \times 10^5$	1,07	$1,62 \times 10^5$	0,65	$1,27 \times 10^5$	0,49
0		$2,19 \times 10^5$	0,91	$1,37 \times 10^5$	0,55	$1,07 \times 10^5$	0,41
10		$1,60 \times 10^5$	0,67	$1,00 \times 10^5$	0,40	$7,80 \times 10^4$	0,30
20		$1,18 \times 10^5$	0,49	$7,62 \times 10^4$	0,31	$5,85 \times 10^4$	0,23
30		$9,09 \times 10^4$	0,38	$5,88 \times 10^4$	0,24	$4,52 \times 10^4$	0,17
40		$7,14 \times 10^4$	0,30	$4,60 \times 10^4$	0,19	$3,53 \times 10^4$	0,14

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão.

<sup>2</sup>Sit. = Situação.

Na Figura 57 observa-se os resultados do cálculo do  $N_f$  para cada módulo de rigidez, considerando as Situações 1 e 2 da análise. Verifica-se uma significativa importância do módulo de rigidez tanto na Situação 1 quanto na Situação 2, todavia, a medida que a sobrecarga aumenta, a tendência é que o módulo acabe perdendo esta importância, assim como nos demais modelos estruturais analisados.



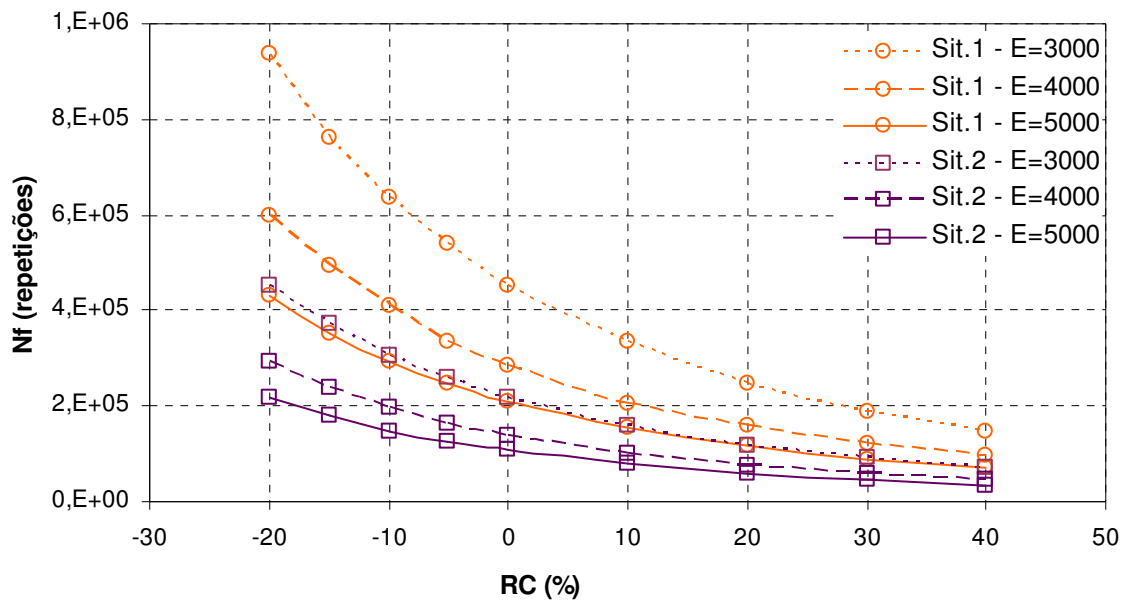


Figura 57 -  $N_f$  calculado para cada módulo de rigidez das Situações 1 e 2 do ME III considerando a fadiga

Através da relação  $N_f/N_{f_{padr\tilde{a}o}}$  apresentada na Figura 58, é possível observar que o pneu extralargo representado na Situação 1 apresenta uma redução da vida útil do pavimento de 1,6, 2,6 e 3,7 vezes para a sobrecarga de 40%, para os módulos de 3000, 4000 e 5000MPa respectivamente. Já o pneu extralargo representado na Situação 2, apresenta uma diminuição da vida útil do pavimento de 3,3, 5,3 e 7,1 vezes para a mesma sobrecarga considerada, para os módulos de 3000, 4000 e 5000 MPa.

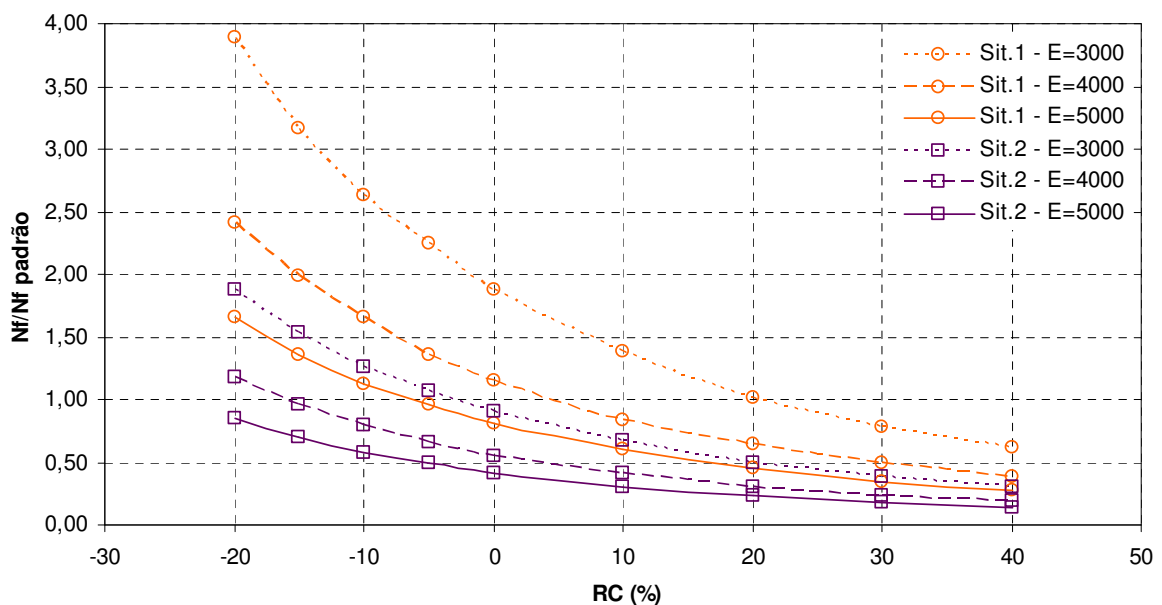


Figura 58 - Relação  $N_f/N_{f_{padr\tilde{a}o}}$  das Situações 1 e 2 do Modelo III considerando a fadiga

### 5.3.2. Análise da Deformação permanente

Os valores calculados para o  $N_f$  considerando a deformação permanente para as Situações 1 e 2 estão expostos na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores do  $N_f$  calculados para os diferentes módulos de rigidez considerando a deformação permanente nas Situações 1 e 2.

RC <sup>1</sup> (%)	Sit. <sup>2</sup>	E = 3000 (MPa)		E = 4000 (MPa)		E = 5000 (MPa)	
		$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$	$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$	$N_f$	$N_f/N_{fpadrão}$
-20	1	$7,11 \times 10^3$	12,08	$7,69 \times 10^3$	12,42	$8,24 \times 10^3$	12,71
-15		$5,42 \times 10^3$	9,21	$5,85 \times 10^3$	9,46	$6,27 \times 10^3$	9,67
-10		$4,19 \times 10^3$	7,12	$4,54 \times 10^3$	7,34	$4,86 \times 10^3$	7,49
-5		$3,29 \times 10^3$	5,59	$3,56 \times 10^3$	5,76	$3,82 \times 10^3$	5,89
0		$2,62 \times 10^3$	4,45	$2,83 \times 10^3$	4,57	$3,03 \times 10^3$	4,67
10		$1,71 \times 10^3$	2,90	$1,85 \times 10^3$	2,99	$1,98 \times 10^3$	3,05
20		$1,16 \times 10^3$	1,97	$1,25 \times 10^3$	2,02	$1,34 \times 10^3$	2,07
30		$8,08 \times 10^2$	1,37	$8,74 \times 10^2$	1,41	$9,36 \times 10^2$	1,44
40		$5,80 \times 10^2$	0,99	$6,28 \times 10^2$	1,01	$6,73 \times 10^2$	1,04
-20	2	$4,26 \times 10^3$	7,24	$4,62 \times 10^3$	7,46	$4,96 \times 10^3$	7,64
-15		$3,25 \times 10^3$	5,52	$3,52 \times 10^3$	5,69	$3,79 \times 10^3$	5,84
-10		$2,52 \times 10^3$	4,27	$2,73 \times 10^3$	4,41	$2,93 \times 10^3$	4,52
-5		$1,98 \times 10^3$	3,36	$2,14 \times 10^3$	3,46	$2,30 \times 10^3$	3,55
0		$1,57 \times 10^3$	2,67	$1,70 \times 10^3$	2,75	$1,83 \times 10^3$	2,82
10		$1,02 \times 10^3$	1,74	$1,11 \times 10^3$	1,79	$1,19 \times 10^3$	1,84
20		$6,94 \times 10^2$	1,18	$7,53 \times 10^2$	1,22	$8,08 \times 10^2$	1,25
30		$4,85 \times 10^2$	0,82	$5,26 \times 10^2$	0,85	$5,65 \times 10^2$	0,87
40		$3,48 \times 10^2$	0,59	$3,77 \times 10^2$	0,61	$4,05 \times 10^2$	0,62

Nota: <sup>1</sup>RC = Relação entre a variação da carga e a carga padrão.

<sup>2</sup>Sit. = Situação.

Através da Figura 59, é possível observar que, para a análise da deformação permanente, os diferentes módulos de rigidez do revestimento não influenciam de forma significativa, ou seja, novamente os módulos de rigidez frente à variação do carregamento adotado (RC) têm importância secundária na  $\epsilon_c$  no topo do subleito e conseqüentemente no valor do  $N_f$ .

Já, através da Figura 60, observa-se que na Situação 1, ocorre uma redução que praticamente não altera a vida útil do pavimento de 0,96 vezes no uso do pneu extralargo, e na Situação 2, 1,61 vezes, quando considerada uma sobrecarga de 40%.

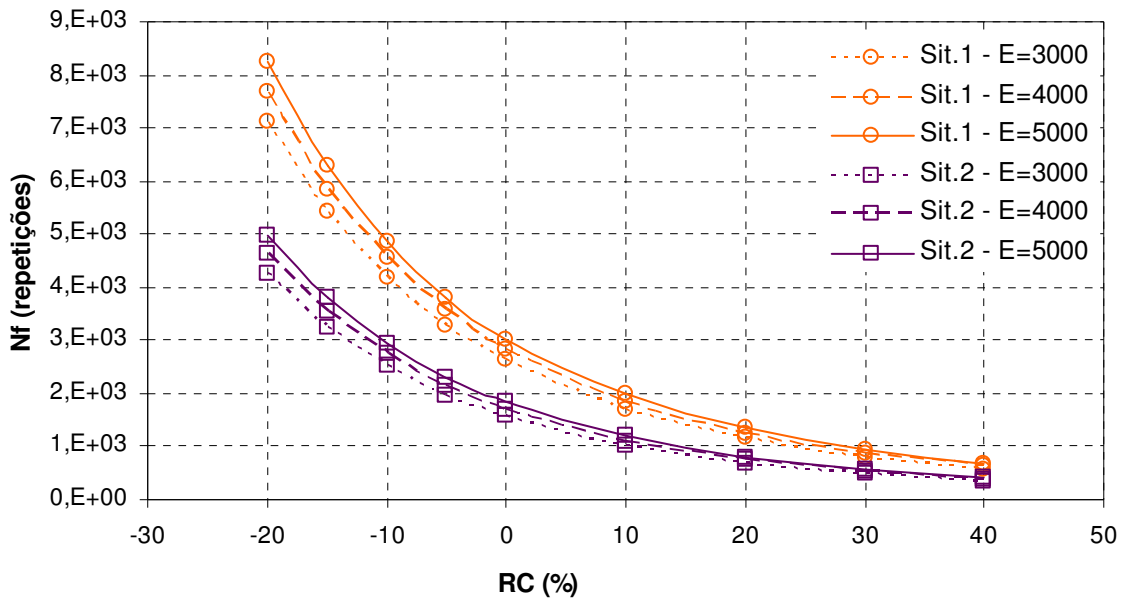


Figura 59 -  $N_f$  calculado para cada módulo de rigidez das Situações 1 e 2 do ME III considerando a deformação permanente

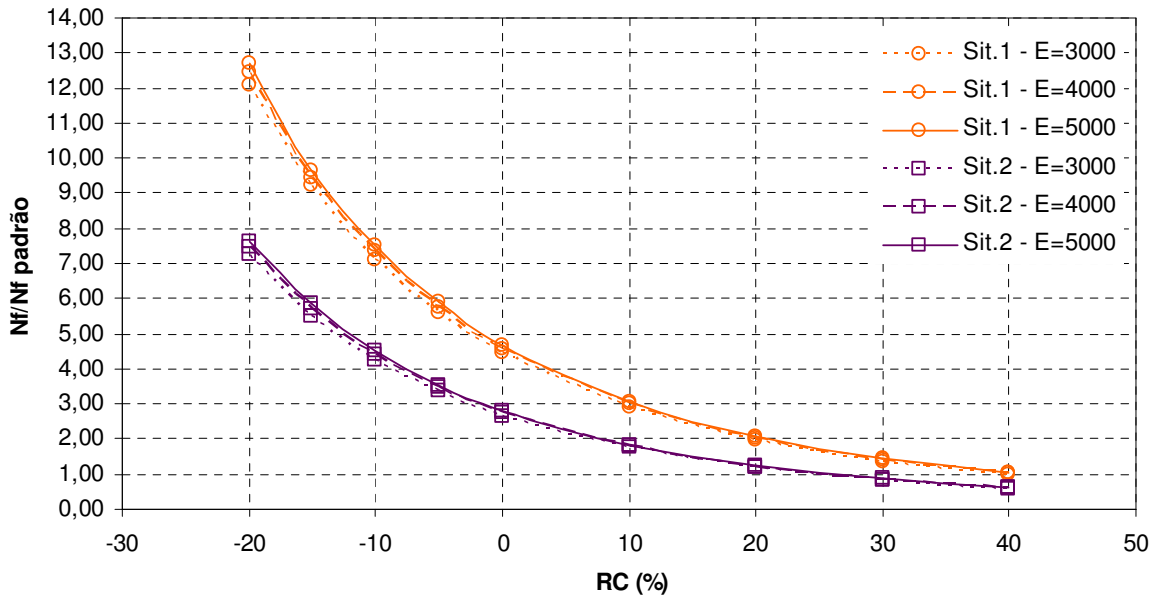


Figura 60 - Relação  $N_f/N_{f\text{ padrão}}$  das Situações 1 e 2 do ME III considerando a deformação permanente

Considerando as análises das Situações 1 e 2, é possível perceber a significativa importância do parâmetro área de contato pneu/pavimento na obtenção da deformação de tração e de compressão, pois uma pequena variação nesta medida é capaz de alterar completamente o resultado da análise.

Vale ressaltar que o pneu extralargo é um produto novo, e em consequência disto, é difícil obter dados precisos sobre a eficiência ou não do seu uso em substituição aos pneus de rodado duplo.

#### **5.4. ANÁLISE GERAL DA FADIGA**

##### **5.4.1. Comparando os Modelos Estruturais I e II**

A Figura 61 apresenta o resumo dos resultados obtidos. No ME I, verificou-se uma significativa redução da vida útil do pavimento, que pode chegar a ser três vezes menor quando há sobrecarga de 40%, quando comparada a carga de referência. Já no ME II, quando são consideradas as pressões de inflação dos pneus, observou-se também a redução da vida útil do pavimento, porém com valores menores de  $N_f/N_{f_{padrão}}$ , ou seja, para pneus com as pressões de 552, 620 e 689kPa, a vida útil do pavimento quando a sobrecarga é de 40% pode chegar a ser 1,9, 2,0 e 2,2 vezes menor, respectivamente.

A diferença de valores de  $N_f/N_{f_{padrão}}$  para cada um dos modelos pode ser explicado em função de que no ME I, a área de contato pneu/pavimento foi considerada a mesma, independente do carregamento e da pressão de inflação, enquanto que, no ME II, quando consideradas as pressões de inflação e conseqüentemente as diferentes áreas de contato para cada carregamento, foi possível refinar a análise, ou seja, chegou-se a dados mais próximos da realidade, já que os pneus são flexíveis e se deformam em contato com a superfície dependendo da sobrecarga e de sua pressão de inflação.

Para os valores do módulo de rigidez utilizados observou-se que, quanto maior for este módulo, menor será a deformação de tração e conseqüentemente haverá uma redução na fadiga dos materiais do revestimento, tanto no ME I quanto no ME II, todavia, observa-se que a rigidez acaba deixando de influenciar na análise da fadiga quando a sobrecarga é excessiva.

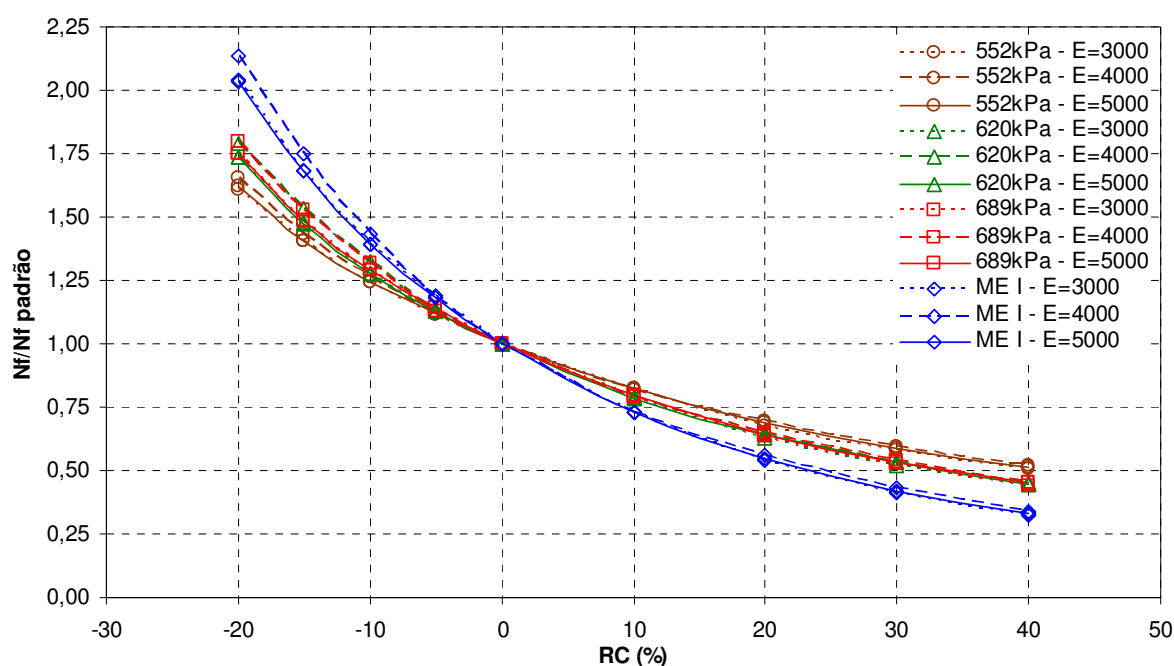


Figura 61 - Relação  $N_f/N_{f\text{ padrão}}$  dos Modelos I e II para a fadiga

#### 5.4.2. Comparando os Modelos Estruturais I e III

A Figura 62 apresenta o resumo dos resultados obtidos na análise da fadiga para os Modelos I e III, onde os valores do  $N_f$  foram normalizados em função do  $N_f$  calculado para o eixo padrão. Quando comparados o uso dos pneus de rodado duplo com o uso dos pneus extralargos, verifica-se que, quando considerado o uso do pneu padrão de rodado duplo (ME I), a vida útil do pavimento chega a ser 3 vezes menor quando há uma sobrecarga de 40% se comparada com a carga de referência, sem significativa influência dos diferentes módulos de rigidez. Já para o ME III, a Situação 1 apresenta uma redução da vida útil do pavimento de 1,6, 2,6 e 3,7 vezes e a Situação 2, 3,3, 5,3 e 7,1 vezes para a sobrecarga já mencionada e para os módulos de 3000, 4000 e 5000MPa respectivamente.

Para o ME III verifica-se uma significativa importância do módulo de rigidez, todavia, à medida que a sobrecarga aumenta, a tendência é que o módulo acabe perdendo esta importância, ou seja, na Situação 1, o pneu extralargo demonstra melhor desempenho para módulos de rigidez menores se comparado ao ME I, demonstrando que, para revestimentos menos rígidos, o pneu extralargo seria uma boa opção para a diminuição da degradação

asfáltica. Já na Situação 2, apesar da influência dos módulos de rigidez, o uso do pneus extralargo seria de qualquer forma mais agressivo ao pavimento.

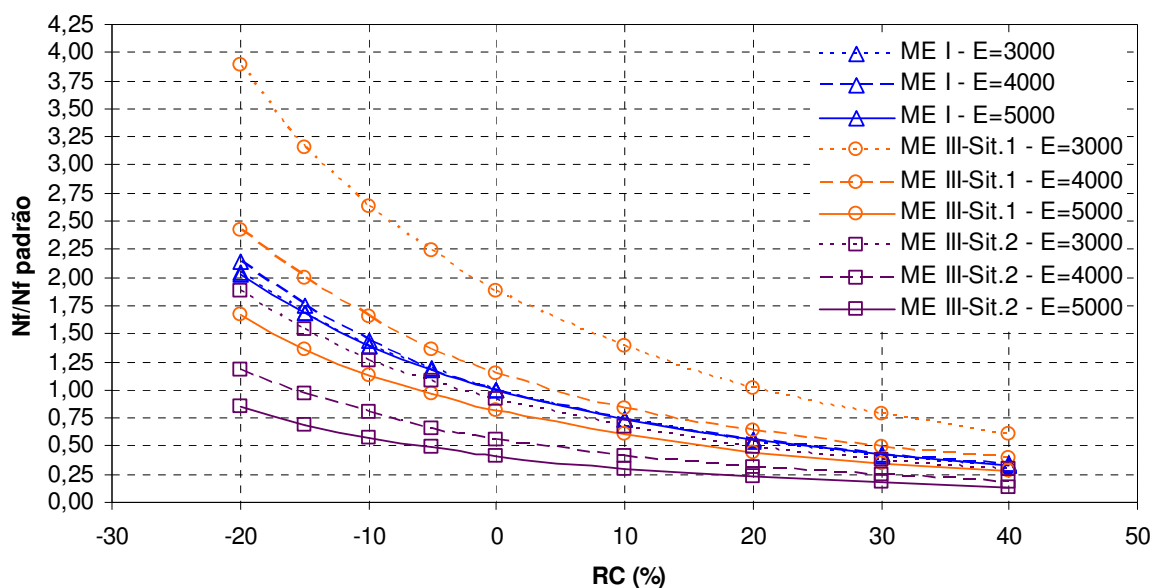


Figura 62 - Relação  $N_f/N_{f\text{ padrão}}$  dos Modelos I e III para a fadiga

## 5.5. ANÁLISE GERAL DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE

### 5.5.1. Comparando os Modelos Estruturais I e II

Observa-se na Figura 63 o resumo dos resultados obtidos nos Modelos I e II para a deformação permanente. No ME I, a redução da vida útil do pavimento é de 4,5 vezes em relação à carga padrão e no ME II, esta redução é de 2,5 vezes para a pressão de inflação de 552kPa e de 3 vezes para as pressões de 620 e 689 kPa. Desta forma é possível verificar que a pressão de inflação tem significativa importância na análise da deformação permanente em pavimentos flexíveis, assim como o excesso de carga nas rodovias. A consideração da variação da área de contato pneu/pavimento faz com que os dados sejam mais precisos, dando mais confiabilidade aos resultados.

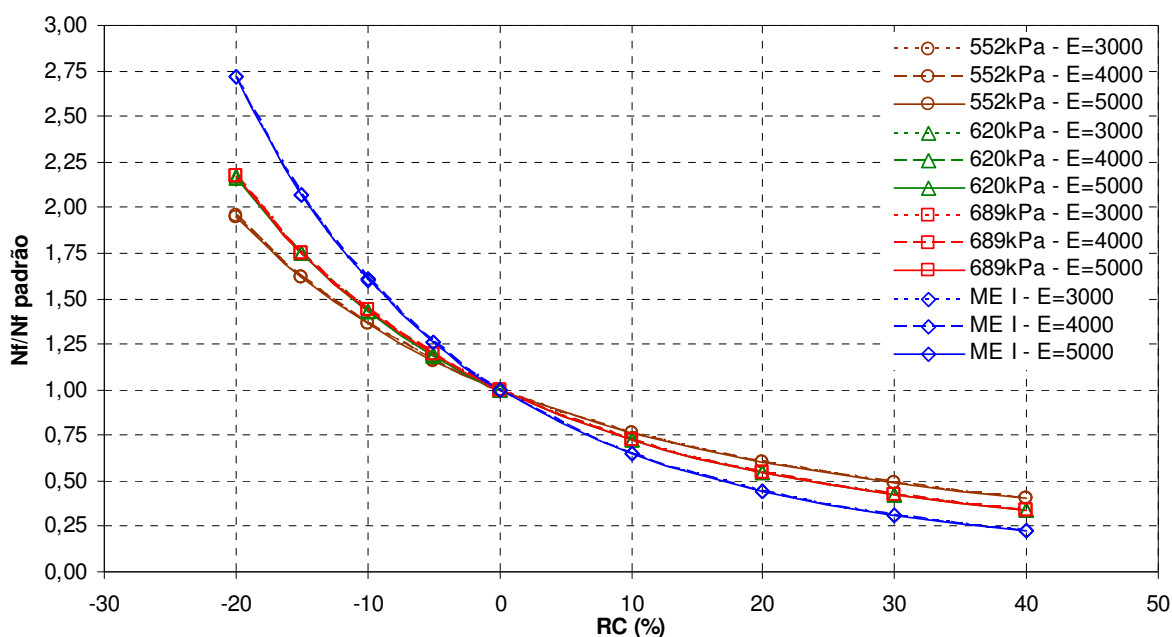


Figura 63 - Relação  $N_f/N_{f \text{ padrão}}$  dos Modelos I e II para a deformação permanente

### 5.5.2. Comparando os Modelos Estruturais I e III

Os resultados obtidos na análise da deformação permanente estão representados na Figura 64, onde é possível verificar uma redução de 4,5 vezes na vida útil do pavimento quando utilizados o pneu padrão (ME I). No ME II, na Situação 1, observou-se uma redução pouco significativa, ou seja, o valor de 0,96 vezes praticamente não altera a vida útil do pavimento, e na Situação 2, 1,61 vezes, quando considerada uma sobrecarga de 40%, sendo que em ambas as análises observou-se que os diferentes módulos de rigidez não influenciam de forma significativa pois a deformação de compressão responsável por ocasionar a deformação permanente ocorre no topo do subleito.

Ao compararmos os Modelos I e III, percebe-se que tanto na Situação 1 quanto na 2, o uso do pneu extralargo possui melhor desempenho do que o pneu de rodado duplo. Sendo assim, quando considerada as análises da deformação permanente, o pneu extralargo pode contribuir para a diminuição da degradação, porém, quando há sobrecarga em demasiado excesso, esta continua sendo a maior causa dos danos causados aos pavimentos flexíveis.

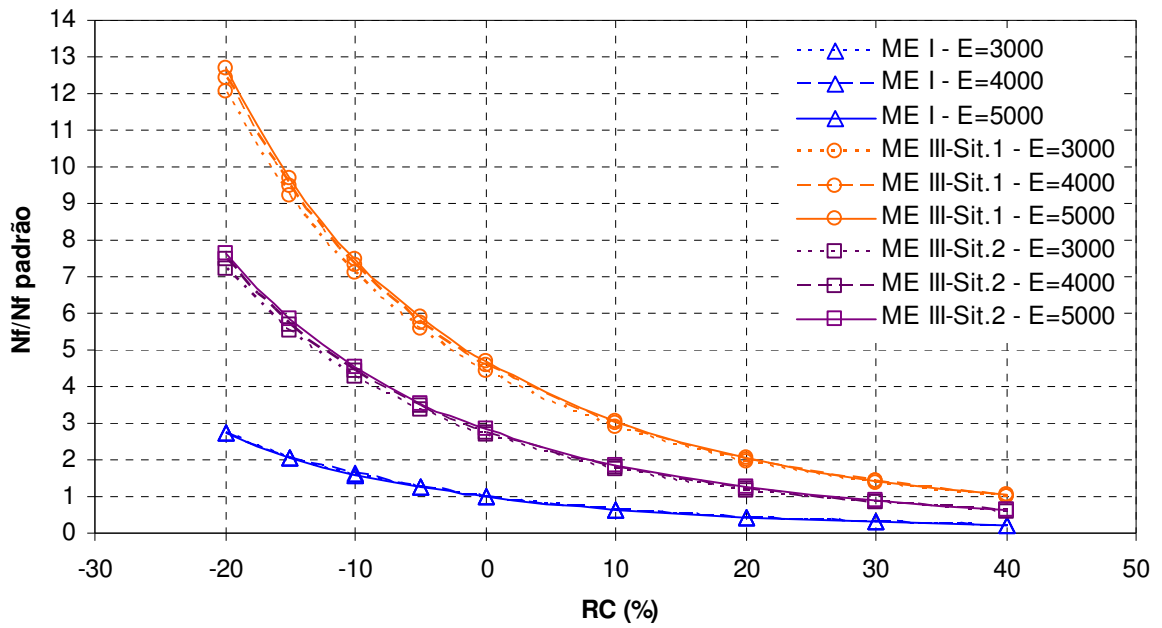


Figura 64 - Relação  $N_f/N_{f\text{ padrão}}$  dos Modelos I e III para a deformação permanente

Mas, apesar de o uso do pneu extralargo demonstrar melhor desempenho nas análises realizadas neste trabalho, ainda não é possível afirmar que o seu uso é o mais recomendado para garantir uma maior durabilidade dos pavimentos flexíveis, pois constatou-se que qualquer variação na área de contato pneu/pavimento, pressão de inflação e nos módulos de rigidez das camadas podem causar significativas mudanças nos resultados das análises. Para que afirmações do tipo possam ser feitas, ainda é preciso que haja mais pesquisas sobre o tema e coleta de dados experimentais.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho avaliou a sobrecarga de eixo rodoviário através da utilização do *Software ANSYS*, considerando três diferentes modelos estruturais e obteve as seguintes conclusões:

- Considerando o Modelo Estrutural I, para uma sobrecarga de 40%, a redução da vida útil do pavimento é cerca de 3 vezes menor para a fadiga e 4,5 vezes menor para a deformação permanente se comparada a carga padrão. Porém, neste modelo há uma super estimativa dos valores devido a não variação da área de contato pneu/pavimento.
- Considerando o Modelo Estrutural II, a redução da vida útil do pavimento para a fadiga é de 1,9, 2 e 2,2 vezes e, para a deformação permanente é de 2,5 e 3 vezes para as pressões de 552, 620 e 698kPa respectivamente. Através deste modelo estrutural foi possível refinar a análise devido à consideração das diferentes áreas de contato, ou seja, chegou-se a dados mais precisos, pois os pneus tendem a se deformarem em contato com a superfície, dependendo da pressão de inflação e também da carga.
- Em ambos os Modelos Estruturais I e II, verifica-se que os módulos de rigidez das camadas acabam perdendo sua influência na análise da vida de fadiga e também da deformação permanente quando a carga está com demasiado excesso.
- No Modelo Estrutural III, quando considerados o uso de pneus extralargos, verifica-se a significativa importância dos módulos de rigidez utilizados no revestimento e também das diferentes áreas de contato pneu/pavimento (Situações 1 e 2) na análise da fadiga, pois para módulos menores, observa-se uma redução na vida de fadiga dos materiais asfálticos, porém, com o aumento da sobrecarga, os módulos de rigidez acabam perdendo a importância na análise deste dano. Já na análise da deformação permanente, os módulos de rigidez não têm grande influência, porém, as áreas de contato continuam tendo grande importância.
- Verificou-se também que a tolerância máxima de 7,5% sobre o limite máximo do peso bruto transmitido por eixo incide sobre a vida útil do pavimento diminuindo-a, assim como ocorre com qualquer percentual de excesso de carga por menor que seja.
- Em relação ao MEF, este se mostrou bastante eficiente nas análises feitas, mostrando-se extremamente sensível a qualquer mudança nos parâmetros estudados.

Ao concluir este trabalho, é possível afirmar que, dentre os parâmetros estudados, o excesso de carga nas rodovias é a principal causa de danos como o trincamento por fadiga e o afundamento em trilha de roda em pavimentos flexíveis.

Desta forma, reforça-se neste trabalho, a importância do controle efetivo das cargas rodoviárias, de maneira que as rodovias brasileiras possam efetivamente cumprir seu importante papel no transporte de bens e pessoas.

### ***6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS***

As perspectivas para a continuação da pesquisa são:

- Construir um modelo estrutural tridimensional;
- Avaliar os efeitos do módulo de rigidez da camada de base;
- Avaliar as causas que contribuem para que o trincamento por fadiga ocorra de cima para baixo na camada de revestimento.

## REFERÊNCIAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO guide for design of pavement structures**. Washington, USA, 1986.

ALBANO, J. F. **Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos**. Tese de Doutorado. UFRGS, Porto Alegre, 2005.

ALBANO, J. F. **Efeitos da Variação da Carga por Eixo, Pressão de Inflação e Tipo de Pneu na Resposta Elástica de um Pavimento**. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre, 1998.

ASPHALT INSTITUTE. **Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing**. Superpave Series No. 1 (SP1). USA, 1994.

ASSAN, A. E. **Método dos Elementos Finitos: primeiros passos**. 2 ed. São Paulo: Unicamp, 2003.

AYRES JR., M. **Development of a rational probabilistic approach for flexible pavement analysis**. Ph.D. Dissertation, University of Maryland, College Park, E.U.A., 1997.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BEER, F. P; JOHNSTON JR, E. R. **Resistência dos Materiais**. 3 ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1995.

BERNUCCI, L. B., *et al*, **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, Abeda, 2006.

BRITO, L. A. T. ; DAWSON, A. R. ; KOLISOJA, P. J. . **Analytical Evaluation of Unbound Granular Layers in Regard to Permanent Deformation**. In: Bearing Capacity of Roads,

Railways and Airfields (BCR2A), 2009, Urbana-Champaign. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCR A). Leiden, Netherlands : CRC Press/Balkema, 2009. v. 1. p. 187-196.

CERATTI, J.A.P., **Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Postos de Pesagem**. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/Pesagem/postos/index.asp>. Acesso em 01 de fevereiro de 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO – DENATRAM. **Código de Trânsito Brasileiro**. Disponível em <http://www.denatran.gov.br/ctb.htm>. Acesso em 04 de fevereiro de 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO – DENATRAM. **Resoluções do Contran**. Disponível em <http://www.denatran.gov.br/resolucoes.htm>. Acesso em 04 de fevereiro de 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual\\_de\\_Restauracao.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Restauracao.pdf) . Acesso em 19 de dezembro de 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentação**. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentacao%2005.12.06.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentacao%2005.12.06.pdf) . Acesso em 27 de dezembro de 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Estudos de Tráfego**. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/manual\\_estudos\\_trafego.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/manual_estudos_trafego.pdf) . Acesso em 27 de dezembro de 2008.

ESPINDULA, M. L. **Aplicação da Mecânica dos Meios Particulados no Cálculo de Empuxo**. Dissertação de Mestrado. UNIJUÍ, Ijuí, 2007.

FRANCO, F.A.C.P., **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. Tese de Doutorado. COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F.A.C.P., **Um Sistema para Análise Mecanística de Pavimentos Asfálticos**. Dissertação de M.Sc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

HUANG, Y. H., **Pavements Analysis and Design**. 2nd Ed., Prentice Hall Inc. New Jersey, E.U.A, 2003.

KIM, M.; TUTUMLUER, E.; KWON, J., **Nonlinear Pavement Foundation Modeling for Three-Dimensional Finite-Element Analysis of Flexible Pavements**. International Journal of Geomechanics, 2009.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2 ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

LEAHY, R. B., **Permanent deformation characteristics of asphalt concrete**. Ph.D. Dissertation, University of Maryland, College Park, E.U.A., 1989.

MEPDG, **National Research Council, guide for mechanistic-empirical pavement design**, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 2004.

MONISMITH, C. L. e BROWN, S. F., **“Developments in the structural design and rehabilitation of asphalt pavements over three quarters of a century”**. In: The Association of Asphalt Paving Technologists, 75th Anniversary Volume, March, 1999.

NCHRP, 2004, **Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures: Program 1-37A, Final Report**. Washington, 2004. 39 v. Disponível em: <<http://www.trb.org/mepdg/guide.htm>>.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A., **Pavement Design and Materials**. Texas, Wiley, 2008.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.

REDDY, J. N. **An Introduction to the Finite Element Method**. Virginia Polytechnic Institute and State University. McGraw-Hill Book Company, 1984.

RODRIGUES, R.M. **Notas de Aula do curso de pavimentação**. Parte III, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Infra-estrutura Aeronáutica, S. José dos Campos, SP, 1998.

SILVA, J. M. L. **Simulações Numéricas de Fundações Contínuas sobre um Sistema de Dupla Camada, sendo a Superior Cimentada**. Dissertação de Mestrado. UNIJUÍ, Ijuí, 2002.

SORIANO, H. L. **Método de Elementos Finitos em Análises de Estruturas**. São Paulo, Edusp, 2003.

SWANSON ANALYSIS SYSTEMS, Inc. **Getting Started for Revision 5.1**. Houston, 1994.

TIMOSHENKO, S.P. GOODIER, J.N. **Theory of Elasticity**. McGraw-Hill, N.Y., 1970.

TRICHÊS, G., 1994, **Propriedades mecânicas de misturas de concreto cimento compactado a rolo**. In: Anais da 28ª Reunião Anual de Pavimentação - ABPV, Volume 2, 1994.

TSENG, K. H. e LYTTON, R. L., **Prediction of permanent deformation in flexible pavement materials**. In: Implication of aggregates in the design, construction and performance of flexible pavements, ASTM STP 1016, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989.

VASSOLER, G., **Análise Numérica do Comportamento Mecânico de Pavimentos Submetidos a Variação de Temperatura**. UNIJUÍ, Ijuí, 2008.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. New York: John Wiley & Sons Inc., ed. 2, 1975.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)