

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

Emerson Edinei Marodin

**ALTERNATIVA DE DIMENSIONAMENTO PARA O
PAVIMENTO DA BR-448: ANÁLISE MECANÍSTICA COM
APLICAÇÃO DE BGTC**

Porto Alegre
dezembro 2010

EMERSON EDINEI MARODIN

**ALTERNATIVA DE DIMENSIONAMENTO PARA O
PAVIMENTO DA BR-448: ANÁLISE MECANÍSTICA COM
APLICAÇÃO DE BGTC**

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

Orientador: Washington Peres Núñez

Porto Alegre
dezembro 2010

EMERSON EDINEI MARODIN

**ALTERNATIVA DE DIMENSIONAMENTO PARA O
PAVIMENTO DA BR-448: ANÁLISE MECANÍSTICA COM
APLICAÇÃO DE BGTC**

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

Porto Alegre, 20 de dezembro de 2010

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela UFRGS
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

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

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

Profa. Suyen Matsumura Nakahara (UFRGS)
Dra. pela Universidade de São Paulo (USP)

Dedico este trabalho a meus pais, João e Edith, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Washington Peres Núñez, orientador deste trabalho pela sua disponibilidade e, acima de tudo, por sua segurança e conhecimento, os quais foram de extrema importância ao desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Professora Carin Schmitt por suas aulas teóricas e pela disponibilidade sempre que as dúvidas surgiam.

Não sabendo que era impossível, foi lá e fez.

Jean Cocteau

RESUMO

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

Considerando a necessidade de melhoria da qualidade das rodovias brasileiras e a importância da ampliação do sistema de infraestrutura de transportes, novos materiais são estudados e empregados nos projetos de pavimentos rodoviários. Assim, este trabalho tem enfoque na aplicação de brita graduada tratada com cimento (BGTC) na camada de base da Rodovia BR-448 com pavimento do tipo flexível já projetado constituído por revestimento asfáltico, base de brita graduada, sub-base com macadame seco, camada final de terraplenagem e aterro, buscando otimizá-lo. Três estruturas de pavimento são propostas: a primeira do tipo semi-rígida com 11 cm de concreto asfáltico e 33 cm de brita graduada tratada com cimento (BGTC); a segunda do tipo semi-rígida invertida com 11 cm de concreto asfáltico e 33 cm de BGTC; e a terceira do tipo semi-rígida com 11 cm de concreto asfáltico e 17 cm de BGTC. Com emprego do *software* EVERSTRESS 5.0 para as análises mecânicas, determinaram-se as respostas estruturais (deflexões, tensões e deformações) nas camadas de concreto asfáltico da estrutura projetada e de BGTC da estrutura projetada e das três propostas. A partir dos dados de saída do *software* utilizam-se os critérios estabelecidos através de modelos de fadiga, para estimar a durabilidade do pavimento. Os resultados adquiridos através dos modelos de fadiga são comparados com os adquiridos para o pavimento projetado, podendo concluir se o pavimento proposto com materiais novos será mais durável, em relação à vida de fadiga, que o pavimento projetado para a via. Como resultado do trabalho, as propostas 1 e 2 satisfazem o volume de tráfego mínimo estabelecido para via e apresentam melhor desempenho em relação a fadiga que a estrutura projetada para a BR-448. Já a proposta 3 não atende o volume de tráfego estabelecido para via ($N_{AASHTO} = 2,45 \times 10^7$), não sendo recomendado seu uso. Concluiu-se, ainda, que a estrutura que apresenta melhores resultados é a proposta 2 do tipo semi-rígida invertida, por apresentar melhor desempenho em relação à reflexão de trincas no concreto asfáltico, ou seja, menor reflexão para a superfície.

Palavras-chave: respostas estruturais; análises mecânicas; vida de fadiga; volume de tráfego.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama de etapas da pesquisa	18
Figura 2: (a) campo de tensões de pavimento flexível; (b) campo de tensões de pavimento rígido.....	21
Figura 3: (a) veículos utilizados pela AASHO em pistas experimentais; (b) veículo de carga usado atualmente.....	24
Figura 4: tipos de pavimento semi-rígido.....	25
Figura 5: corpo-de-prova extraído de pista mostrando as camadas do revestimento.....	26
Figura 6: classificação de bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas.....	27
Figura 7: fluxograma de dimensionamento mecânico de pavimentos.....	30
Figura 8: ciclo de vida de um pavimento com intervenções.....	33
Figura 9: tela de entrada das características do pavimento.....	34
Figura 10: tela de entrada das cargas e pontos de avaliação.....	35
Figura 11: evolução das fissuras e trincas em um pavimento flexível.....	37
Figura 12: dano causado por fadiga em um pavimento flexível.....	38
Figura 13: (a) tensões no concreto asfáltico com eixo simples; (b) tensões no concreto asfáltico com eixo tandem.....	38
Figura 14: estrutura de pavimento projetada (tipo flexível).....	50
Figura 15: estrutura de pavimento proposto 1 e 3 (tipo semi-rígida).....	51
Figura 16: estrutura de pavimento proposto 2 (tipo semi-rígida invertida).....	52
Figura 17: coordenadas da carga aplicada.....	57
Figura 18: pontos críticos de análise da estrutura projetada (tipo flexível).....	58
Figura 19: pontos críticos de análise da estrutura proposta 1 (tipo semi-rígida).....	58
Figura 20: pontos críticos de análise da estrutura proposta 2 (tipo semi-rígida invertida).....	59
Figura 21: pontos críticos de análise da estrutura proposta 3 (tipo semi-rígida).....	59
Figura 22: volume de tráfego para espessuras de 17 a 19 cm de concreto asfáltico da estrutura projetada (tipo flexível).....	60
Figura 23: volume de tráfego para espessuras de 25 a 33 cm de BGTC da estrutura proposta 1 (tipo semi-rígida).....	61
Figura 24: volume de tráfego para espessuras de 25 a 33 cm de BGTC da estrutura proposta 2 (tipo semi-rígida invertida).....	62
Figura 25: volume de tráfego para espessuras de 11 a 15 cm de concreto asfáltico da estrutura proposta 3 (tipo semi-rígida).....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: evolução da rede rodoviária brasileira (em km)	23
Quadro 2: categorias de estradas e nível de confiabilidade do modelo mecânico.....	43
Quadro 3: coeficientes de regressão geral para a fadiga em concreto asfáltico.....	45
Quadro 4: fatores de correção para o modelo de deformação horizontal de extensão no concreto asfáltico.....	46
Quadro 5: FC para o modelo de deformação horizontal de extensão na BGTC.....	48
Quadro 6: espessura das camadas das estruturas propostas 1, 2 e 3.....	55
Quadro 7: módulos de resiliência das estruturas propostas 1, 2 e 3.....	56
Quadro 8: coeficientes de <i>Poisson</i> das estruturas propostas 1, 2 e 3.....	56
Quadro 9: respostas estruturais da estrutura projetada (tipo flexível).....	60
Quadro 10: respostas estruturais da estrutura proposta 1 (tipo semi-rígida).....	61
Quadro 11: respostas estruturais da estrutura proposta 2 (tipo semi-rígida invertida).....	62
Quadro 12: respostas estruturais da estrutura proposta 3 (tipo semi-rígida).....	63

LISTA DE SIGLAS

AASHO: *American Association of State Highway Officials*

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

BGS: brita graduada simples

BGTC: brita graduada tratada com cimento

CBR: *California Bearing Ratio*

CBUQ: concreto betuminoso usinado a quente

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

USACE: *United States Army Corps of Engineers*

WSDOT: *Washington State Department of Transportation*

CAP: cimento asfáltico de petróleo

HVS: *heavy vehicle simulator*

LISTA DE SÍMBOLOS

N	número de repetições dos eixos dos veículos
V_t	volume total de veículos em todo período de projeto
F_v	fator de veículos
F_r	fator climático regional
F_e	fator de eixos
F_c	fator de cargas
M_R	módulo de deformação resiliente
σ_d	tensão-desvio
ϵ_1	deformação resiliente axial
σ_1	tensão principal
σ_3	tensão de confinamento
Δ_h	deslocamento vertical máximo
h_0	altura de referência do corpo-de-prova cilíndrico
P	carga vertical repetida
Δ_e	deslocamento elástico ou resiliente
H	altura do corpo-de-prova
μ	coeficiente de <i>Poisson</i>
σ	tensão
ϵ	deformação
U_z	deformação superficial

N_{AASHTO}	número de repetições de carga da AASHTO
ϵ_h	deformação horizontal de extensão
$N_{i AASHTO}$	número de repetições de carga da AASHTO do início do trincamento
$\mu\epsilon$	<i>microstrain</i>
σ_t	tensão horizontal de tração
σ_{tadm}	tensão horizontal de tração admissível
σ_{tadm}	tensão horizontal de tração admissível
σ_v	tensão vertical de compressão
UCS	resistência à compressão simples
kPa	quilopascal
ϵ_h	deformação horizontal de extensão
ϵ_b	deformação limite de ruptura
P_{atm}	pressão atmosférica
MPa	megapascal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 MÉTODO DE PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	16
2.2.1 Objetivos Principal	16
2.2.2 Objetivos Secundários	16
2.3 PRESSUPOSTO	17
2.4 DELIMITAÇÕES	17
2.5 LIMITAÇÕES	17
2.6 DELINEAMENTO	17
3 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	20
3.1 BREVE HISTÓRICO.....	21
3.2 PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS.....	24
3.2.1 Revestimentos asfálticos	25
3.2.2 Bases e sub-bases granulares	26
3.3 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO.....	27
3.3.1 Número N	31
3.3.2 Ciclo de vida de um pavimento	32
3.3.3 Software EVERSTRESS 5.0	33
3.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	35
3.5 FADIGA.....	39
4 MODELOS DE FADIGA E ESTRUTURAS ANALISADAS	42
4.1 MODELOS DE FADIGA.....	42
4.1.1 Concreto asfáltico	43
4.1.1.1 Deflexão superficial (U_z).....	43
4.1.1.2 Deformação horizontal de extensão (ϵ_h).....	44
4.1.1.3 Tensão horizontal de tração (σ_t).....	46
4.1.2 BGTC	46
4.1.2.1 Tensão vertical de compressão (σ_v).....	47
4.1.2.2 Deformação horizontal de extensão (ϵ_h).....	47
4.1.2.3 Tensão horizontal de tração (σ_t).....	49
4.2 ESTRUTURA PROJETADA.....	49
4.3 ESTRUTURAS PROPOSTAS.....	50

4.3.1 Estrutura proposta 1 – semi-rígida com 11 cm de concreto asfáltico e 33 cm de BGTC.....	50
4.3.2 Estrutura proposta 2 – semi-rígida invertida com 11 cm de concreto asfáltico e 33 cm de BGTC.....	51
4.3.3 Estrutura proposta 3 – semi-rígida com 11 cm de concreto asfáltico e 17 cm de BGTC.....	52
5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS.....	53
5.1 APLICAÇÃO DO SOFTWARE EVERSTRESS 5.0.....	54
5.1.1 Parâmetros de entrada.....	54
5.1.1.1 Espessura.....	54
5.1.1.2 Módulo de resiliência.....	55
5.1.1.3 Coeficiente de <i>Poisson</i>	56
5.1.1.4 Carregamento	56
5.1.1.5 Raio de aplicação da carga.....	57
5.1.1.6 Pontos críticos	58
5.2 RESULTADOS.....	60
5.2.1 Estrutura projetada.....	60
5.2.2 Estrutura proposta 1 – semi-rígida com 11 cm de concreto asfáltico e 33 cm de BGTC.....	61
5.2.3 Estrutura proposta 2 – semi-rígida invertida com 11 cm de concreto asfáltico e 33 cm de BGTC.....	62
5.2.4 Estrutura proposta 3 – semi-rígida com 11 cm de concreto asfáltico e 17 cm de BGTC.....	63
6 CONCLUSÕES.....	64
REFERÊNCIAS	66
APÊNDICE A	67
APÊNDICE B.....	69
APÊNDICE C	71

1 INTRODUÇÃO

Pavimento é uma estrutura constituída por múltiplas camadas, sobrepondo-se à superfície de terraplenagem, com a função de resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima. É parte importante do projeto rodoviário e sua qualidade irá determinar os níveis de segurança, desempenho e conforto aos usuários da via.

Tradicionalmente os pavimentos rodoviários são classificados em três grupos: rígidos, semi-rígidos e flexíveis. O pavimento semi-rígido, assunto deste estudo, é constituído por revestimento asfáltico e camadas de base ou sub-base em material estabilizado com cimento. O pavimento semi-rígido é conhecido como pavimento do tipo direto quando a camada de revestimento asfáltico é executada sobre camada de base cimentada e do tipo indireto ou invertido quando a camada de revestimento é executada sobre camada de base granular e sub-base cimentada.

Atualmente, a preocupação com a questão econômica da construção de rodovias tem influenciado na concepção dos projetos. Sabendo-se que o pavimento é um dos componentes de maior custo do projeto rodoviário, cada vez mais diferentes tipos de materiais e técnicas para sua execução são estudados. Contudo, a utilização de alternativas ao método tradicional nem sempre é aceita pelos órgãos responsáveis que se limitam a um projeto padrão e que atenda aos objetivos básicos de sua implantação.

Neste sentido, o presente estudo busca avaliar uma alternativa de projeto de pavimentação para uma rodovia específica, a BR-448. Brita graduada tratada com cimento será inserida na camada de base como material alternativo e diferentes situações serão consideradas variando o posicionamento deste material. Uma comparação das estruturas de pavimento, em relação à vida de fadiga, será feita através de modelos de fadiga para verificar se as estruturas de pavimento propostas possuem melhor desempenho que a projetada.

Além desta introdução, capítulo 1, o trabalho apresenta no capítulo 2 o método de pesquisa. O capítulo apresenta questão de pesquisa, objetivos, pressupostos, delimitações, limitações e delineamento. O capítulo 3 aborda características dos pavimentos rodoviários. Apresenta um breve histórico de pavimentos rodoviários e a caracterização dos pavimentos semi-rígidos que

são os específicos para este trabalho. São tratados ainda, os procedimentos utilizados pelo método de dimensionamento empírico-mecanístico e suas características.

No capítulo 4 são apresentados os modelos de fadiga e as estruturas analisadas. São detalhados os modelos de fadiga para o concreto asfáltico e para a BGTC. Dentro das estruturas analisadas está a estrutura projetada e as propostas utilizadas na comparação.

O capítulo 5 destaca os resultados das simulações realizadas no software EVERSTRESS 5.0, destacando-se os parâmetros de entrada utilizados, e expõe os resultados das deflexões, tensões e deformações para a estrutura projetada e para as estruturas propostas.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho. Os resultados da comparação de desempenho, em relação à vida de fadiga, da estrutura projetada são comparados com os resultados das estruturas propostas.

2 MÉTODO DE PESQUISA

Para a elaboração do presente trabalho foram definidas as diretrizes expostas a seguir, que determinaram o desenvolvimento do estudo.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: quais as diferenças de desempenho, em relação à vida de fadiga, esperadas quando se compara a estrutura projetada para o pavimento da BR-448, com as novas propostas utilizando brita graduada tratada com cimento?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

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

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a comparação do desempenho, em relação à vida de fadiga, da estrutura de pavimento projetada para a BR-448, com as novas propostas utilizando brita graduada tratada com cimento.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) conhecimento das características de resistência e deformação de solos disponíveis para aterros na região da BR-448 e definição de nova proposta de pavimento;
- b) avaliação do desempenho do pavimento tradicional;
- c) avaliação do desempenho das novas propostas de pavimento.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem como pressuposto que os modelos de vida de fadiga, a serem empregados, através do *software* EVERSTRESS 5.0, após o cálculo das tensões e deformações, são válidos para a análise de desempenho dos pavimentos estudados.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo da estrutura de pavimento da BR-448.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) apenas a utilização do *software* EVERSTRESS 5.0 na simulação;
- b) a proposta de novos materiais contemplará somente o revestimento e a base, pois as demais camadas serão consideradas com o material especificado no projeto original, podendo variar suas espessuras;
- c) as cargas transmitidas pelas rodas serão consideradas cargas uniformemente distribuídas.

2.6 DELINEAMENTO

As etapas de desenvolvimento deste trabalho são as seguintes:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) conhecimento do *software*;
- c) projeto do novo pavimento;
- d) apresentação das duas estruturas de pavimento;
- e) simulação com as duas estruturas;
- f) comparação dos resultados;
- g) conclusões.

O diagrama da figura 1 apresenta um esquema do delineamento do trabalho.

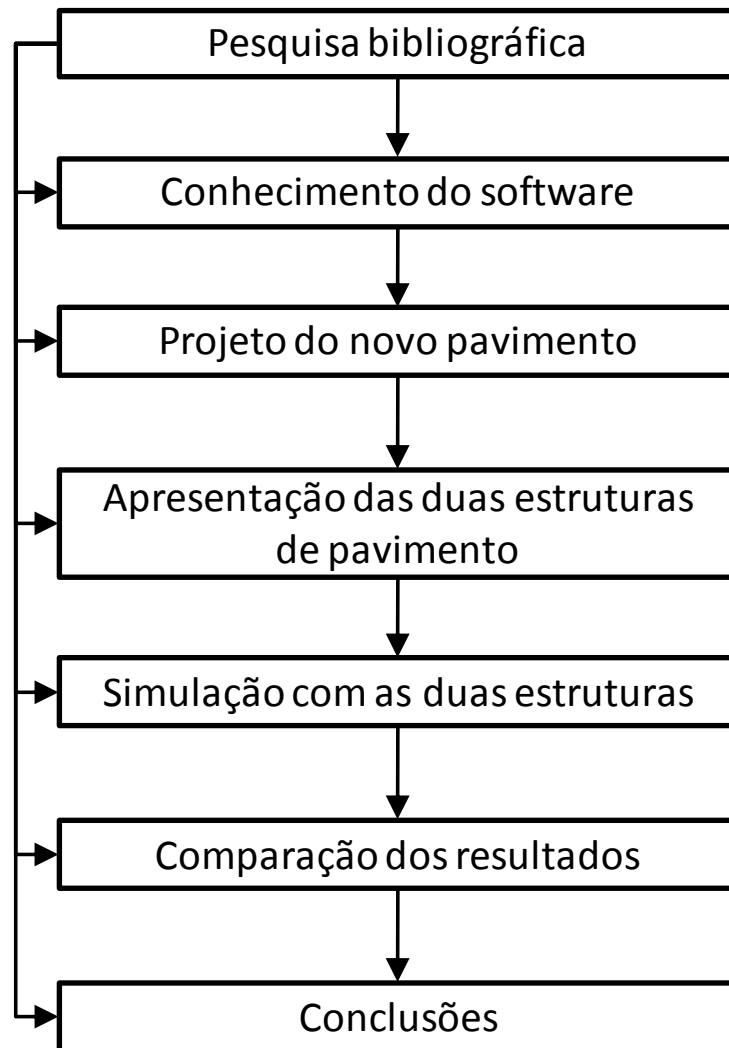


Figura 1: diagrama de etapas da pesquisa

Na pesquisa bibliográfica, realizou-se um aprofundamento do assunto, tendo por objetivo o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho, buscando maiores informações sobre pavimentos flexíveis e características dos materiais que serão utilizados.

Em seguida, foi realizado um estudo do *software* que será utilizado para dimensionar o pavimento. Foi empregado o EVERSTRESS 5.0, um *software* livre disponível na internet. As informações sobre o *software* foram adquiridas através da leitura de trabalhos já realizados e publicados, assim como o próprio manual disponibilizado apenas no idioma inglês.

Para fazer a comparação entre os dois sistemas, objetivo deste trabalho, foi dimensionado o pavimento alternativo pelo método empírico-mecânico. Como parâmetro de comparação, os materiais de revestimento e de base foram modificados e, com isso, novas espessuras de camadas foram estabelecidas. As novas espessuras devem satisfazer o horizonte de projeto e a

vida útil do pavimento, representado pelo número N. A seguir, são apresentados detalhadamente os dois sistemas de pavimento: o pavimento atual projetado, aprovado para ser executado na rodovia, e o pavimento alternativo proposto no presente estudo.

Com base no estudo, no conhecimento do *software* e nas características dos materiais empregados, é feita a simulação com os dois sistemas. Com a utilização do EVERSTRESS 5.0 calculam-se as deformações nas fibras inferiores da mistura asfáltica e camadas cimentadas (BGTC) e, com os valores das deformações, empregam-se modelos de durabilidade (fadiga) para estimar a vida de fadiga do pavimento.

A comparação dos resultados obtidos demonstra se o desempenho, em relação à vida de fadiga do pavimento proposto, é melhor que o desempenho do sistema utilizado no projeto, chegando-se assim, às conclusões do estudo.

3 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Bernucci et al. (2008, p. 9) definem pavimento da seguinte maneira:

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

De uma forma geral, os pavimentos rodoviários são classificados em três tipos (BRASIL, 2006, p. 95):

- a) flexíveis são caracterizados pelo fato de que todas as camadas sofrem deformações elásticas significativas com a aplicação de carga. São executados tipicamente com base de brita revestida com camada asfáltica;
- b) semi-rígidos são caracterizados pela camada de base ser com algum tipo de aglutinante com propriedades cimentícias, como camada de solo-cimento revestida por uma camada de asfalto;
- c) rígidos são constituídos tipicamente com camada de revestimento à base de lajes de concreto de cimento Portland. As tensões provenientes do carregamento são praticamente absorvidas por esta camada.

A escolha do tipo de pavimento e dos materiais a serem utilizados em determinada obra, está relacionada à minimização dos custos, já que este fator é um dos maiores limitantes na concepção de um projeto rodoviário para as agências e operadores viários. Em uma obra de pavimentação é de fundamental importância a pesquisa de materiais disponíveis nas proximidades, bem como de considerar a dificuldade de sua extração e transporte (BALBO, 2007, p. 16).

Balbo (1993, p. 3) apresenta as diferenças de aplicação de carga em pavimentos rígidos e flexíveis (figura 2). A aplicação de cargas em pavimentos flexíveis gera um campo de tensões muito concentrado nas proximidades da aplicação da carga. Já em pavimentos rígidos, o campo de tensões é bem mais disperso e a distribuição das cargas é semelhante em toda a dimensão da placa, gerando menores esforços verticais sobre o subleito. Já o pavimento semi-rígido, pode, intuitivamente, apresentar um comportamento equivalente a um meio termo entre o pavimento flexível e rígido.

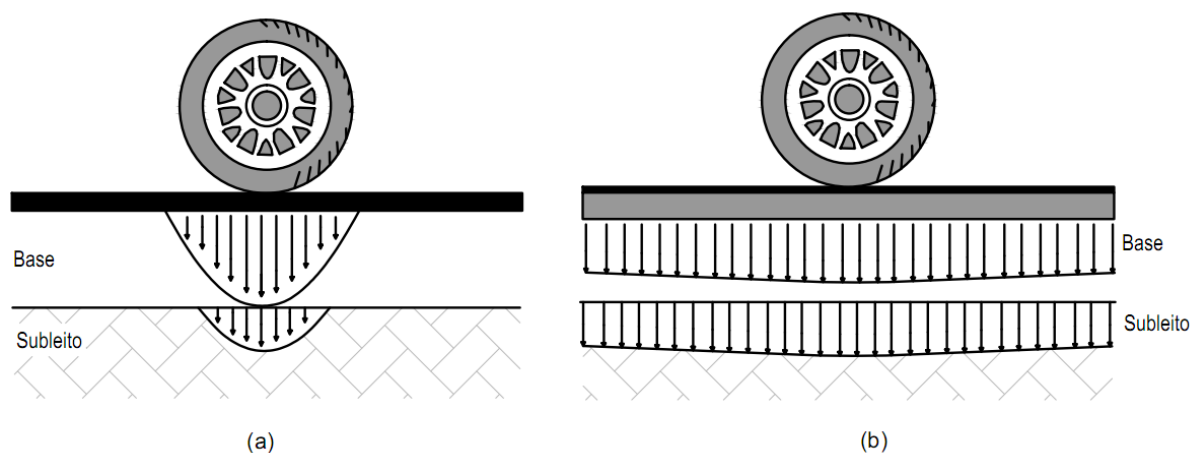


Figura 2: (a) campo de tensões de pavimento flexível; (b) campo de tensões de pavimento rígido (adaptado de BALBO, 2007, p. 47)

Os itens a seguir contemplam uma abordagem sobre pavimentos rodoviários, iniciando com um breve histórico, dando destaque em seguida para pavimentos semi-rígidos, o método de dimensionamento mecanístico-empírico – abordando parâmetros de dimensionamento –, o módulo de resiliência e a fadiga.

3.1 BREVE HISTÓRICO

A história da pavimentação rodoviária remete à própria história da humanidade. Todos os grandes fatos e acontecimentos mundiais, como conquistas territoriais, intercâmbios comerciais, culturais e religiosos, de certa forma, estão ligados às estradas e, essas, aos pavimentos (BERNUCCI et al., 2008, p. 11).

Hagen¹ (1955 apud BERNUCCI et al., 2008, p. 12) descreve que muitas das estradas da antiguidade foram asfaltadas e são usadas até hoje. Aos romanos, foi atribuída a arte maior do planejamento e construção viária da época, destacando o elevado nível técnico. A construção de vias que interligassem pontos tinha, principalmente, objetivos militares de manutenção da ordem em seu vasto território, possibilitando o deslocamento das tropas de guarda dos centros militares até as regiões mais longínquas.

¹ HAGEN, V. W. **A estrada do sol**. São Paulo: Melhoramentos, 1955.

Com a queda do Império Romano, apenas no século XVIII a construção de estradas ganhou força novamente em locais como Inglaterra, França e Estados Unidos, sendo que na Europa ocorreu o primeiro deslocamento de veículo equipado com roda da história, em meados do século XVI (PREGO, 2001, p. 22-23).

Prego (2001, p. 23) destaca que com o ressurgimento das estradas de rodagem, Tresaguet, em 1764 na França, desenvolveu inovadores métodos de construção e concepção de rodovias, sendo um dos precursores da modernização dos métodos usados até então. Na Inglaterra, Teoford (1805) e Mac Adam (1815) foram os pioneiros na utilização de pedra marroada e pedra britada para a construção de estradas.

Bernucci et al. (2008, p. 16) descrevem que, no Brasil, uma das primeiras estradas reporta ao ano de 1560. Essa estrada era basicamente um caminho que ligava São Vicente ao Planalto Piratininga, mais tarde denominada de Estrada do Mar e recuperada, permitindo, assim, em 1661, o tráfego de veículos. Segundo Prego (2001, p. 32) o Brasil dispunha, no início do século XX, de 500 km de estradas com revestimento de macadame hidráulico ou variantes dessa técnica, com tráfego muito reduzido de viaturas de tração animal.

Em 1937 surge o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), sendo que na década de 40 observou-se um avanço no que se refere a projetos de pavimentação, fato que se deu pela grande tecnologia instituída na II Guerra Mundial. Em 1942 foi desenvolvido nos Estados Unidos o ensaio chamado *California Bearing Ratio* (CBR). Neste ano, o Brasil possuía 1.300 km de rodovias pavimentadas (BERNUCCI et al., 2008, p. 18-19).

Balbo (2007, p. 25) destaca que, em 1958, iniciou-se a construção e monitoramento da pista experimental da AASHO (*American Association of State Highway Officials*) nos Estados Unidos. A construção desta pista influenciou inúmeros estudos e ideias para o desenvolvimento de novos sistemas de pavimento, em especial criando o conceito de serventia, desempenho e equivalência entre cargas. Nessa mesma época também floresceram os conceitos empíricos do desenvolvimento de pavimentos, que até hoje servem como parâmetro nos projetos desenvolvidos.

Em 1985, o Brasil contava com aproximadamente 110.000 km de rodovias pavimentadas e, em 1993, possuía 133.000 km, conforme indicam os dados de evolução da rede rodoviária apresentada no quadro 1. Um estudo realizado no ano de 2005 indicou que existiam 196.000

km de rodovias pavimentadas contra 1.400.000 km de rodovias não-pavimentadas no País. Esse percentual, cerca de 12%, é muito contrastante em relação aos índices nos Estados Unidos e na Europa, que possuem mais de 50% de suas vias pavimentadas e, até mesmo, com países da América do Sul que, em média, possuem mais de 20% desse índice (BERNUCCI et al., 2008, p. 19).

Ano	FEDERAL			ESTADUAL		
	Pavimentada	Não-pavimentada	Total	Pavimentada	Não-pavimentada	Total
1970	24.146	27.394	51.540	24.431	105.040	129.471
1975	40.190	28.774	68.964	20.641	86.320	106.961
1980	39.685	19.480	59.165	41.612	105.756	147.368
1985	46.455	14.410	60.865	63.084	100.903	163.987
1990	50.310	13.417	63.727	78.284	110.769	189.053
1993	51.612	13.783	65.395	81.765	110.773	192.538
2003	57.143	14.049	71.192	84.352	111.410	195.762
2005	58.149	14.651	72.800	98.377	109.963	208.340
2007	61.304	13.636	74.940	106.548	113.451	219.999

Quadro 1: evolução da rede rodoviária brasileira (em km)
(BERNUCCI et al., 2008, p. 20)²

O transporte rodoviário está cada vez mais dinâmico e competitivo. Na figura 3, nota-se a diferença e a evolução entre os veículos usados nas pistas de testes de pavimento da AASHO, na década de 50 nos Estados Unidos, e os veículos de carga que circulam nas vias atualmente. Fica claro, portanto, que novos métodos de dimensionamento de pavimentos e de materiais devem ser estudados e aplicados, a fim de garantir a utilização da via com alto desempenho e segurança por veículos cada vez mais pesados.

² Dados obtidos por Bernucci et. al., junto ao GEIPOT - Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes, Ministério dos Transportes, do Anuário Estatístico dos Transportes dos anos de 1970, 1976, 1981, 1986, 1992, 2001.



Figura 3: (a) veículos utilizados pela AASHO em pistas experimentais; (b) veículo de carga usado atualmente (FRANCO, 2007, p. 153)

3.2 PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS

Os pavimentos semi-rígidos são caracterizados por possuírem uma camada composta com material estabilizado com ligante hidráulico, tendo um comportamento considerado a meio caminho entre pavimentos flexíveis e rígidos (BALBO, 1993, p. 3-4).

O mesmo autor destaca que após a adição de ligante hidráulico a um material de pavimentação, há aumento de resistência a esforços de tração, além de evidente ganho em relação à compressão, devido à presença do cimento hidratado. Porém, esses pavimentos apresentam desuniformidades na formação de deformações plásticas em sua superfície, ou seja, as deformações plásticas ocorridas em pavimentos flexíveis são mais homogêneas (em termos de profundidade), o que causa menores variações nas inclinações das trilhas de roda, embora sejam mais profundas.

Segundo Balbo (2007, p. 51), existem quatro tipos de situações possíveis para estrutura de pavimentos com camadas estabilizadas com ligante hidráulico apresentadas na figura 4. O caso A é uma típica estrutura de pavimento semi-rígido, como designado pelos técnicos rodoviários. Já no caso B, o material estabilizado com ligante hidráulico encontra-se na sub-base do pavimento, esta estrutura é designada híbrida ou mista. No caso C, a presença de base granular sobre a sub-base estabilizada caracteriza a utilização da expressão pavimento invertido. Enfim, o caso D mostra uma estrutura de pavimento composta por um antigo pavimento, restaurada com sobreposição de outras camadas juntamente com uma camada estabilizada com ligante hidráulico.

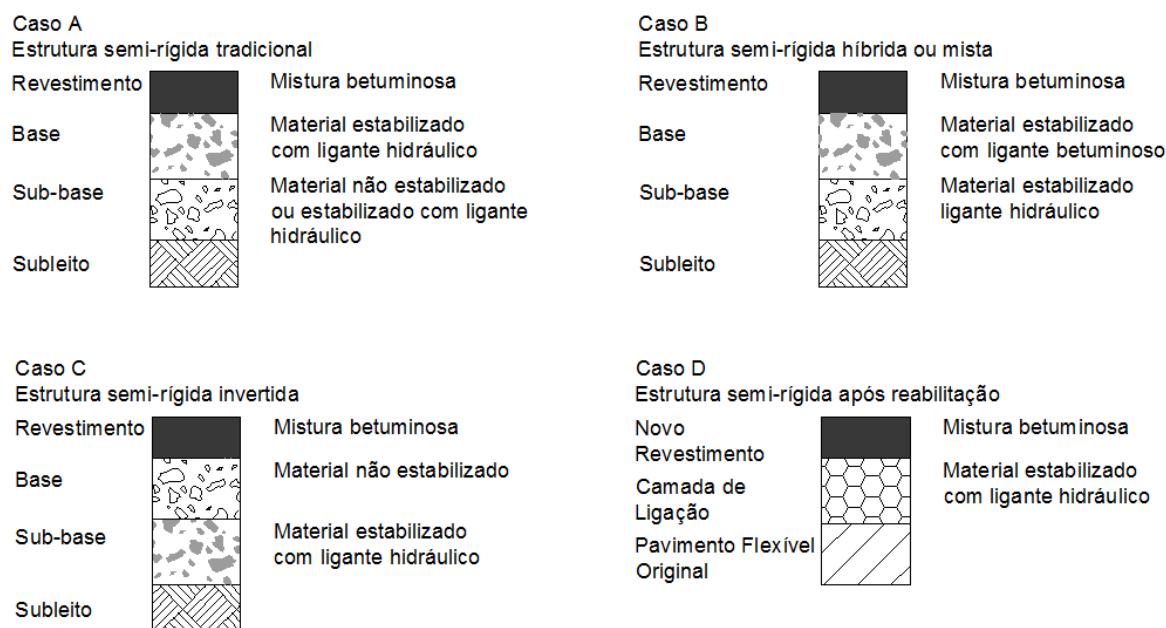


Figura 4: tipos de pavimento semi-rígido (BALBO, 2007, p. 52)

Os itens a seguir destacam as características principais referentes ao pavimento semi-rígido, descrevendo inicialmente a camada de revestimento asfáltico e em seguida a estrutura de base composta por BGTC.

3.2.1 Revestimentos asfálticos

O revestimento é um dos principais elementos que formam os pavimentos asfálticos, pois irá receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática. Portanto, essa camada deve ser, tanto quanto possível, impermeável e resistente aos esforços de contato dos pneus com o pavimento (BERNUCCI et al., 2008, p. 157).

Segundo Balbo (2007, p. 109), o asfalto é um produto natural, constituído essencialmente por betume presente em rochas e depósitos lacustres. A matéria prima mais importante para obtenção dos asfaltos é o petróleo.

Um dos tipos de asfalto mais utilizado no Brasil é o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Trata-se do produto da mistura proporcional de agregados de diferentes granulometrias e cimento asfáltico. A mistura é aquecida à temperatura preestabelecida em função da característica viscosidade-temperatura da mistura. As misturas podem ser dimensionadas e executadas com camadas distintas, contendo características e dosagem

diferentes, garantindo maior resistência. A figura 5 apresenta uma amostra extraída de um revestimento asfáltico de pista com esta característica (BERNUCCI et al., 2008, p. 158).



Figura 5: corpo-de-prova extraído de pista mostrando as camadas do revestimento (BERNUCCI et al., 2008, p. 161)

3.2.2 Bases e sub-bases granulares

Brasil (2006, p. 96) descreve que as camadas de base e sub-base podem ser constituídas por solos, britas de rocha, escória de alto forno ou mistura desses materiais. Quando as camadas são puramente granulares, são classificadas como flexíveis e sua estabilização se deve à compactação apropriada, segundo especificações.

Existem, ainda, bases e sub-bases com materiais misturados a elementos cimentados. Os mais frequentes são: BGTC, solo-cimento, solo-cal, solo-cal-cimento e concreto compactado a rolo (BERNUCCI et al., 2008, p. 352). A figura 6 mostra um esquema com a classificação de bases e sub-bases com uso de sistema flexível e semi-rígido.

A BGTC é um material bastante frágil, apresentando pequenas deformações antes de romper. Além disso, é verificado um comportamento elástico-linear do material até cerca de dois terços da tensão de ruptura, sendo que esta ocorre bruscamente e sem grandes incrementos na deformação sofrida (BALBO, 1993, p. 78).

Balbo (1993, p. 31) descreve que o comportamento à fadiga é um aspecto de grande importância no projeto desse tipo de material. Por mais que a estrutura de pavimento semi-

rígido apresente nominalmente uma resistência à tração de pequena magnitude, efetivamente contribui de maneira a distribuir em uma área mais extensa as tensões que são impostas devido ao carregamento.

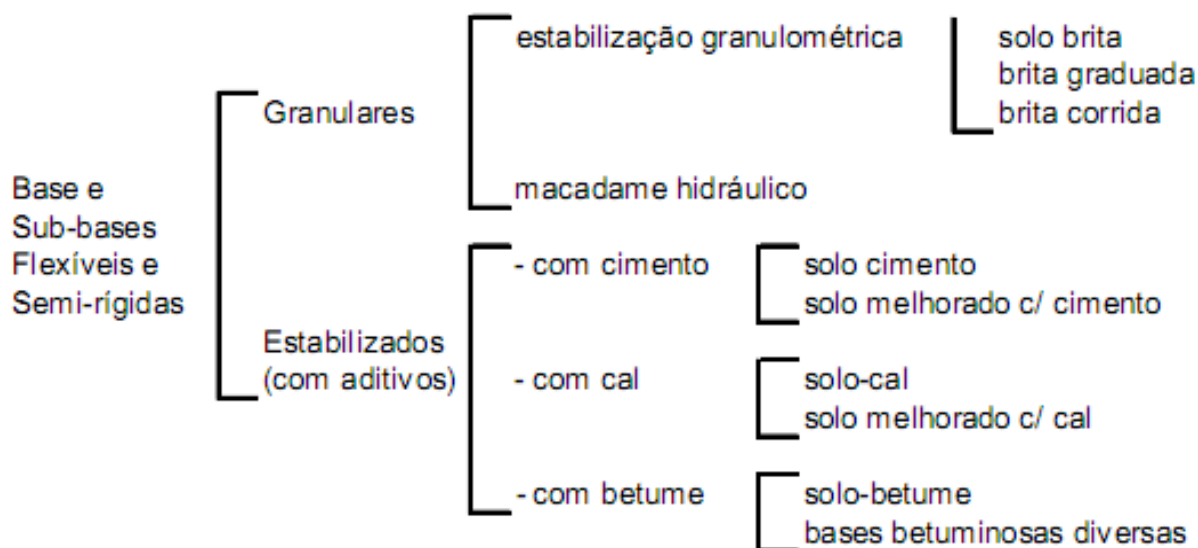


Figura 6: classificação de bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas (BRASIL, 2006, p. 96)

Buscando modernizar e introduzir análises informatizadas para os métodos de dimensionamento de pavimentos, surgiram as análises mecanística-empíricas, abordadas a seguir.

3.3 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

O adequado dimensionamento de pavimentos asfálticos é primordial, assegurando, dessa forma, que a passagem dos eixos dos veículos não irá causar trincamento excessivo da camada de revestimento dentro do período de vida estipulado para o projeto. Além disso, tem a função de garantir que as espessuras e características das camadas que o compõem sejam capazes de minimizar os efeitos gerados pelo afundamento de trilha de roda (FRANCO, 2007, p. 1). Existem dois métodos de dimensionamento de pavimentos mais usados atualmente, o método puramente empírico e o método mecanístico-empírico.

O método empírico, ou método de dimensionamento do DNER, baseado nos métodos americanos do USACE (*United States Army Corps of Engineers*) e da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), calcula a estrutura do pavimento visando proteger o subleito contra deformações plásticas excessivas durante a vida útil do projeto. Esse método é chamado de empírico por se basear em dados experimentais de solos. A utilização desse método no Brasil tem se mostrado eficaz pela rara ocorrência de danos por afundamento de trilha de roda de grande magnitude. Porém, esse método deve ser completado com análises que considerem no dimensionamento o problema do trincamento por fadiga nas camadas asfálticas dos pavimentos flexíveis. O procedimento mais eficaz para garantir essa análise é a modelagem mecanística-empírica, por estar embasado em propriedades mecânicas dos solos e materiais de pavimentação. Com o sistema mecanístico-empírico, também é possível otimizar o dimensionamento da estrutura (BRASIL, 2006, p. 150).

Franco (2007, p. 2) salienta que:

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

Com o uso do sistema mecanístico-empírico, os resultados da análise estrutural do pavimento (tensões, deformações e deslocamentos) devem ser comparados com critérios predefinidos, a fim de garantir que defeitos como trincamento por fadiga e deformações permanentes sejam evitados (BENEVIDES³, 2000 apud BERNUCCI et al., 2008, p. 288; MOTTA⁴, 1991 apud BERNUCCI et al., 2008, p. 288).

Medina e Motta (2005, p. 461) destacam que a análise mecanística-empírica para dimensionamento de pavimentos flexíveis só teve sua relevância com o desenvolvimento de:

- a) ensaios de cargas repetidas com sistema de compressão triaxial de solos e britas e compressão diametral das misturas asfálticas;

³ BENEVIDES, S. A. S. **Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos Asfálticos** – método tradicional do DNER e método de resiliência da COPPE. 2000. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

⁴ MOTTA, L. M. G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis**: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. 1991. 366 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- b) análise de tensões e deslocamentos dos sistemas constituídos de camadas por métodos de elementos finitos, considerando a elasticidade não linear;
- c) deflectometria com uso da Viga Benkelman.

Medina e Motta (2005, p. 405) sugerem um roteiro para o dimensionamento mecânico-empírico, da seguinte forma:

- a) definir o número N de projeto baseado em estudos do tráfego previsto para a via;
- b) ensaiar os materiais que serão usados no subleito, a fim de obter os módulos de resiliência e as leis de deformação permanente, considerando nos ensaios as variações de umidade;
- c) para a mistura asfáltica, definir o módulo de resiliência a ser usado na mistura em função da temperatura média esperada da região do projeto;
- d) com os materiais estabelecidos, adotar uma estrutura inicial e estipular espessuras para cada camada do pavimento;
- e) calcular, através de programas de cálculo mecânico-empírico, o estado de tensões e deformações atuantes na estrutura, considerando como carga o eixo padrão;
- f) comparar os valores de tensões e deformações obtidos no cálculo com os critérios de ruptura estabelecidos em função do número N de projeto, usando, entre outros, curvas de fadiga;
- g) verificar o afundamento de trilha de roda, previsto para o número N, considerando as contribuições de todas as camadas constituintes, comparando com valores admissíveis;
- h) por fim, se os dois itens anteriores forem atendidos, considera-se o pavimento dimensionado. Caso um dos critérios dos itens não for atendido, alteram-se as espessuras e refazem-se todos os cálculos.

O dimensionamento de pavimentos flexíveis, considerando o método mecânico-empírico, deve seguir o diagrama apresentado na figura 7. O diagrama mostra de maneira esquemática os dados de entrada (fatores ambientais, tráfego, materiais e técnicas construtivas), o processamento por via mecânica-empírica e os critérios de decisão que devem se integrar de forma a evitar que a degradação por qualquer tipo de ruptura atinja valores maiores que os estabelecidos para o trecho específico, antes de alcançar o número N de projeto. No dimensionamento que o esquema representa, parte-se das espessuras admitidas e calcula-se, com isso, o estado de tensões e deformações que se comparam a valores limites estabelecidos. Através de várias iterações e tentativas, chega-se a uma estrutura satisfatória. O procedimento é bastante genérico e pode ser usado para o processo de dimensionamento de qualquer

estrutura, sendo que os ajustes particulares são especialmente feitos na consideração do tráfego e no método de cálculo das tensões e deformações (MEDINA; MOTTA, 2005, p. 362).

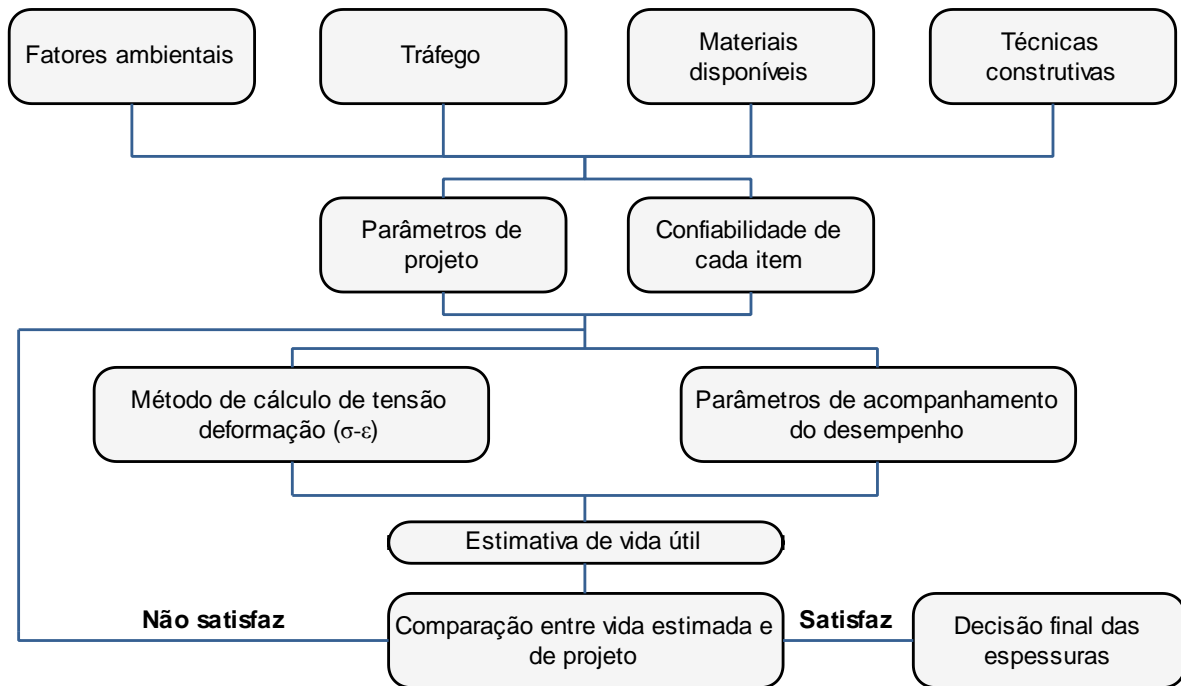


Figura 7: diagrama de dimensionamento mecânico de pavimentos (adaptado de MOTTA⁵, 1991 apud MEDINA; MOTTA, 2005, p. 363)

Mesmo com a criação de programas computacionais como Paviflex, Alize, Circly, Guia de Projetos da AASHTO, Pave, EVERSTRESS, etc., que calculam pavimentos por métodos mecânico-empíricos, a maioria dos projetos realizados atualmente são feitos através da análise puramente empírica, com base no CBR. O dimensionamento por métodos mecânico-empíricos ainda é pouco utilizado, pelo fato de haver uma cultura muito grande no Brasil do uso de métodos empíricos, bem como pela falta de uma metodologia de cálculo de simples compreensão que gere uma percepção confiável dos resultados (FRANCO, 2007, p. 19).

Balbo (2007, p. 377) destaca que se está muito distante de critérios universais de dimensionamento. Não se pode afirmar que um critério seja absolutamente válido em

⁵ MOTTA, L. M. G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis**: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. 1991. 366 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

detrimento de outro ou completamente satisfatório. Cada tipo e parâmetros de cálculo têm suas vantagens e desvantagens.

De uma forma geral, em um projeto de pavimento rodoviário, o tráfego é um dos principais parâmetros de dimensionamento da espessura das camadas. Em todos os projetos, um estudo de tráfego deve ser realizado para definir a demanda que a via deverá satisfazer com o nível de serviço especificado. Segundo Medina e Motta (2005, p. 25) uma das dificuldades no dimensionamento de pavimentos é a previsão da evolução do tráfego ao longo do tempo e a avaliação do poder de destruição, de modo comparativo, que exercem as várias cargas a diferentes níveis de repetição. Ainda, de forma geral, o número N deve ser definido no início do projeto para dimensionamento do pavimento rodoviário.

Os itens a seguir apresentam a descrição do número N, que é o parâmetro da via a ser comparado com o número N calculado. Em seguida será introduzida uma descrição sobre ciclo de vida de um pavimento, importante na medida em que o pavimento é bem dimensionado e, ainda, será apresentado o *software* usado nas análises mecânicas deste trabalho.

3.3.1 Número N

O número N é um parâmetro de cálculo necessário ao dimensionamento dos pavimentos, tanto por métodos empíricos, quanto por métodos mecânico-empíricos. Representa o número de repetições dos eixos dos veículos, equivalentes às solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2 t durante o período considerado de vida útil do pavimento. Segundo Franco (2007, p. 151), o número N é calculado pela equação 1, sendo função direta de três variáveis principais:

$$N = V_t \times F_v \times F_r \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

N é o número de repetições dos eixos dos veículos;

V_t é o volume total de veículos em todo período de projeto;

F_v é o fator de veículos;

F_r é o fator climático regional.

Turnbull⁶ et al. (1962 apud FRANCO, 2007, p. 151) define que para o cálculo do fator de veículos é necessário transformar todas as cargas de todos os tipos de veículos em cargas que sejam equivalentes, em poder destrutivo, à carga do eixo padrão rodoviário. A equação 2, usada no método do DNER, desenvolvida pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza, a partir de pequenas alterações do método do Corpo dos Engenheiros do Exército Americano, define o fator de veículos:

$$F_v = F_e \times F_c \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

F_v é o fator de veículos;

F_e é o fator de eixos: um valor que, multiplicado pelo número de veículos, fornece o número de eixos correspondente;

F_c é o fator de cargas: um valor que, multiplicado pelo número de eixos, fornece o número de eixos equivalente ao eixo padrão.

3.3.2 Ciclo de vida de um pavimento

Franco (2007, p. 9) destaca que em um projeto de pavimento a sua estrutura é calculada de modo que possua condições operacionais adequadas no período de tempo estabelecido. Porém, essa condição operacional vai se degradando ao longo do tempo. A degradação acontece devido a problemas construtivos, pela própria passagem das cargas e por ações climáticas. Uma solução que pode ser dada para este problema é a manutenção, que serve para elevar a qualidade da via até certo ponto. A figura 8 mostra o ciclo de vida de um pavimento, considerando estas intervenções.

⁶ Artigo dos autores Turnbull, W. J.; Foster, C. R.; Ahlvin, R. G., cujo título é Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume, publicado no 1. International Conference On Structural Design of Asphalt Pavements, em Michigan no ano de 1962.

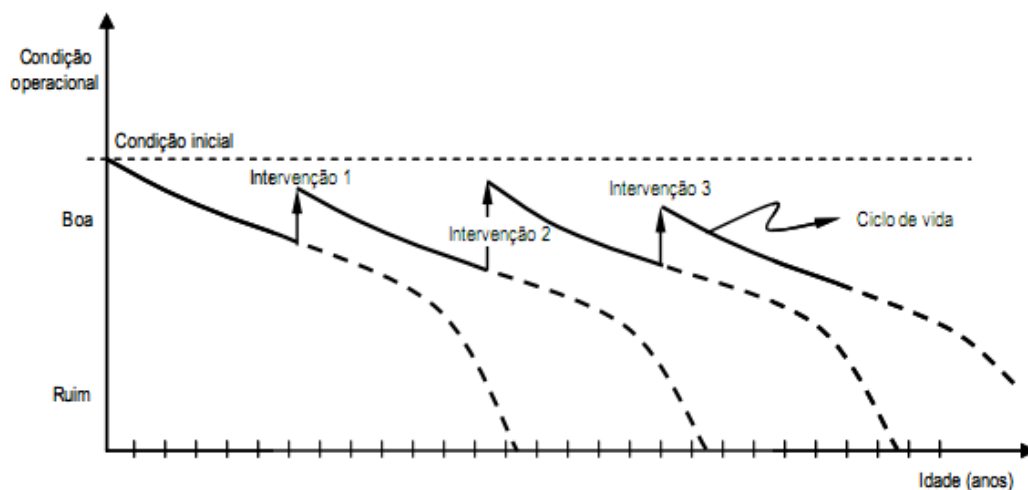


Figura 8: ciclo de vida de um pavimento com intervenções (FRANCO, 2007, p. 9)

Um dos fatores que altera significativamente a vida útil de um pavimento é a rigidez das camadas. Atualmente, diferentes fatores de rigidez estão sendo estudados e caracterizados para estabelecer o comportamento mecânico das misturas. Esse maior conhecimento da rigidez dos materiais de revestimento e subcamadas possibilita uma análise estrutural global do pavimento, produzindo como resposta tensões, deformações e deslocamentos do sistema em camadas (BERNUCCI et al., 2008, p. 290).

3.3.3 Software EVERSTRESS 5.0

O software EVERSTRESS 5.0 é um programa livre, disponível na internet, desenvolvido pelo WSDOT (*Washington State Department of Transportation*) nos Estados Unidos. O EVERSTRESS 5.0 é capaz de determinar as tensões, deformações e deslocamentos em um sistema de camadas elásticas semi-infinitas abaixo da superfície de cargas circulares. O programa pode analisar uma estrutura de pavimento contendo até 5 camadas, 20 cargas e 50 pontos de avaliação. Os parâmetros de entrada do software são (WASHINGTON STATE, 2005, p. 1):

- a) espessura das camadas;
- b) módulo de resiliência das camadas;
- c) coeficiente de *Poisson* das camadas;
- d) carregamento da estrutura;

- e) raio de aplicação da carga;
- f) pontos em que se deseja obter os dados (pontos críticos).

A figura 9 mostra a tela inicial onde as características do pavimento devem ser inseridas.

No	Layer ID	Interface Contact	Poisson's Ratio	Thickness (in)	Modulus (ksi)	Multiplier (ksi)	Power
1		1.00					
2		1.00					
3		1.00					
4							
5							

Figura 9: tela de entrada das características do pavimento (WASHINGTON STATE, 2005, p. 8)

Após, selecionando <Load & Evaluation Locations>, irá abrir uma tela com característica do carregamento, número de cargas, número de pontos de avaliação XY e localização de cada ponto da carga. Os pontos de avaliação serão automaticamente calculados a partir da espessura das camadas de entrada. As coordenadas Z são os pontos do pavimento nos quais os parâmetros de saída são calculados (WASHINGTON STATE, 2005, p. 8). A figura 10 mostra a tela de entrada de dados das características do carregamento e dos pontos de avaliação.

Segundo *Washington State* (2005, p. 6) os parâmetros de saída, após a inserção de todos os dados e execução do programa, são os seguintes:

- a) esforços devido ao carregamento;
- b) tensões devidas ao carregamento;
- c) erro máximo nos módulos calculados e número de iterações;
- d) esforços normais nos sentidos de X-Y-Z (S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} , S_{yz} , S_{xy} , S_{xz});
- e) tensões normais nos sentidos de X-Y-Z (E_{xx} , E_{yy} , E_{zz});
- f) deflexões nos sentidos de X-Y-Z (U_x , U_y , U_z);

g) esforços principais (S1, S2, S3);

h) tensões principais (E1, E2, E2).

Figura 10: tela de entrada das cargas e pontos de avaliação (WASHINGTON STATE, 2005, p. 8)

Como destacado, uma das características de fundamental importância no dimensionamento de pavimentos através de *softwares* com base nos métodos de dimensionamento mecanístico-empírico, é o módulo de resiliência, abordado no item a seguir.

3.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

De acordo com Brasil (2006, p. 49):

Até a década de 70, os métodos de dimensionamento usualmente empregados no Brasil caracterizavam-se por focar, basicamente, a capacidade de suporte dos pavimentos em termos de ruptura plástica sob carregamento estático, retratada através do valor do CBR. No entanto, observa-se que boa parte da malha rodoviária vinha apresentando uma deterioração prematura, que era atribuída à fadiga dos materiais gerada pela contínua solicitação dinâmica do tráfego atuante. Esta realidade acabou por dar ensejo à introdução, no país, de estudos da resiliência de materiais empregáveis em pavimentos, permitindo, assim avaliar-se comportamentos estruturais até então não explicáveis pelos procedimentos clássicos e efetuar-se uma abordagem mais realista desta problemática no meio tropical.

Francis Hveem foi quem primeiro pesquisou o comportamento resiliente dos materiais de pavimentação, em meados de 1930. Em seu estudo, estabeleceu os parâmetros que relacionam

as deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos. Hveem⁷ (1955 apud BERNUCCI et al., 2008, p. 291) define classicamente o termo **resiliência** como: energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações.

Hveem entendia que o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos se devia, principalmente, a deformações resilientes (elásticas) no subleito. O autor preferiu usar o termo deformações resilientes ao invés de elásticas por achar que as deformações que sofre o pavimento são muito maiores que as deformações sobre um sólido elástico, por exemplo, concreto, aço, etc. (MEDINA; MOTTA, 2005, p. 194). A figura 11 mostra a evolução das fissuras e trincas em um pavimento rodoviário.

Medina e Motta (2005, p. 204) definem que o módulo resiliente para elementos do subleito é calculado, no ensaio triaxial de cargas repetidas, através da seguinte equação:

$$M_R = \sigma_d / \varepsilon_1 \quad (\text{equação 3})$$

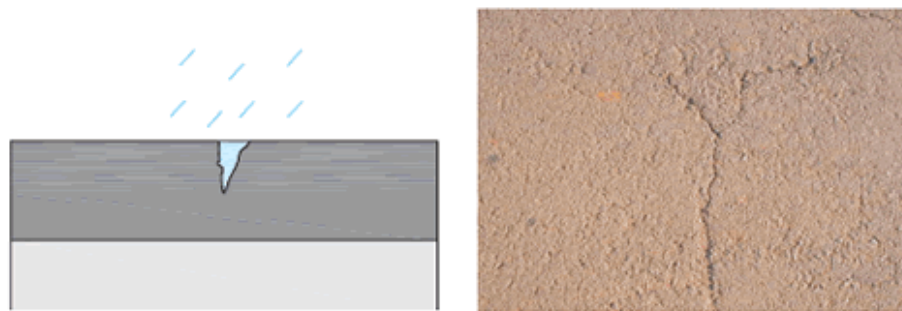
Onde:

M_R é o módulo de deformação resiliente;

σ_d é a tensão-desvio aplicada repetidamente;

ε_1 é a deformação resiliente axial correspondente a um número particular de repetição da tensão desvio.

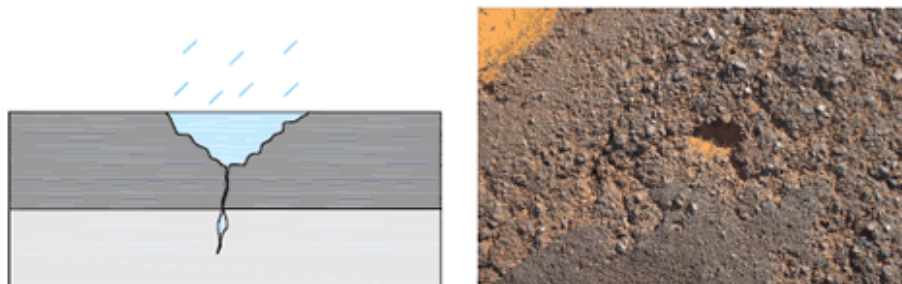
⁷ HVEEM, F. N. **Pavement deflection and fatigue failures**. Washington: Highway Research Board, 1955. Bulletin 114.



Após a abertura das primeiras fissuras, começam a surgir canais dentro do pavimento, por onde a água penetra e deixa o revestimento mais vulnerável



Em pouco tempo, a água que infiltrou no revestimento ou capa começa a atingir as camadas inferiores, acelerando o processo de degradação do sistema. O solo perde a resistência mecânica e se desestabiliza



Com a base comprometida pela perda da resistência mecânica, o processo de degradação do sistema do pavimento torna-se mais acelerado e começam a surgir as "panelas", ficando assim muito mais onerosa a manutenção

Figura 11: evolução das fissuras e trincas em um pavimento flexível
(adaptado de SILVA, 2006, p. 78)

O mesmo autor define σ_d como a tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) e ε_1 calculado através da equação:

$$\varepsilon_1 = \Delta_h / h_0 \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

Δ_h é o deslocamento vertical máximo;

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

Deformações específicas resilientes são elásticas e recuperáveis, porém, não variam necessariamente de modo linear com as tensões aplicadas.

Para as misturas asfálticas, o ensaio de módulo de resiliência é realizado aplicando-se cargas repetidas no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico regular. A carga aplicada gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga e, com isso, mede-se o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, em uma dada temperatura. Com os valores de carga aplicada e deslocamentos horizontais recuperáveis obtidos, é calculado o módulo de resiliência através da equação 5 (BERNUCCI et al., 2008, p. 295-296):

$$M_R = \frac{P}{\Delta_e \times H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

M_R é o módulo de resiliência, MPa;

P é a carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova, N;

Δ_e é o deslocamento elástico ou resiliente registrado para 300, 400 e 500 aplicações de carga (P), mm;

H é a altura do corpo-de-prova, mm;

μ é o coeficiente de *Poisson*.

Os mesmos autores destacam as recomendações fundamentais para o ensaio de módulo de resiliência:

- a) valor do coeficiente de *Poisson* recomendado é 0,30;
- b) o módulo de resiliência do corpo-de-prova ensaiado será a média aritmética dos resultados obtidos com 300, 400 e 500 aplicações da carga vertical repetida (P);

- c) quando a temperatura de ensaio não for especificada, o módulo de resiliência deve ser determinado na temperatura de $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

3.5 FADIGA

*American Society of Testing and Materials*⁸ (1979 apud BERNUCCI et al., 2008, p. 311-312) define fadiga como:

[...] o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos. Vale salientar que esse é um problema não-linear que ocorre em diversos materiais, ou seja, o dano produzido no primeiro ciclo é diferente do dano produzido no segundo ciclo e assim sucessivamente.

Em materiais asfálticos e cimentados, a fadiga ocorre pela repetição das cargas sobre o pavimento, gerando microfissuras que ocasionam perda de rigidez do material constituinte. Essas microfissuras vão se alastrando por todo o pavimento, até o ponto em que o material não resiste e rompe. A figura 12 ilustra trincas causadas pela fadiga em um pavimento flexível (FRANCO, 2007, p. 189).

As fissuras por fadiga se manifestam tanto na superfície do revestimento asfáltico como na estrutura não aparente de bases cimentadas, em todos os casos, de maneira intensa e peculiar. Nas misturas asfálticas, o agente ligante, que possui natureza dúctil, suporta deformações plásticas significativas antes de romper, porém, tais deformações apresentam limites a partir dos quais qualquer nível superior começa causar microfissuras na estrutura do material. Já nas bases cimentadas, o cimento trabalha sob a forma de ligações pontuais entre partículas ou na formação de um esqueleto que fixa as partículas com dimensões menores, dessa forma, estão sujeitas ao fenômeno da fadiga quando os cristais resultantes da hidratação do cimento, de natureza frágil, sofrem progressivas microfissuras, não guardando deformações plásticas elevadas (BALBO, 2007, p. 262-263).

⁸ AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. E 206-72: standard definitions of terms relating to fatigue testing and statistical analysis of fatigue data. Philadelphia, 1979.



Figura 12: dano causado por fadiga em um pavimento flexível (FRANCO, 2007, p. 189)

Segundo Medina e Motta (2005, p. 299), a repetição de cargas solicita o pavimento à flexão na camada de concreto asfáltico do revestimento. Essas solicitações repetidas geram as trincas nas fibras inferiores do revestimento, que se propagam em direção à superfície e, nos pavimentos muito espessos (20 cm ou mais), podem iniciar-se trincas diretamente na superfície devido à curvatura convexa próxima à roda dos veículos em contato. A figura 13 mostra, de forma esquemática, as deformações geradas em um revestimento asfáltico pela passagem das rodas de veículos diferentes.

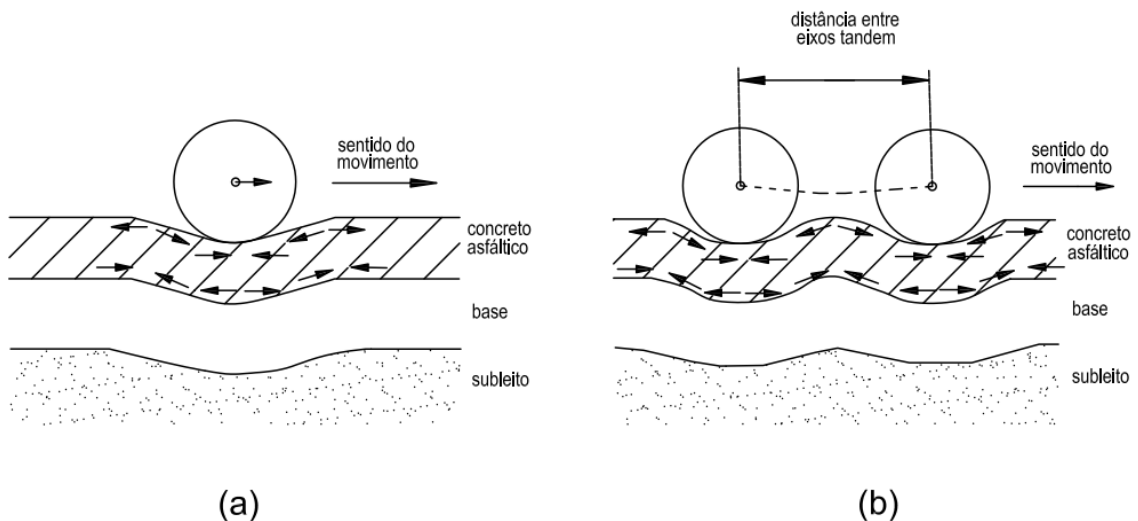


Figura 13: (a) tensões no concreto asfáltico com eixo simples; (b) tensões no concreto asfáltico com eixo tandem (adaptado de MEDINA; MOTTA, 2005, p. 300)

O mesmo autor descreve que uma das formas de melhorar a vida de fadiga e o desgaste superficial é aumentar o teor de asfalto das misturas, porém, com aumento do teor de ligante podem surgir deformações superficiais permanentes no pavimento. O balanço necessário é de difícil determinação, e a forma de melhorar o desempenho dos concretos asfálticos, quanto à deformação permanente, é a utilização de asfaltos modificados com polímero, asfalto borracha ou misturas de granulometria descontínua.

4 MODELOS DE FADIGA E ESTRUTURAS ANALISADAS

No presente capítulo são apresentados os modelos de fadiga usados neste trabalho para comparar o desempenho das estruturas, bem como a descrição da estrutura projetada e das propostas. Todos os modelos de fadiga utilizados consideram os fatores de equivalência de carga propostos pela AASHTO, definido como N_{AASHTO} . Não é utilizado neste trabalho o número de repetições de carga do DNIT por não apresentar modelos de fadiga para as análises realizadas.

4.1 MODELOS DE FADIGA

Para esta pesquisa são usados os modelos de vida de fadiga para estruturas asfálticas da República Sul-Africana para determinação dos valores admissíveis de tensão e deformação. Estes modelos consistem em gráficos e ábacos determinados experimentalmente, baseados nos módulos de resiliência das misturas asfálticas e bases cimentadas, na deformação específica de extensão causada pela passagem das cargas e na espessura das camadas constituintes. Os modelos são embasados em estruturas de pavimento de múltiplas camadas com comportamento elástico.

A análise estrutural geralmente envolve uma análise linear, elástico estático do sistema de múltiplas camadas, resultando na resposta do pavimento à situação de carga expressa em termos de tensões (σ) e deformações (ϵ) em posições críticas na estrutura do pavimento a ser dimensionado. Calculadas as respostas estruturais através do *software* de análise mecânica, os valores das tensões e deformações nos pontos críticos da estrutura são empregados em equações para verificar o pavimento. Os modelos de ruptura limitam as deformações permanentes, o trincamento e a ruptura por cisalhamento em cada camada.

Theyse atualizou em 1995 o Método da República Sul-Africana e inseriu o parâmetro de confiabilidade necessária para o desempenho aproximado dos níveis de serviço às diferentes categorias de estradas que é apresentado no quadro 2. Os parâmetros são baseados em rodovias da África do Sul, sendo amplamente aceitos no Brasil. Para as análises feitas neste trabalho, a BR-448 será considerada de categoria C (rodovia rural) com nível de confiabilidade de 80%.

Road Category	Description	Approximate design reliability (%)
A	Interurban freeways and major interurban roads	95
B	Interurban collectors and major rural roads	90
C	Rural roads	80
D	Lightly trafficked rural roads	50

Quadro 2: categorias de estradas e nível de confiabilidade do modelo mecânico (THEYSE et al., 1996, p. 9)

Os itens a seguir abordam os parâmetros utilizados nas análises mecânicas deste trabalho. As análises são feitas na camada de revestimento, constituído por concreto asfáltico e na camada de base composta por BGTC.

4.1.1 Concreto asfáltico

Para o dimensionamento do pavimento da rodovia BR-448, foram considerados os parâmetros de ruptura dos modelos de fadiga ou deformação permanente da mistura asfáltica. Foram analisadas três respostas estruturais em seus respectivos pontos críticos.

4.1.1.1 Deflexão superficial (U_z)

A deflexão superficial é calculada entre as rodas do carregamento proposto e, em relação ao concreto asfáltico, seu ponto crítico é no topo da camada, tendo contato direto com o tráfego. Preussler⁹ (1983 apud FRANCO, 2007, p. 188) propôs duas expressões para se estimar a vida de fadiga baseada na deflexão recuperável devido a um carregamento conhecido que faz parte do método de projeto de reforço de pavimentos do DNER – PRO 269/94, o chamado Método da Resiliência-TECNAPAV. O autor dividiu o modelo em duas expressões: uma para revestimentos com espessura com menos de 10 cm e outra para espessuras maiores ou iguais a 10 cm. Para este trabalho, as espessuras analisadas são sempre maiores a 10 cm e a deflexão é calculada através do modelo 1.

⁹ PREUSSLER, E.S. **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. 1983. 252 p. Tese (doutorado em) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

$$\log(U_z) = 3,1480,188 \log(N_{AASHTO}) \quad (\text{modelo 1})$$

Onde:

U_z é a deflexão máxima admissível (0,01mm);

N_{AASHTO} é o número de repetições de carga.

4.1.1.2 Deformação horizontal de extensão (ϵ_h)

O trincamento por fadiga é provocado pela repetição das cargas alternadas e depende da amplitude de variação de tensões. Esse trincamento é controlado pela deformação horizontal de extensão, sendo que nas fibras inferiores da camada de concreto asfáltico é onde acontecem os maiores esforços, sendo estes de tração.

A forma geral das funções de iniciação de trinca de transferência para camadas de asfalto é calculada pelo modelo 2. O quadro 3 contém os coeficientes de regressão usados na equação, para combinações de categoria de rodovias e módulo de resiliência aproximado do asfalto, sendo destacada a categoria C de rodovias usada neste trabalho (THEYSE et al., 1996, p. 25).

$$N_{iAASHTO} = 10^{A \left(1 - \frac{\text{Log} \epsilon_h}{B} \right)} \quad (\text{modelo 2})$$

Onde:

$N_{iAASHTO}$ é o número de repetições de carga do início do trincamento;

ϵ_h é a deformação horizontal de extensão, em microstrain ($\mu\epsilon$), sendo $1 \mu\epsilon = 10^{-6}$ cm/cm;

A e B são os coeficientes de regressão.

Asphalt mix stiffness (MPa)	Road Category/ Service level	A	B
1000	A	16.44	3.378
	B	16.81	3.453
	C	17.25	3.543
	D	17.87	3.671
2000	A	16.09	3.357
	B	16.43	3.428
	C	16.71	3.487
	D	17.17	3.583
3000	A	15.78	3.334
	B	16.11	3.403
	C	16.26	3.435
	D	18.68	3.524
5000	A	15.52	3.317
	B	15.73	3.362
	C	15.83	3.383
	D	16.10	3.411
8000	A	15.09	3.227
	B	15.30	3.272
	C	15.39	3.291
	D	15.65	3.346

Quadro 3: coeficientes de regressão geral para a fadiga em concreto asfáltico (adaptado de THEYSE et al., 1996, p. 25-26)

Para este trabalho, serão utilizados, portanto os coeficientes $A = 15,83$ e $B = 3,383$, representando os coeficientes do modelo 2 para MR da camada asfáltica de 5.000 MPa.

Como o trincamento não é visível na superfície do pavimento no instante de sua formação, este modelo sugere um fator de correção (FC) para o $N_{iAASHTO}$, obtido em função da espessura do concreto asfáltico. O FC é multiplicado pelo $N_{iAASHTO}$ para se obter o N_{AASHTO} correspondente à vida de fadiga do pavimento. O modelo 3 apresenta o cálculo de N_{AASHTO} .

$$N_{AASHTO} = N_{iAASHTO} \times FC \quad (\text{modelo 3})$$

Onde:

N_{AASHTO} é o número de repetições de carga do pavimento;

$N_{iAASHTO}$ é o número de repetições de carga do início do trincamento;

FC é o fator de correção.

O FC da espessura, que deve ser usado no modelo 3, é dado pelo quadro 4 e depende da espessura total do concreto asfáltico usado.

Espessura total de concreto asfáltico (cm)	Fator de correção de espessura (FC)
10	4,70
11	5,20
12	5,70
13	6,20
14	6,70
15	7,20
16	7,70
17	8,20
18	8,70
19	9,20
20	9,70

Quadro 4: fatores de correção para o modelo de deformação horizontal de extensão no concreto asfáltico (adaptado de THEYSE et al., 1996, p. 29)

4.1.1.3 Tensão horizontal de tração (σ_t)

Outro parâmetro de análise é a segurança quanto à ruptura por tensões de tração muito elevadas na fibra inferior da camada de concreto asfáltico e, para esta situação, considera-se para a mistura asfáltica convencional a tensão horizontal de tração admissível $\sigma_{tadm} = 1,2$ MPa. Este valor foi adotado pela análise de vários ensaios de resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova extraídos de pavimentos recentemente executados na região sul do Brasil.

4.1.2 BGTC

A camada de BGTC pode apresentar trincamento por retração e ruptura por fadiga na base ou quebra de agregado no topo de sua camada. Neste trabalho, apenas as rupturas por fadiga serão analisadas e os parâmetros de ruptura utilizados para a camada de base são a tensão

vertical de compressão no topo de sua camada, a deformação horizontal de extensão e a tensão horizontal de tração na fibra inferior da camada. Os itens a seguir especificam os modelos de fadiga utilizados para a determinação dos valores admissíveis dessas deformações e tensões.

4.1.2.1 Tensão vertical de compressão (σ_v)

A verificação da tensão vertical de compressão é de fundamental importância, na medida em que analisa a desagregação do material cimentado no topo da camada de BGTC. Segundo Theyse et al. (1996, p. 22), para a categoria C de rodovias, a tensão vertical de compressão é dada pelo modelo 4:

$$N_{AASHTO} = 10^{8,384 \left(1 - \frac{\sigma_v}{1,23 \cdot UCS} \right)} \quad (\text{modelo 4})$$

Onde:

N_{AASHTO} é o número de repetições de carga do pavimento da AASHTO;

σ_v é a tensão vertical de compressão, em MPa;

UCS é a resistência à compressão simples, em kPa.

O coeficiente UCS depende do material cimentado usado e para o caso deste trabalho foi usado 7500 kPa (THEYSE et al., 1996, p. 21).

4.1.2.2 Deformação horizontal de extensão (ϵ_h)

Pelo fato da camada de BGTC ter um módulo de resiliência relativamente alto logo após sua construção, se desenvolvem as deformações horizontais de extensão na sua fibra inferior e, por menores que sejam, desenvolvem micro-fissuras que podem comprometer o desempenho da estrutura do pavimento. Segundo Lovato (2004, p. 35) quando o pavimento é submetido ao carregamento, as micro-fissuras surgem em níveis de deformação de extensão em média 25% da deformação de extensão de ruptura, chegando a valores de 30 a 60 microstrain ($\mu\epsilon$),

dependendo da resistência da camada. Apesar da presença de micro-fissuras, a camada cimentada ainda permanece intacta e apresenta uma resistência a compressão simples muito elevada, porém, a resistência à tração deve ser avaliada, pois a camada rompe a tração. Segundo Theyse et al. (1996, p. 19) a deformação horizontal de extensão (ϵ_h) é dada pelo modelo 5:

$$N_{\text{AASHTO}} = 10^{6,87 \left(1 - \frac{\epsilon_h}{7,66\epsilon_b} \right)} \cdot \text{FC} \quad (\text{modelo 5})$$

Onde:

N_{AASHTO} é o número de repetições de carga do pavimento;

ϵ_h é a deformação horizontal de extensão, em microstrain ($\mu\epsilon$), sendo $1 \mu\epsilon = 10^{-6} \text{ cm/cm}$; ;

ϵ_b é o valor sugerido para deformação limite de ruptura, em strain (μ);

FC é o fator de correção.

O coeficiente ϵ_b depende do material cimentado usado e, para o caso deste trabalho, foi usado $145 \mu\epsilon$ (THEYSE et al., 1996, p. 21). O FC da espessura, que deve ser aplicado ao modelo 5, é dado pelo quadro 5 e depende da espessura total da camada de BGTC usada.

Espessura total de BGTC (cm)	Fator de correção de espessura (FC)	Espessura total de BGTC (cm)	Fator de correção de espessura (FC)
17	1,55	25	2,63
18	1,66	26	2,81
19	1,77	27	3,00
20	1,89	28	3,20
21	2,02	29	3,42
22	2,16	30	3,65
23	2,30	31	3,89
24	2,46	32	4,16
		33	4,44

Quadro 5: FC para o modelo de deformação horizontal de extensão na BGTC (adaptado de THEYSE, 1996, p. 21)

4.1.2.3 Tensão horizontal de tração (σ_t)

A tensão horizontal de tração verifica, quanto à segurança, a ruptura por tensões de tração muito elevadas na fibra inferior da camada de BGTC e, para esta situação, considera-se para a tensão horizontal de tração admissível $\sigma_{tadm} = 1,088$ MPa (BALBO, 1993, p. 106).

4.2 ESTRUTURA PROJETADA

O dimensionamento do pavimento projetado foi feito preliminarmente pelo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis descrito no Manual de Pavimentação do DNIT e posteriormente realizou-se o dimensionamento à luz da mecânica dos pavimentos e análises mecanísticas.

O pavimento projetado para execução na rodovia BR-448 é do tipo flexível e apresenta as seguintes camadas:

- a) concreto asfáltico com ligante polimerizado;
- b) concreto asfáltico com ligante convencional;
- c) BGS;
- d) macadame seco;
- e) camada final de terraplenagem;
- f) corpo do aterro em solo fino.

O uso de camada de rolamento com concreto asfáltico a quente se justifica por ser um material de fácil execução, apresentar custo competitivo e ter a possibilidade de intervenções futuras, proporcionando a reciclagem do material e, ainda, por permitir a abertura ao tráfego muito pouco tempo após sua compactação. No pavimento projetado, são utilizados dois tipos de concreto asfáltico. As misturas asfálticas com ligante polimerizado são usadas sobre as misturas com ligante convencional na espessura constante de 5 cm. Essa mistura constitui a camada asfáltica superficial e o asfalto a ser utilizado é o CAP 50/70 modificada com polímero. Uma das principais justificativas para emprego de ligante modificado com polímero é o aumento da vida útil do ligante asfáltico (aumento da resistência ao envelhecimento), porém, a aplicação deste material é restrita, devido ao custo mais elevado que o ligante convencional, por isso sua utilização é em apenas 5 cm da estrutura de pavimento projetada.

A representação esquemática é feita na figura 14, que mostra ainda os módulos de resiliência e os coeficientes de *Poisson* de cada camada, que são detalhados a seguir.






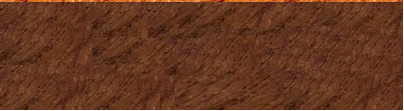
		Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson (μ)
Concreto Asfáltico com ligante polimerizado		5	6.000	0,30
Concreto Asfáltico com ligante convencional		14	5.000	0,30
Brita Graduada		20	$220 \cdot \left(\frac{\theta}{P_{atm}} \right)^{0,64}$	0,35
Macadame Seco		21	300	0,35
Camada final de terraplenagem (solo de empréstimo)		60	$62 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{P_{atm}} \right)^{-0,36}$	0,45
Aterro (solos finos)		∞		0,45

Figura 14: estrutura de pavimento projetada (tipo flexível)

4.3 ESTRUTURAS PROPOSTAS

Para comparar o desempenho em relação à vida de fadiga do pavimento projetado, foram propostas três estruturas de pavimento. A primeira corresponde a um pavimento semi-rígido, a segunda, a um pavimento semi-rígido invertido e, a terceira, novamente um semi-rígido com variação da espessura da BGTC em relação a primeira estrutura.

4.3.1 Estrutura proposta 1 – semi-rígida com 11 cm de concreto asfáltico e 33 cm de BGTC

Esta estrutura é caracterizada pela presença de 11 cm de camada de revestimento (5 cm de concreto asfáltico com ligante polimerizado e 6 cm de concreto asfáltico convencional), base

com 33 cm BGTC especificada através da avaliação com a análise mecanística, e as camadas inferiores com os mesmos materiais e espessuras do pavimento projetado. Esta estrutura é chamada de pavimento semi-rígido e sua representação esquemática é mostrada na figura 15. A figura mostra as espessuras, os módulos de resiliência e os coeficientes de *Poisson* de cada camada, que são detalhados a seguir.








		Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson (μ)
Concreto asfáltico com ligante polimerizado		5	6.000	0,30
Concreto asfáltico com ligante convencional		6	5.000	0,30
BGTC		33	15.000	0,25
BGS		20	$220 \cdot \left(\frac{\theta}{P_{atm}} \right)^{0,64}$	0,35
Macadame seco		21	300	0,35
Camada final de terraplenagem (Solo de Empréstimo)		60	$62 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{P_{atm}} \right)^{-0,36}$	0,45
Aterro (solos finos)		∞	-	0,45

Figura 15: estrutura de pavimento proposto 1 e 3 (tipo semi-rígida)

4.3.2 Estrutura proposta 2 – semi-rígida invertida com 11 cm de concreto asfáltico e 33 cm de BGTC

A segunda estrutura proposta difere da anterior por apresentar duas camadas de BGS de 10 cm envolvendo a BGTC que possui 33 cm e foi especificada através da avaliação com a análise mecanística, sendo as camadas inferiores compostas com os mesmos materiais e espessuras do pavimento projetado. Esse pavimento, chamado de semi-rígido invertido, tem o objetivo de minimizar a reflexão de trincas e aumentar, com isso, a sua vida útil. Sua

representação esquemática é feita na figura 16, que mostra, suas espessuras, os módulos de resiliência e os coeficientes de *Poisson* de cada camada, que são detalhados a seguir.









		Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson (μ)
Concreto asfáltico com ligante polimerizado		5	6.000	0,30
Concreto asfáltico com ligante convencional		6	5.000	0,30
BGS		10	$220 \cdot \left(\frac{\theta}{\text{Patm}}\right)^{0,64}$	0,35
BGTC		20	15.000	0,35
BGS		10	$220 \cdot \left(\frac{\theta}{\text{Patm}}\right)^{0,64}$	0,35
Macadame seco		21	300	0,35
Camada final de terraplenagem (solo de empréstimo)		60	$62 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\text{Patm}}\right)^{-0,36}$	0,45
Aterro (solos finos)		∞	-	0,45

Figura 16: estrutura de pavimento proposto 2 (tipo semi-rígida invertida)

4.3.3 Estrutura proposta 3 – semi-rígida com 11 cm de concreto asfáltico e 17 cm de BGTC

A estrutura 3 é do mesmo tipo da estrutura 1 (semi-rígida) e apresentada na figura 15, ou seja, semi-rígido, diferenciando-se desta por apresentar espessura de BGTC de 17 cm. Este valor é referência, tratando-se da compactação de sua camada, já que os equipamentos disponíveis no Brasil não têm carga suficiente para conferir compactação ideal em uma única camada.

5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A estrutura do pavimento projetado para a BR-448 foi dimensionada usando-se o Método Mecanístico para Dimensionamento de Pavimentos da República Sul-Africana. Seu uso está relacionado, de uma forma geral, ao crescente aumento do tráfego rodoviário, tanto em número de veículos, quanto em número e magnitude de cargas de eixo.

A aceitação deste método para o projeto em questão se deve aos seguintes fatores:

- a) a República Sul-Africana é um dos países mais avançados em termos de estudo e implantação de novas tecnologias na área de pavimentação;
- b) os modelos de fadiga do concreto asfáltico e de materiais artificialmente cimentados obtidos em ensaios laboratoriais foram calibrados através de cuidadoso monitoramento de pavimentos reais e de ensaios acelerados de pavimentos, com emprego de simulador de tráfego móvel (HVS – *heavy vehicle simulator*);
- c) os solos, agregados e demais materiais de pavimentação, assim como o clima, da República Sul-Africana são muito semelhantes aos que ocorrem em grande parte do Sul do Brasil;
- d) os modelos têm sido empregados em projetos de recuperação estrutural e ampliação de pavimentos da BR-290/RS, Osório–Porto Alegre; da BR-116/RS, trecho Porto Alegre-Eldorado do Sul e da BR-101/RS.

Para a rodovia BR-448 foram considerados, através de estudos relacionados à projeção de tráfego futuro, três volumes referentes a diferentes setores de sua extensão, sendo:

- a) $N_{AASHTO} = 2,39 \times 10^7$ para o sub-trecho entre os km 0 e 9+140;
- a) $N_{AASHTO} = 2,15 \times 10^7$ para o sub-trecho entre os km 9+140 e 14+440;
- a) $N_{AASHTO} = 2,45 \times 10^7$ para o sub-trecho entre os km 14+440 e 18+130.

Para a questão de parâmetro de comparação, é considerado o maior volume de tráfego, ou seja, $N_{AASHTO} = 2,45 \times 10^7$. Esta simplificação é condicionada ao fato de a estrutura do pavimento ter a mesma geometria em todo o trecho da rodovia, portanto, deve atender ao maior volume de tráfego. Este é o valor que foi comparado com a estrutura projetada, e é comparado com as estruturas propostas, sendo que o N_{AASHTO} obtido nesses pavimentos deve ser maior que o esperado para a via.

5.1 APLICAÇÃO DO *SOFTWARE* EVERSTRESS 5.0

O item a seguir especifica os parâmetros de entrada usados no *software* EVERSTRESS 5.0.

5.1.1 Parâmetros de entrada

Para a determinação das respostas estruturais (deflexões, deformações e tensões) na estrutura do pavimento, foi aplicado o *software* EVERSTRESS 5.0 de análises mecânicas. Como parâmetros de entrada, o programa requer a inserção dos seguintes dados (WASHINGTON STATE, 2005, p. 1):

- a) espessura das camadas;
- b) módulo de resiliência das camadas;
- c) coeficiente de *Poisson* das camadas;
- d) carregamento da estrutura;
- e) raio de aplicação da carga;
- f) pontos em que se deseja obter os dados (pontos críticos).

5.1.1.1 Espessura

As estruturas alternativas de pavimento são modificadas apenas na base e na camada de revestimento. A camada de BGS continua com os 20 cm de espessura do pavimento projetado, o macadame seco com 21 cm e a camada final de terraplenagem com 60 cm de espessura. A camada de aterro, que é constituído de material em solo fino da região, e considerada com espessura infinita. O quadro 6 apresenta as espessuras das camadas analisadas.

PROPOSTA 1	ESPESSURA (cm)	PROPOSTA 2	ESPESSURA (cm)	PROPOSTA 3	ESPESSURA (cm)
Concreto asfáltico	11	Concreto asfáltico	11	Concreto asfáltico	11
BGTC	33	BGS	10	BGTC	17
BGS	20	BGTC	33	BGS	20
Macadame	21	BGS	10	Macadame	21
Camada final de terraplenagem	60	Macadame	21	Camada final de terraplenagem	60
Aterro	∞	Camada final de terraplenagem	60	Aterro	∞
		Aterro	∞		

Quadro 6: espessura das camadas das estruturas propostas 1, 2 e 3

5.1.1.2 Módulo de resiliência

Outro parâmetro de entrada para o cálculo das respostas estruturais é o módulo de resiliência (MR) das camadas do pavimento expresso em MPa. Para o concreto asfáltico adotou-se o MR idêntico ao pavimento projetado, tanto para o concreto asfáltico modificado com polímero quanto para o concreto asfáltico convencional.

Balbo (1993, p. 106) define que para a camada de BGTC o MR ideal admitido é limitado em 15.000 MPa, considerando as dificuldades de se conseguir densidades próximas do limite inferior desta camada quando compactada monoliticamente, portanto, este é o valor utilizado neste trabalho. Para a BGS adotou-se um modelo no qual o MR é função da soma das tensões principais (θ) atuantes no plano médio das camadas igual ao projeto. Na camada final de terraplenagem também adotou-se um modelo no qual o MR é função da tensão desvio (σ_d) atuante no topo da camada, idêntico ao do projeto. Ainda, para o macadame seco e o corpo do aterro, o MR também foi considerado igual aos parâmetros do pavimento projeto. O quadro 7 apresenta os MR de todas as camadas.

PROPOSTA 1	MR (Mpa)	PROPOSTA 2	MR (Mpa)	PROPOSTA 3	MR (Mpa)
Concreto asfáltico convencional	6.000	Concreto asfáltico convencional	6.000	Concreto asfáltico convencional	6.000
Concreto asfáltico modificado com polímero	5.000	Concreto asfáltico modificado com polímero	5.000	Concreto asfáltico modificado com polímero	5.000
BGTC	15.000	BGTC	15.000	BGTC	15.000
BGS	$220 \left(\frac{\theta}{\text{Patm}} \right)^{0,64}$	BGS	$220 \left(\frac{\theta}{\text{Patm}} \right)^{0,64}$	BGS	$220 \left(\frac{\theta}{\text{Patm}} \right)^{0,64}$
Macadame	300	Macadame	300	Macadame	300
Camada final de terraplenagem	$62 \left(\frac{\sigma_d}{\text{Patm}} \right)^{-0,36}$	Camada final de terraplenagem	$62 \left(\frac{\sigma_d}{\text{Patm}} \right)^{-0,36}$	Camada final de terraplenagem	$62 \left(\frac{\sigma_d}{\text{Patm}} \right)^{-0,36}$
Aterro	80	Aterro	80	Aterro	80

Quadro 7: módulos de resiliência das estruturas propostas 1, 2 e 3

5.1.1.3 Coeficiente de *Poisson*

Os coeficientes de *Poisson* das camadas foram consideradas iguais às do pavimento projetado. Segundo Balbo (1993, p. 106) o coeficiente de *Poisson* da BGTC é 0,25 e é considerado, portanto, neste trabalho. O quadro 8 apresenta os coeficientes de todas as camadas.

PROPOSTA 1	Coeficiente de Poisson (μ)	PROPOSTA 2	Coeficiente de Poisson (μ)	PROPOSTA 3	Coeficiente de Poisson (μ)
Concreto asfáltico	0,30	Concreto asfáltico	0,30	Concreto asfáltico	0,30
BGTC	0,25	BGS	0,35	BGTC	0,25
BGS	0,35	BGTC	0,25	BGS	0,35
Macadame	0,35	BGS	0,35	Macadame	0,35
Camada final de terraplenagem	0,45	Macadame	0,35	Camada final de terraplenagem	0,45
Aterro	0,45	Camada final de terraplenagem	0,45	Aterro	0,45
		Aterro	0,45		

Quadro 8: coeficientes de *Poisson* das estruturas propostas 1, 2 e 3

5.1.1.4 Carregamento

Outro parâmetro de entrada para análise pelo *software* EVERSTRESS 5.0, é o carregamento que é considerado na estrutura de pavimento. Para este trabalho, o carregamento tem as seguintes características:

- a) a pressão de inflação dos pneus será 80 psi (0,56 MPa) para as análises de fadiga;
- b) duas cargas uniformemente distribuídas sobre áreas circulares, considerando apenas o efeito do semi-eixo (padrão nas análises de fadiga);
- c) para as análises de fadiga, é considerado a carga do eixo padrão dividido pelo número de rodas de cada eixo, ou seja, $8.200/4 = 2.050$ kgf.

A figura 17 mostra esquematicamente as coordenadas da carga considerada e o afastamento das rodas para o semi-eixo padrão.

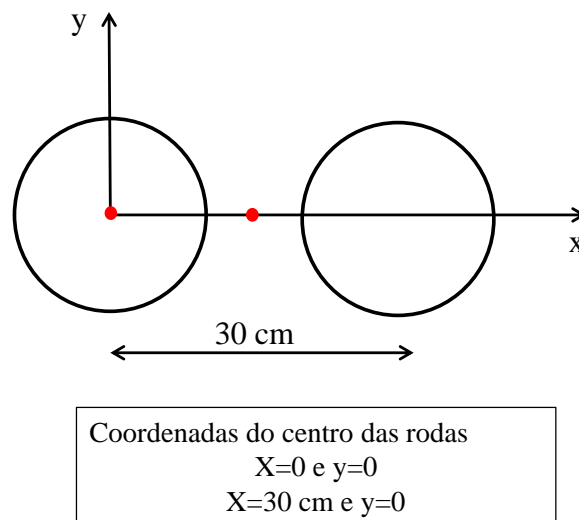


Figura 17: coordenadas da carga aplicada

Como parâmetro de entrada no *software*, as coordenadas (x;y) dos pontos de avaliação são:

- a) $x=0$ e $y=0$ (diretamente abaixo do centro de uma das rodas);
- b) $x=15$ cm e $y=0$ (no ponto médio entre os centros das duas rodas).

5.1.1.5 Raio de aplicação da carga

O raio de aplicação da carga é calculado automaticamente pelo programa após a inserção do carregamento e da pressão de inflação dos pneus.

5.1.1.6 Pontos críticos

O último dado de entrada para a análise mecânica são as coordenadas z dos pontos que se deseja analisar no pavimento. Para o pavimento projetado, as análises foram feitas para as seguintes profundidades (em cm), como mostra a figura 18:

- $z = 0$ para verificação da deflexão superficial;
- $z = 18,999$ para verificação da tensão de tração e da deformação de extensão.

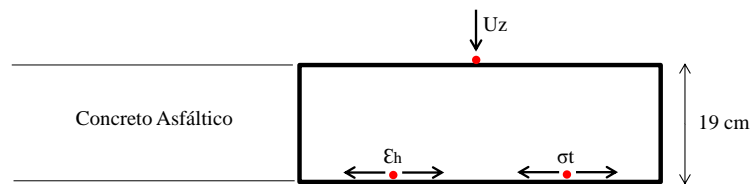


Figura 18: pontos críticos de análise da estrutura projetada (tipo flexível)

Para o pavimento do tipo semi-rígido da proposta 1, as análises contemplam, além do concreto asfáltico, a BGTC. As respostas estruturais foram feitas para as seguintes profundidades (em cm), como mostra a figura 19:

- $z = 0$ para verificação da deflexão superficial;
- $z = 10,999$ para verificação da tensão de tração e da deformação de extensão;
- $z = 11,001$ para verificação da tensão de compressão;
- $z = 43,999$ para verificação da tensão de tração e da deformação de extensão.

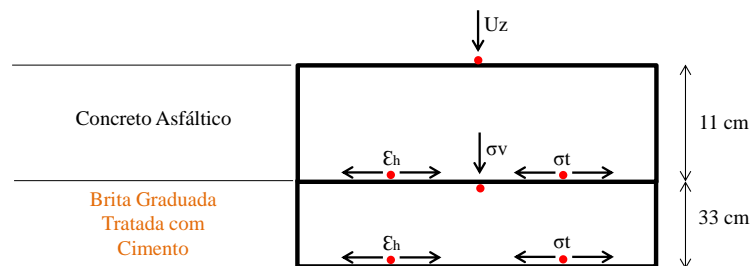


Figura 19: pontos críticos de análise da estrutura proposta 1 (tipo semi-rígida)

Para o pavimento do tipo semi-rígido invertido da proposta 2, as análises contemplam o concreto asfáltico e a BGTC. As respostas estruturais foram feitas para as seguintes profundidades (em cm), como mostra a figura 20:

- a) $z = 0$ para verificação da deflexão superficial;
- b) $z = 10,999$ para verificação da tensão de tração e da deformação de extensão;
- c) $z = 21,001$ para verificação da tensão de compressão;
- d) $z = 53,999$ para verificação da tensão de tração e da deformação de extensão.

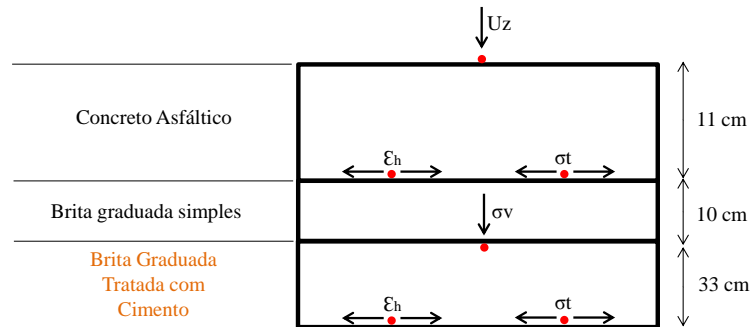


Figura 20: pontos críticos de análise da estrutura proposta 2 (tipo semi-rígida invertida)

Para o pavimento do tipo semi-rígido da proposta 3, as análises contemplam, além do concreto asfáltico, a BGTC. As respostas estruturais foram feitas para as seguintes profundidades (em cm), como mostra a figura 21:

- a) $z = 0$ para verificação da deflexão superficial;
- b) $z = 10,999$ para verificação da tensão de tração e da deformação de extensão;
- c) $z = 11,001$ para verificação da tensão de compressão;
- d) $z = 27,999$ para verificação da tensão de tração e da deformação de extensão.

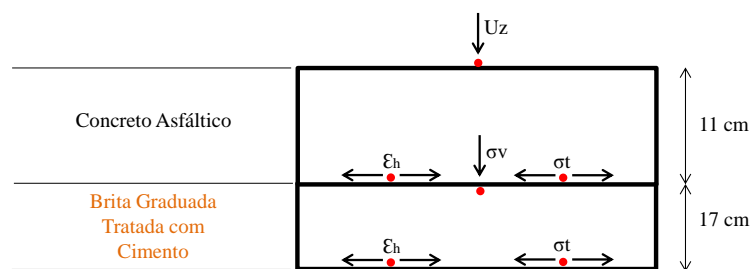


Figura 21: pontos críticos de análise da estrutura proposta 3 (tipo semi-rígida)

5.2 RESULTADOS

Os itens a seguir expressam os resultados obtidos com as análises mecânicas. Inicialmente são obtidas as respostas estruturais da estrutura projetada, para então, compará-la com as obtidas pelas estruturas propostas. Os resultados integrais oriundos da aplicação do EVERSTRESS 5.0 para a proposta 1, a proposta 2 e a proposta 3 estão nos respectivamente nos apêndices A, B e C.

5.2.1 Estrutura projetada

As análises mecânicas feitas através do *software* EVERSTRESS 5.0, para a estrutura de pavimento projetada, chegou aos resultados expressos no quadro 9. O menor volume de tráfego é obtido pela deformação horizontal de extensão na fibra inferior da camada de concreto asfáltico, sendo calculado pelo modelo 2. Para essa estrutura é considerada a espessura da camada asfáltica de 19 cm.

Espessura da camada asfáltica (cm)	Deflexão na superfície do revestimento (10^{-2} mm)	σ_t na fibra inferior da camada asfáltica (MPa)	ϵ_h na fibra inferior da camada asfáltica ($\mu\epsilon$)	Volume de tráfego estimado pelo modelo 2 (N_{AASHTO})
19	27	0,94	102,00	$2,5 \times 10^7$

Quadro 9: respostas estruturais da estrutura projetada (tipo flexível)

Outras duas espessuras de camada asfáltica foram testadas no projeto, porém, não atenderam o volume de tráfego da via e, portanto, não devem ser usadas. O gráfico da figura 22 mostra os resultados de N_{AASHTO} em função da variação da espessura da camada asfáltica.

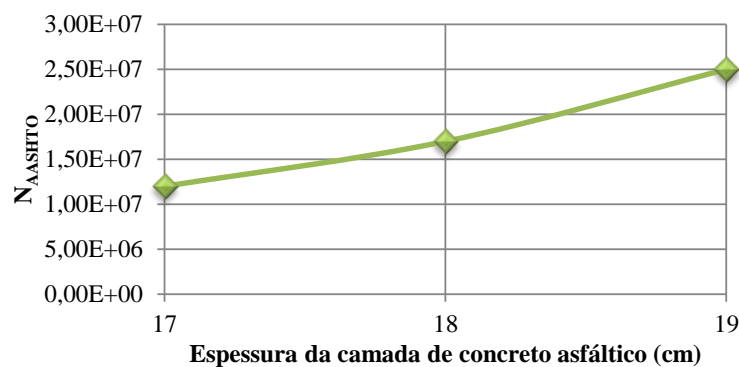


Figura 22: volume de tráfego para espessuras de 17 a 19 cm de concreto asfáltico da estrutura projetada (tipo flexível)

5.2.2 Estrutura proposta 1 – semi-rígida com 11 cm de concreto asfáltico e 33 cm de BGTC

A estrutura proposta 1 é o pavimento semi-rígido com 11 cm de revestimento e 33 cm de BGTC sobre as camadas de BGS, macadame seco, camada final de terraplenagem e aterro de solos finos com as mesmas espessuras do pavimento projetado. O menor volume de tráfego é obtido pela deformação horizontal de extensão na fibra inferior da camada de BGTC e é calculado pelo modelo 5 e suas respostas estruturais estão expostas no quadro 10. Valores positivos representam esforços de tração, enquanto valores negativos são de compressão.

Deflexão na superfície do revestimento (10^{-2} mm)	σ_t na fibra inferior da camada asfáltica (MPa)	ϵ_h na fibra inferior da camada asfáltica ($\mu\epsilon$)	σ_v na fibra superior da camada de BGTC (MPa)	σ_t na fibra inferior da camada de BGTC (MPa)	ϵ_h na fibra inferior da camada de BGTC ($\mu\epsilon$)	Volume de tráfego estimado pelo modelo 5 (N_{AASHTO})
13,0	-0,21	-5,8	-0,40	0,33	17,0	$2,58 \times 10^7$

Quadro 10: respostas estruturais da estrutura proposta 1 (tipo semi-rígida)

Além da espessura de BGTC de 33 cm, foram testadas outras espessuras, a partir de 25 cm. Pode-se perceber pelo gráfico da figura 23 que quando a camada de BGTC possui dimensão inferior a 33 cm, não atende ao tráfego previsto para a via, ou seja, $N_{AASHTO} = 2,45 \times 10^7$. Este gráfico retrata a evolução de N_{AASHTO} em função da BGTC usada e pode ser considerado como tendo crescimento linear.

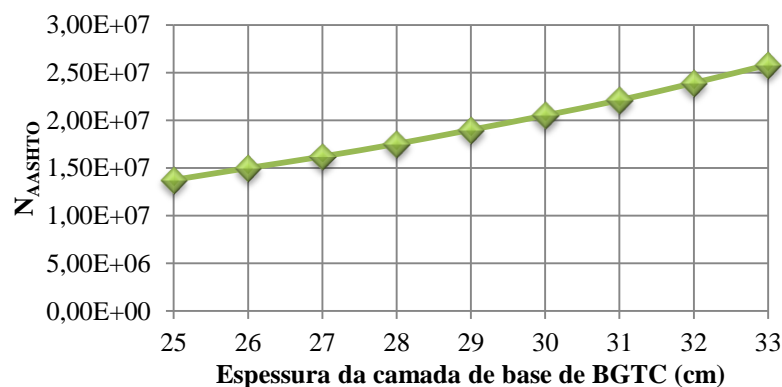


Figura 23: volume de tráfego para espessuras de 25 a 33 cm de BGTC da estrutura proposta 1 (tipo semi-rígida)

5.2.3 Estrutura proposta 2 – semi-rígida invertida com 11 cm de concreto asfáltico e 33 cm de BGTC

A estrutura proposta 2 é o pavimento semi-rígido invertido com 11 cm de revestimento e 33 cm de BGTC. Neste caso, a BGTC está envolta por BGS, sendo as camadas inferiores de macadame seco, camada final de terraplenagem e aterro de solos finos com as mesmas espessuras do pavimento projetado. O menor volume de tráfego é obtido pela deformação horizontal de extensão na fibra inferior da camada de BGTC e é calculado pelo modelo 5 e suas respostas estruturais estão expostas no quadro 11. Valores positivos representam esforços de tração, enquanto valores negativos são de compressão.

Deflexão na superfície do revestimento (10^{-2} mm)	σ_t na fibra inferior da camada asfáltica (MPa)	ϵ_h na fibra inferior da camada asfáltica ($\mu\epsilon$)	σ_v na fibra superior da camada de BGTC (MPa)	σ_t na fibra inferior da camada de BGTC (MPa)	ϵ_h na fibra inferior da camada de BGTC ($\mu\epsilon$)	Volume de tráfego estimado pelo modelo 5 (N_{AASHTO})
15,6	0,56	82,9	-0,17	0,31	16,1	$2,62 \times 10^7$

Quadro 11: respostas estruturais da estrutura proposta 2 (tipo semi-rígida invertida)

Para a proposta 2, além da espessura de BGTC de 33 cm, foram testadas outras espessuras, a partir de 25 cm. Pode-se perceber pelo gráfico da figura 24 que, quando a camada de BGTC possui dimensão inferior a 33 cm, não atende ao tráfego previsto para a via, ou seja, $N_{AASHTO} = 2,45 \times 10^7$. Este gráfico retrata a evolução de N_{AASHTO} em função da BGTC usada e pode ser considerado como tendo crescimento linear, possuindo valores de volume de tráfego para a mesma espessura de BGTC, ligeiramente superior à proposta 1.

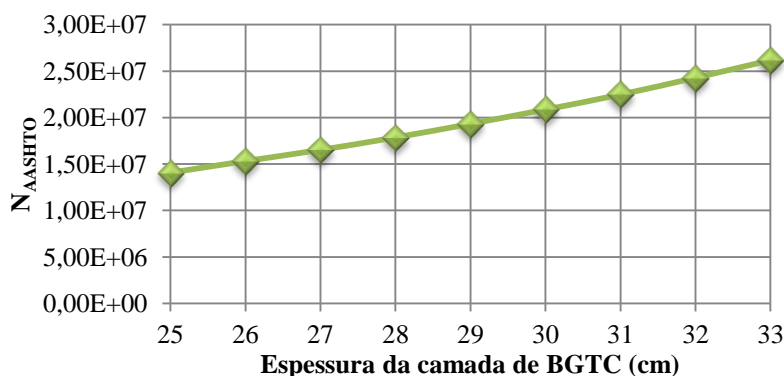


Figura 24: volume de tráfego para espessuras de 25 a 33 cm de BGTC da estrutura proposta 2 (tipo semi-rígida invertida)

5.2.4 Estrutura proposta 3 – semi-rígida com 11 cm de concreto asfáltico e 17 cm de BGTC

A estrutura proposta 3 é do mesmo tipo da 1, ou seja, pavimento semi-rígido com 11 cm de espessura da camada asfáltica, e 17 cm de BGTC sobre as camadas de BGS, macadame seco, camada final de terraplenagem e aterro de solos finos com as mesmas espessuras do pavimento projetado. O menor volume de tráfego é obtido pela deformação horizontal de extensão na fibra inferior da camada de BGTC e é calculado pelo modelo 5 e suas respostas estruturais estão expostas no quadro 12. Valores positivos representam esforços de tração, enquanto valores negativos são de compressão.

Deflexão na superfície do revestimento (10^{-2} mm)	σ_t na fibra inferior da camada asfáltica (MPa)	ϵ_h na fibra inferior da camada asfáltica ($\mu\epsilon$)	σ_v na fibra superior da camada de BGTC (MPa)	σ_t na fibra inferior da camada de BGTC (MPa)	ϵ_h na fibra inferior da camada de BGTC ($\mu\epsilon$)	Volume de tráfego estimado pelo modelo 5 (N_{AASHTO})
19,8	-0,24	-17,26	-0,14	0,70	37,47	$6,74 \times 10^6$

Quadro 12: respostas estruturais da estrutura proposta 3 (tipo semi-rígida)

Para a proposta 3, o gráfico da figura 25 demonstra os resultados de volume de tráfego para espessuras de concreto asfáltico maiores que os 11 cm usados na comparação. Neste sentido, foram testadas espessuras de até 15 cm e se verificou que o aumento da camada asfáltica não tem influência significativa para aumento do suporte de tráfego do pavimento. Isso se deve ao baixo FC usado no modelo de fadiga. O valor de FC usado é referente à espessura da BGTC, que se restringiu aos 17 cm, sendo de 1,55 para todos os casos.

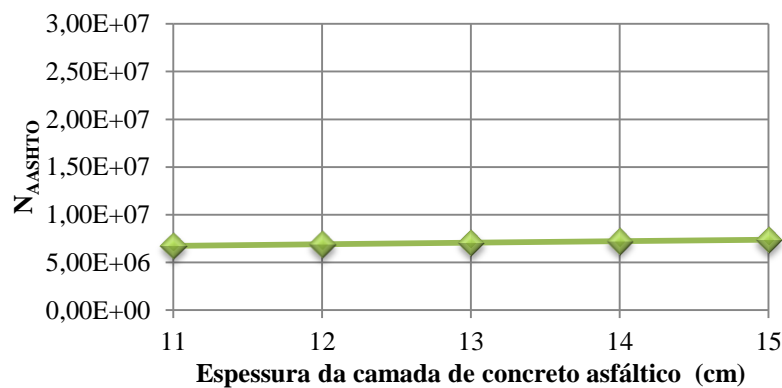


Figura 25: volume de tráfego para espessuras de 11 a 15 cm de concreto asfáltico da estrutura proposta 3 (tipo semi-rígida)

6 CONCLUSÕES

Considerando-se, portanto, as três estruturas de pavimento, denominadas estrutura proposta 1 (pavimento semi-rígido com 33 cm de BGTC); estrutura proposta 2 (pavimento semi-rígido invertido com 33 cm de BGTC) e estrutura proposta 3 (pavimento semi-rígido com 17 cm de BGTC) foram obtidos os resultados expostos a seguir e feita a comparação de desempenho em relação a estrutura projetada para a BR-448.

Em relação à deflexão (U_z) na superfície do pavimento, as três estruturas propostas apresentam menores deflexões comparadas com a estrutura projetada. A estrutura que apresentou menor deflexão foi a da proposta 1, constituída pelo pavimento semi-rígido, no entanto, as outras duas propostas também atendem a este parâmetro.

No que se refere à tensão horizontal de tração (σ_t) na fibra inferior da camada de concreto asfáltico, as três estruturas propostas atendem a tensão máxima admissível de 1,2 MPa. Comparando os resultados com o pavimento projetado, as três propostas apresentam melhores resultados. Tanto a proposta 1 quanto a 3, que são pavimentos semi-rígidos, possuem valores negativos de σ_t na fibra inferior da camada de concreto asfáltico, indicando compressão e significando que esta estrutura não apresentará problemas relacionado a ruptura brusca por tensão de tração. Já a estrutura 2 (semi-rígida invertida) apresenta o valor positivo, mas inferior ao correspondente ao pavimento projetado.

Para a deformação horizontal de extensão (ϵ_h) na fibra inferior da camada de concreto asfáltico, as três estruturas propostas, apresentam melhores resultados que o pavimento projetado. As propostas 1 e 3, que são pavimentos semi-rígidos, apresentam valores negativos de ϵ_h , indicando que não haverá problemas de fadiga. A proposta 2 (semi-rígida invertida) apresenta valores positivos de deformação, porém, menores que a da estrutura projetada.

De uma forma geral, as estruturas propostas 1 (semi-rígida com 33 cm de BGTC) e 2 (semi-rígida invertida com 33 cm de BGTC) apresentam volume de tráfego superior à estabelecida para a via. Já a estrutura 3 (semi-rígida com 17 cm de BGTC) apresenta volume de tráfego inferior, portanto, seu uso não é aprovado. Uma observação que deve ser feita em relação à estrutura proposta 3, que limitou a espessura da camada de BGTC em 17 cm, é de que mesmo aumentando a espessura da camada asfáltica, o volume de tráfego não aumenta na proporção

esperada, como mostra o gráfico da figura 24, não atingindo o mínimo estabelecido para a via. Portanto, 17 cm é uma espessura muito pequena e não deve de ser executada. Alguns pavimentos de rodovias no estado de São Paulo, como o projetado no Rodoanel Leste, apresentam espessuras de 20 cm de BGTC para garantir que não aconteça a prospecção de trincas antes do esperado.

Comparando-se as estruturas 1 e 2, que são, respectivamente, semi-rígido e semi-rígido invertido, é verificado que:

- a) as deflexões (U_z) na superfície do revestimento são maiores no pavimento invertido do que no semi-rígido;
- b) enquanto que no pavimento invertido as deformações horizontais de extensão (ϵ_h) na fibra inferior da camada asfáltica são de tração, no pavimento semi-rígido as tensões são de compressão;
- c) as tensões de tração (σ_t) na fibra inferior da camada de BGTC são menores no pavimento invertido que no semi-rígido.

As estruturas propostas 1 (pavimento semi-rígido com 33 cm de BGTC) e 2 (pavimento semi-rígido invertido com 33 cm de BGTC) poderiam ser empregadas com vantagens na BR-448; entretanto, dado o risco da reflexão de trincas no concreto asfáltico sobrejacente à base de BGTC, a estrutura semi-rígida invertida (proposta 2) seria preferível.

Com relação à redução da espessura do concreto asfáltico, a estrutura proposta 2 (semi-rígida invertida) apresenta valores consideravelmente menores que o projetado. Com o uso de BGTC, a redução de 19 cm para 11 cm, significando diminuição de 42% de material asfáltico para execução do revestimento da BR-448.

De uma forma geral, com a redução significativa do revestimento asfáltico, o custo de implantação do pavimento se torna expressivamente menor, garantindo, contudo, o desempenho esperado da via para o período de projeto.

REFERÊNCIAS

BALBO, J. T. **Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos**. 1993. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

_____. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás; Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**, Brasília, DF, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2010.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

PREGO, A. S. S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.

SILVA M. M. P. Selagem asfáltica de fissuras de pavimentos. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 110, p. 77-80, maio 2006.

THEYSE H. L.; DE BEER M.; RUST F. C. Overview of South African Mechanistic Pavement Design Method In.: TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 1539, 1996.

WASHINGTON STATE, Department of Transportation. Everseries Pavement Programs, versão 5: Washington State. Conjunto de programas para análises diversas em pavimentos, desde análises mecanísticas até retroanálises. Disponível em: <<http://www.wsdot.wa.gov/biz/mats/apps/epg.htm>>. Acesso em: 2 jun. 2010.

APÊNDICE A – Planilhas de resultados das análises mecânicas da proposta 1 (pavimento semi-rígido com 33 cm de GBTC) obtidas com uso do *software* EVERSTRESS 5.0

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: Proposta 1

No of Layers: 5 No of Loads: 2 No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli (1) (MPa)	Moduli (2) (MPa)	Multiplier	Power
1	.30	11.000	6000.00	*	*	*
2	.25	33.000	15000.00	*	*	*
3	.35	20.000	200.00	110.21	220.00	.640
4	.35	21.000	300.00	*	*	*
5	.45	* 80.00	*	*	*	*

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4 Maximum Error in Modulus: 5.2

Line

Line

Location No: 1 X-Position (cm): .000 Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-473.73	-490.59	-560.00	.00	.00	.00
10.999	1	-206.53	-208.02	-399.70	.00	17.96	.00
11.001	2	-215.26	-219.14	-399.64	.00	17.96	.00
43.999	2	275.97	311.56	-6.88	.00	.71	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer	E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	-26.42	-30.08	-45.12	2.522	.000	136.946
10.999	1	-4.04	-4.36	-45.89	1.265	.000	130.594
11.001	2	-4.04	-4.36	-19.40	1.265	.000	130.593
43.999	2	13.32	16.29	-10.25	-2.118	.000	127.306

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-560.00	-490.59	-473.73	-45.12	-30.08	-26.42
10.999	1	-401.35	-208.02	-204.87	-46.25	-4.36	-3.68
11.001	2	-401.38	-219.14	-213.52	-19.55	-4.36	-3.89
43.999	2	-6.89	275.98	311.56	-10.25	13.32	16.29

Line

Line

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	8.66	-168.83	.00	.00	.00	.00
10.999	1	-171.76	-136.92	-168.43	.00	.00	.00
11.001	2	-293.01	-202.54	-168.46	.00	.00	.00
43.999	2	297.62	328.10	-7.18	.00	.00	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (10 ⁻⁶)	U _y (10 ⁻⁶)	U _z (microns)
.000	1	9.88	-28.57	8.01	.000	.000	130.423
10.999	1	-13.36	-5.81	-12.64	.000	.000	130.740
11.001	2	-13.35	-5.81	-2.97	.000	.000	130.740
43.999	2	14.49	17.03	-10.91	.000	.000	128.356

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-168.83	.00	8.66	-28.57	8.01	9.88
10.999	1	-171.76	-168.43	-136.92	-13.36	-12.64	-5.81
11.001	2	-293.01	-202.54	-168.46	-13.35	-5.81	-2.97
43.999	2	-7.18	297.62	328.10	-10.91	14.49	17.03

APÊNDICE B – Planilhas de resultados das análises mecánísticas da proposta 2 (pavimento semi-rígido invertido com 33 cm de GBTC) obtidas com uso do *software* EVERSTRESS 5.0

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: Proposta 2

No of Layers: 5 No of Loads: 2 No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli (1) (MPa)	Moduli (2) (MPa)	Multiplier	Power
1	.30	11.000	6000.00	*	*	*
2	.35	10.000	180.00	470.98	220.00	.640
3	.25	33.000	15000.00	*	*	*
4	.35	10.000	180.00	101.79	220.00	.640
5	.45	*	80.00	*	*	*

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (kPa)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	.00	30.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 8 Maximum Error in Modulus: .6

Line

Line

Location No: 1 X-Position (cm): .000 Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-904.19	-782.39	-560.00	.00	.00	.00
10.999	1	556.39	416.42	-219.07	5.88	.00	.00
21.001	3	-232.95	-225.31	-163.15	19.19	.00	.00
53.999	3	298.86	271.00	-5.31	.49	.00	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer	Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-83.58	-57.19	-9.00	.000	3.707	162.457
10.999	1	82.86	52.54	-85.15	.000	-2.212	156.736
21.001	3	-9.06	-8.42	-3.24	.000	1.396	127.140
53.999	3	15.50	13.17	-9.85	.000	-2.109	125.310

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)	E3 (10^-6)
.000	1	-904.19	-782.39	-560.00	-83.58	-57.19	-9.00
10.999	1	-219.13	416.47	556.39	-85.16	52.55	82.86
21.001	3	-232.95	-230.75	-157.71	-9.06	-8.87	-2.79
53.999	3	-5.31	271.00	298.86	-9.85	13.17	15.50

Line

Line

Location No: 2 X-Position (cm): .000 Y-Position (cm): 15.000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-492.10	-9.66	.00	.00	.00	.00
10.999	1	383.39	-100.27	-194.19	.00	.00	.00
21.001	3	-245.36	-252.43	-170.33	.00	.00	.00
53.999	3	313.72	294.71	-5.51	.00	.00	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer	Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-81.53	22.99	25.09	.000	.000	155.948
10.999	1	78.62	-26.17	-46.52	.000	.000	155.182
21.001	3	-9.31	-9.90	-3.06	.000	.000	128.360
53.999	3	16.09	14.51	-10.51	.000	.000	126.365

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)	E3 (10^-6)
.000	1	-492.10	-9.66	.00	-81.53	22.99	25.09
10.999	1	-194.19	-100.27	383.39	-46.52	-26.17	78.62
21.001	3	-252.43	-245.36	-170.33	-9.90	-9.31	-3.06
53.999	3	-5.51	294.72	313.72	-10.51	14.51	16.09

APÊNDICE C – Planilhas de resultados das análises mecânicas da proposta 3 (pavimento semi-rígido com 17 cm de GBTC) obtidas com uso do *software* EVERSTRESS 5.0

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: Proposta 3

No of Layers: 5 No of Loads: 2 No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli (1) (MPa)	Moduli (2) (MPa)	Multiplier	Power
1	.30	11.000	6000.00	*	*	*
2	.25	17.000	15000.00	*	*	*
3	.35	20.000	200.00	120.37	220.00	.640
4	.35	21.000	300.00	*	*	*
5	.45	*	80.00	*	*	*

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2					

No of Iteration: 4 Maximum Error in Modulus: 3.6

Line

Line

Location No: 1 X-Position (cm): .000 Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-627.62	-668.19	-560.00	.00	.00	.00
10.999	1	-229.34	-240.29 (σ_1)	-373.58	.00	39.17	.00
11.001	2	-284.58	-313.04	-373.51 (σ_1)	.00	39.17	.00
27.999	2	561.23	668.99 (σ_2)	-17.49	.00	1.94	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (10 ⁻⁶)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	-43.19	-51.98	-28.54	5.274	.000	203.097
10.999	1	-7.53	-9.90	-38.78	1.835	.000	197.940
11.001	2	-7.53	-9.90	-14.94	1.835	.000	197.940
27.999	2	26.56	35.54 (ϵ_2)	-21.67	-4.060	.000	195.417

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer *	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-668.19	-627.62	-560.00	-51.98	-43.19	-28.54
10.999	1	-383.53	-240.29	-219.39	-40.94	-9.90	-5.37
11.001	2	-388.30	-313.04	-269.78	-16.17	-9.90	-6.30
27.999	2	-17.50	561.24	668.99	-21.67	26.56	35.54

Line

Line

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-163.34	-359.73	.00	.00	.00	.00
10.999	1	-197.53	-172.58	-140.71	.00	.00	.00
11.001	2	-370.22	-305.46	-140.73	.00	.00	.00
27.999	2	571.34	700.40	-18.23	.00	.00	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (10 ⁻⁶)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	-9.24	-51.79	26.15	.000	.000	198.443
10.999	1	-17.26	-11.85	-4.95	.000	.000	200.066
11.001	2	-17.24	-11.85	1.88	.000	.000	200.067
27.999	2	26.72	37.47	-22.41	.000	.000	198.380

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer *	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-359.73	-163.34	.00	-51.79	-9.24	26.15
10.999	1	-197.53	-172.58	-140.71	-17.26	-11.85	-4.95
11.001	2	-370.22	-305.46	-140.73	-17.24	-11.85	1.88
27.999	2	-18.23	571.34	700.40	-22.41	26.72	37.47