

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

Fernando da Rosa Martins

**PAVIMENTAÇÃO DA DUPLICAÇÃO DA BR-290:
ALTERNATIVAS DE DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE
DE CUSTOS**

Porto Alegre
dezembro 2015

FERNANDO DA ROSA MARTINS

**PAVIMENTAÇÃO DA DUPLICAÇÃO DA BR-290:
ALTERNATIVAS DE DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE
DE CUSTOS**

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 2015

FERNANDO DA ROSA MARTINS

**PAVIMENTAÇÃO DA DUPLICAÇÃO DA BR-290:
ALTERNATIVAS DE DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE
DE CUSTOS**

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, 02 de dezembro de 2015

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela UFRGS
Orientador

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)

Engenheiro William Fedrigo
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Dedico este trabalho a meus pais, Agenor e Noeli, 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 também, por sua segurança no conhecimento, os quais foram de muita importância para a pesquisa e desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Professora Carin Schmitt por suas aulas que deram muita base conceitual para elaboração deste trabalho, e pela disponibilidade para esclarecer dúvidas que surgiam durante a pesquisa.

Todo aquele que se dedica ao estudo da ciência chega a
Convencer-se de que nas leis do universo se manifesta
Um espírito sumamente superior ao do homem, e
Perante o qual nós, com os nossos poderes
Limitados, devemos humilhar-nos.

Albert Einstein

RESUMO

Visando a crescente necessidade de melhoria da qualidade das rodovias brasileiras, e com novos materiais estudados e empregados nos projetos de pavimentos rodoviários, buscou-se aprofundar mais o estudo de análise mecânica e deterioração de pavimentos. Assim, este trabalho tem enfoque na aplicação de brita graduada tratada com cimento (BGTC) na camada de base da Rodovia BR-290 com pavimento do tipo semi-rígido e invertido. Dois tipos de pavimento são estudados: o primeiro semi-rígido com 15 cm de concreto asfáltico, 30 cm de BGTC, 20 cm de brita graduada simples (BGS) e 20 cm de macadame; o segundo pavimento, invertido, com 23 cm de concreto asfáltico, 20 cm de BGS, 20 cm de BGTC e 20 cm de macadame. Nos dois pavimentos, semi-rígido e invertido, a camada asfáltica foi feita em duas camadas, a camada superior com módulo de resiliência maior, e a camada inferior com módulo de resiliência menor. Com o uso do software EVERSTRESS 5.0 para as análises mecânicas-empíricas, determinaram-se as respostas estruturais: deflexões, tensões e deformações nas camadas de concreto asfáltico, na BGTC e no subleito de cada pavimento estudado. O software fornece essas respostas e elas são comparadas com os valores admissíveis calculados através dos modelos de fadiga da República da África do Sul. As espessuras das camadas são alteradas até se encontrar as respostas estruturais menores que as admissíveis. Os critérios de dimensionamento são a fadiga (na BGTC e da camada asfáltica) e deformação permanente (na BGTC e no topo do subleito). Para o pavimento semi-rígido, que tem base cimentada, foi usada uma camada de geotêxtil, como aliviadora de tensões, para evitar reflexão de trincas no revestimento asfáltico. Por último foi feita uma análise de custos para construção de cada estrutura de pavimento estudada, baseada nos preços dos materiais de pavimentação.

Palavras-chave: pavimentos; vida de fadiga; deformações permanentes; análises mecânicas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil do pavimento invertido.....	14
Figura 2 – Perfil do pavimento semi-rígido.....	14
Figura 3 – Diagrama das etapas do trabalho.....	18
Figura 4 – Estrada do mar.....	19
Figura 5 – Pavimentos semi-rígidos.....	20
Figura 6 – Corpos de prova de mistura asfáltica a quente.....	22
Figura 7 – Geotêxtil abaixo da camada asfáltica.....	24
Figura 8 – Geogrelha e uma camada asfáltica sendo aplicada em cima.....	25
Figura 9 – Brita graduada tratada com cimento.....	28
Figura 10 – Macadame hidráulico e seco.....	30
Figura 11 – Deformação permanente no revestimento asfáltico.....	33
Figura 12 – (a) Deformação permanente no revestimento; (b) deformação permanente no sistema.....	34
Figura 13 – Tela inicial para entrar com alguns parâmetros.....	38
Figura 14 – Tela para entrar dos pontos de avaliação, da carga e pressão dos pneus.....	39
Figura 15 – Deflexão, tensão e deformação na camada asfáltica.....	41
Figura 16 – Tensão e deformação na BGTC.....	44
Figura 17 – Deformação no subleito.....	47
Figura 18 – Estrutura do pavimento semi-rígido.....	48
Figura 19 – Estrutura do pavimento invertido	49
Figura 20 – Posto de contagem de tráfego.....	51
Figura 21 – Pontos de avaliação do carregamento.....	55
Figura 22 – Pontos críticos no pavimento semi-rígido.....	56
Figura 26 – Estrutura do pavimento invertido.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de regressão para camada asfáltica com módulo de 5000 e 3000 MPa.....	43
Tabela 2 – Valores de resistência à compressão UCS.....	45
Tabela 3 – Coeficientes e fator de correção.....	46
Tabela 4 – Constantes para categoria B.....	47
Tabela 5 – Posto de contagem de tráfego.....	51
Tabela 6 – Valor do N_{AASHTO} estimado para 10 anos de projeto.....	51
Tabela 7 – Valores dos coeficientes de <i>poisson</i>	54
Tabela 8 – Comparação das respostas estruturais com os valores admissíveis no pavimento semi-rígido.....	57
Tabela 9 – Comparação das respostas estruturais com os valores admissíveis no pavimento invertido.....	58
Tabela 10 – Custo da construção do pavimento semi-rígido com geossintético.....	59
Tabela 11 – Custo da construção do pavimento invertido.....	59
Tabela 12 – Custo dos materiais de pavimentação.....	60
Tabela 13 – Custo da manta geotêxtil.....	61

LISTA DE SIGLAS

AASTHO – *American Association of State Highway Officials*

BGS – Brita graduada simples

BGTC – Brita graduada tratada com cimento

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

CAP – Cimento asfáltico de petróleo

CBR – *California Bearing Ratio*

CBUQ – Concreto betuminoso usinado a quente

USACE – *United States Army Corps of Engineers*

WSDOT – *Washington State Department of Transportation*

LISTA DE SÍMBOLOS

N – número de repetições do eixo padrão

V_t – volume total de veículos em todo período de projeto

F_v – fator de veículos

F_r – fator climático regional

MR – módulo de resiliência

ϵ – deformação resiliente

μ – coeficiente de *poisson*

σ_1 – tensão principal

U_z – deflexão

σ_d – tensão-desvio

$\mu\epsilon$ – *microstrain*

σ_t – tensão horizontal de tração

σ_{tadm} – tensão horizontal de tração admissível

σ_v – tensão vertical de compressão

UCS – resistência à compressão simples

KPa – quilopascal

MPa – megapascal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	16
2.2.1 Objetivo 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	19
3.1 BREVE HISTÓRICO.....	19
3.2 PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS.....	20
3.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	21
3.4 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS.....	22
3.5 EMPREGO DE GEOSSINTÉTICOS.....	24
3.5.1 Geotêxtil	24
3.5.2 Geogrelha	25
3.6 REFLEXÃO DE TRINCAS.....	26
3.6.1 Camadas intermediárias de alívio de tensões	27
3.7 SUBLEITO.....	27
3.8 CAMADAS GRANULARES E CIMENTADAS.....	28
3.8.1 Brita graduada tratada com cimento	28
3.8.2 Macadame hidráulico e macadame seco	29
3.9 MACADAME HIDRÁULICO E MACADAME SECO.....	28
4 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DE PAVIMENTOS	31
4.1 FADIGA.....	31
4.2 DEFORMAÇÕES PERMANENTES	33
5 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO	35
5.1 NÚMERO N.....	37

5.2 SOFTWARE EVERSTRESS 5.0.....	38
6 MODELOS DE PREVISÃO E ESTRUTURAS ANALISADAS.....	40
6.1 MODELOS DE FADIGA.....	40
6.2 CONCRETO ASFÁLTICO.....	40
6.2.1 Deflexão superficial (U_z).....	41
6.2.2 Deformação horizontal na parte inferior da camada asfáltica (ϵ_t).....	42
6.2.3 Tensão horizontal de tração (σ_t).....	43
6.3 BGTC.....	44
6.3.1 Tensão vertical de compressão (σ_v).....	44
6.3.2 Deformação horizontal (ϵ).....	45
6.3.3 Tensão Horizontal de tração (σ_t).....	46
6.4 SUBLEITO.....	46
6.5 ESTRUTURAS ANALISADAS.....	47
6.5.1 Estrutura 1: pavimento semi-rígido.....	47
6.5.2 Estrutura 2: pavimento invertido.....	48
7 SIMULAÇÃO, RESULTADOS E CUSTOS.....	50
7.1 DISTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO.....	51
7.2 APLICAÇÃO DO SOFTWARE EVERSTRESS 5.0.....	52
7.2.1 Espessuras.....	53
7.2.2 Módulo de resiliência.....	53
7.2.3 Coeficiente de <i>Poisson</i>.....	53
7.2.4 Carregamento.....	54
7.2.5 Raio de aplicação da carga.....	55
7.2.6 Pontos Críticos.....	55
7.3 ANÁLISE DE RESULTADOS E DE DIMENSIONAMENTO.....	57
7.3.1 Estrutura semi-rígida com 15 cm de concreto asfáltico.....	58
7.3.2 Estrutura de pavimento invertido com 23 cm de concreto asfáltico.....	58
7.4 COMPARATIVO DOS CUSTOS.....	59
8 CONCLUSÕES.....	62
REFERÊNCIAS.....	64
APÊNDICE A	65
APÊNDICE B	67
APÊNDICE C.....	69

1 INTRODUÇÃO

Rodovias, e até mesmo ruas, são estruturas que estão ligadas a vida das pessoas, seja econômica ou socialmente. Diante das mudanças econômicas que fazem aumentar a necessidade de novas rodovias, assim como o estudo de novos materiais, surge a proposta de elaboração de um projeto que analise o comportamento de pavimentos e mostre as vantagens e custos envolvidos. Também, deve-se ter a preocupação com a reconstrução precoce dos pavimentos, pois, de acordo com Bernucci et al. (2008, p. 22), sabe-se que:

Esses gastos são inaceitáveis uma vez que podemos dispor de equipamentos de laboratório e de campo que permitam um melhor entendimento dos materiais e de métodos de projeto teórico-empíricos. A existência de uma infra-estrutura laboratorial e a formação de recursos humanos de alto nível na área torna possível a investigação de materiais alternativos e novas tecnologias para as camadas do pavimento.

Pavimentar é uma das mais antigas técnicas de propiciar um conforto e segurança. Conforme Balbo (2007, p. 16):

Desta forma, a pavimentação tem como meta propiciar um tráfego confortável e seguro, com estruturas e materiais capazes de suportar os esforços decorrentes da ação do tráfego combinados com as ações climáticas, a um mínimo custo, ou seja, buscando, sempre que possível, o aproveitamento de materiais locais para as obras [...]

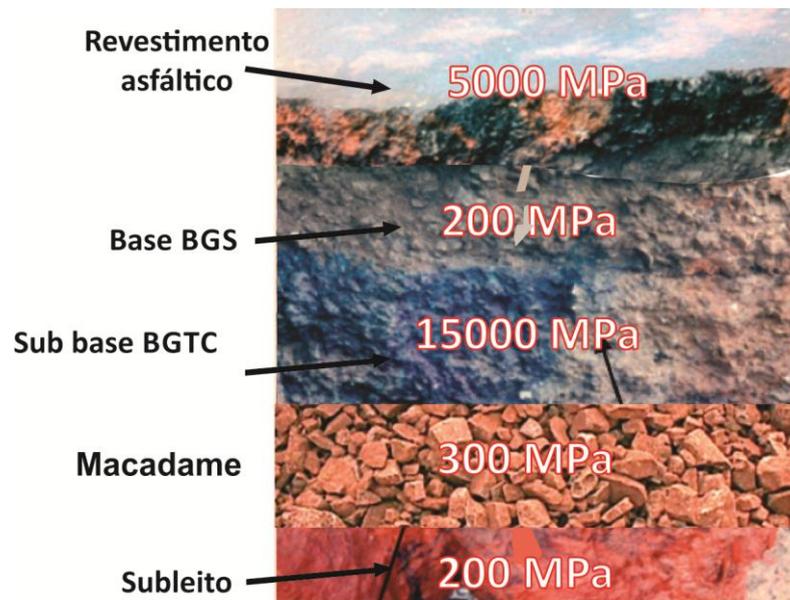
Pavimentos rodoviários são estruturas com a função de oferecer condição ao rolamento dos veículos, conforto, segurança e economia aos usuários. Do ponto de vista estrutural, tem a função de resistir aos esforços causados pelo tráfego de diversas categorias de veículos e resistir aos efeitos provocados pelo clima.

Existem basicamente quatro tipos de pavimentos: flexível, rígido, semi-rígido e invertido. Os rígidos são compostos por uma placa de cimento *Portland* sobre a base do subleito.

Os pavimentos flexíveis, semi-rígidos e invertidos são formados basicamente por quatro camadas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento é uma camada constituída de ligantes asfálticos e agregados. A função dessas camadas é distribuir as tensões sobre uma área de tal forma que as tensões que chegam no topo do subleito sejam admissíveis para o material.

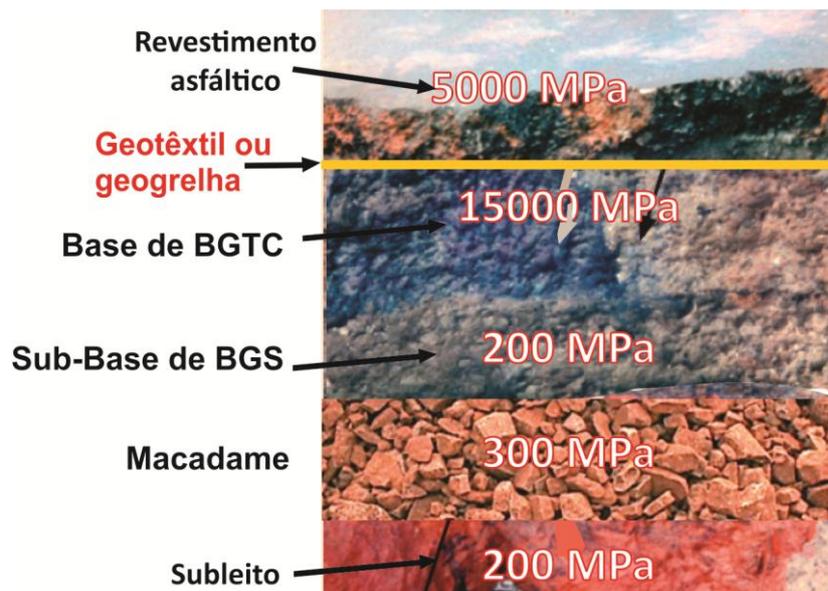
Os pavimentos semi-rígidos necessitam uma camada de geossintético (geotêxtil ou geogrelha), microrrevestimento com emulsão asfáltica ou maior espessura de camada asfáltica que absorva as tensões que causam reflexão de trincas na camada asfáltica. Os pavimentos invertidos, cuja sub-base é uma brita tratada com cimento têm a camada asfáltica solicitada com tensões de tração e, portanto, necessita de maior espessura. As figuras 1 e 2 ilustram dois tipos de pavimentos que foram estudados.

Figura 1 – Perfil do pavimento invertido



(fonte: adaptado de BERNUCCI et al., 2008, p. 356)

Figura 2 – Perfil do pavimento semi-rígido com geossintético



(fonte: adaptado de BERNUCCI et al., 2008, p. 356)

Fazer um dimensionamento por um método mecanístico-empírico é um avanço tecnológico para construção de pavimentos, pois o atual método empírico do DNER, ainda utilizado no País, não contempla efeitos de fadiga. Conforme Franco (2007, p. 2), sabe-se 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 base nas situações de funcionalidade de cada um dos pavimentos estudados, é possível fazer uma análise técnicoeconômica pelo método mecanístico-empírico de dois tipos de pavimentos (invertido e semi-rígido) frente ao mesmo volume de tráfego. Este será o objetivo deste trabalho, visto que se dispõe de programas computacionais, como o software EVERSTRESS 5.0, que oferecem o procedimento de dimensionamento.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

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

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: conhecidas as melhores soluções para a estrutura do pavimento semi-rígido e do invertido projetada para um lote da duplicação da BR-290, quais as diferenças de desempenho e custos podem ser observadas?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

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

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é análise das diferenças de desempenho e custo entre os pavimentos estudados, comparando-se os semi-rígidos e os invertidos, frente ao mesmo volume de tráfego e materiais, considerando soluções otimizadas para as opções estudadas.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são, para o trecho de rodovia estudado:

- a) verificação da solução mais vantajosa, em termos econômicos, para evitar a reflexão de trincas, nos pavimentos semi-rígidos, sendo oferecidas as opções de colocar geossintético, microrrevestimento com lama asfáltica;
- b) apresentação de soluções otimizadas para o pavimento invertido.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que, os valores de custos de materiais de pavimentação informados, são válidos para a elaboração do projeto de pavimentos, e também o dimensionamento é viável para o projeto.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo da estrutura do pavimento da duplicação da BR-290 no município de Eldorado do Sul – RS.

2.5 LIMITAÇÕES

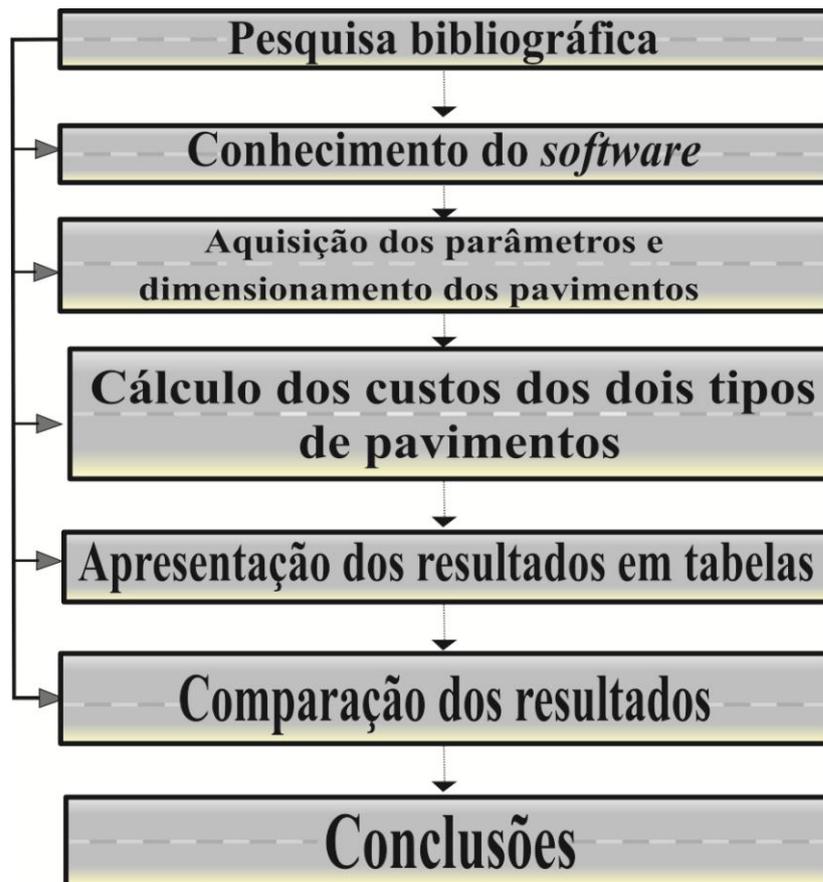
É limitação do trabalho a utilização de apenas um *software* EVERSTRESS 5.0 na simulação.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas nas figuras 3 e 4, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) conhecimento do software;
- c) aquisição dos parâmetros;
- d) dimensionamento do pavimento;
- e) cálculo de custos dos dois tipos de pavimentos;
- f) apresentação dos resultados em tabelas;
- g) comparação dos resultados;
- h) conclusões.

Figura 3 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

3 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Bernucci et al. (2008, p. 9) definem pavimentos 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.

3.1 BREVE HISTÓRICO

Construir vias de transportes é uma preocupação e atividade de remotas civilizações, gerada por razões de ordem econômica, de integração regional e de cunho militar; pavimentar as vias, ainda na Antiguidade, tornou-se atividade essencial para a adequação e preservação dos caminhos mais estratégicos (BALBO, 2007, p. 16).

Bernucci et al. (2008 p. 16) contam que uma das primeiras estradas no Brasil foi criada no ano de 1560. Era um caminho aberto que ligava São Vicente ao Planalto Piratininga. Mais tarde foi denominada de Estrada do Mar e recuperada pelo Governo para o tráfego de veículos. Hoje é conhecida por Estrada Velha do Mar e preservada, em parte, com lajes de granito. A figura 4 ilustra esta estrada.

Figura 4 – Estrada do mar



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 16)

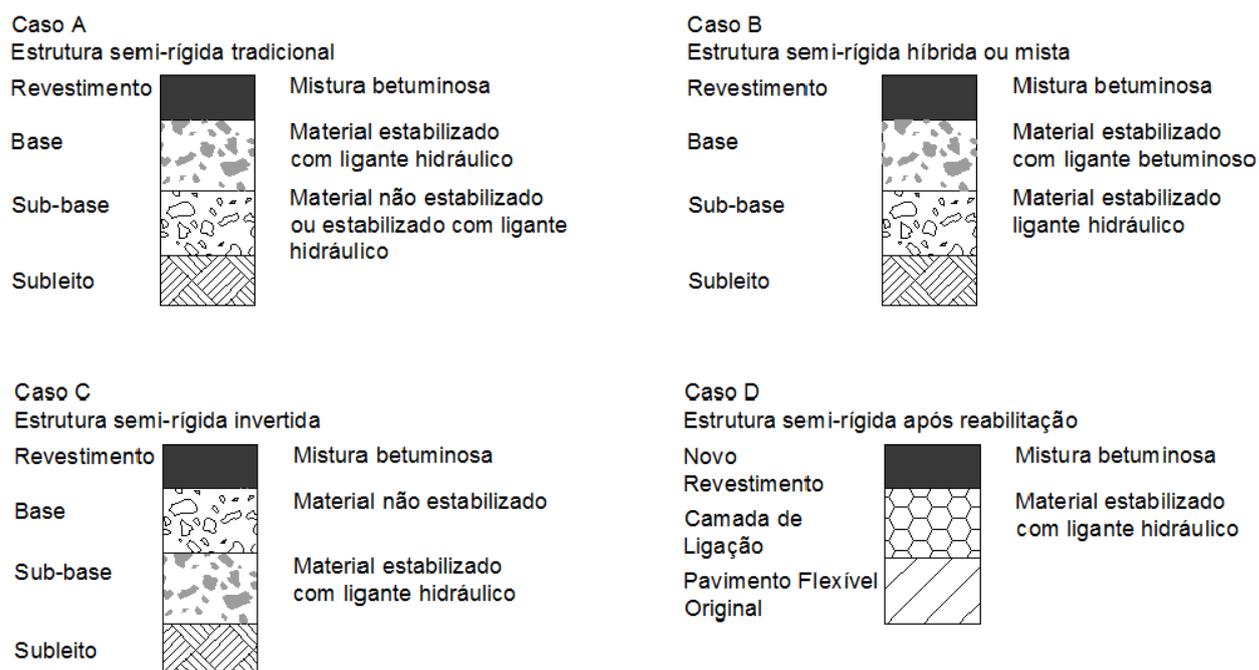
3.2 PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS

Um pavimento semi-rígido possui um revestimento asfáltico e pelo menos uma camada composta por um material estabilizado com ligante hidráulico, apresentando um comportamento entre o flexível e o rígido. Outra observação do mesmo autor é em relação ao aumento da resistência à tração, além de grandes ganhos de resistência à compressão com a adição de um ligante hidráulico a um material de pavimentação (BALBO, 2007, p. 50).

Segundo Balbo (2007, p. 51) existe 4 maneiras de um pavimento ser semi-rígido, sendo que todos eles apresentam uma camada com material estabilizado, fazendo aumentar grandemente sua resistência à compressão e à tração. A figura 6 representa estas estruturas.

O caso A é uma típica estrutura de pavimento semi-rígido e pode ser classificado como pavimento semi-rígido convencional. Já no caso B, o material estabilizado com ligante asfáltico é encontrado na sub-base do pavimento, sendo esta estrutura chamada de híbrida ou mista. No caso C, a presença da base granular sobre a sub-base estabilizada nos dá a expressão pavimento invertido. Enfim, o caso D indica uma estrutura de pavimentos composta por um antigo pavimento, restaurada com a sobreposição de outras camadas, incluída uma camada de material estabilizado com ligante hidráulico.

Figura 5 – Pavimentos semi-rígidos



(fonte: BALBO, 2007 p. 52)

3.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Nos revestimentos asfálticos nos preocupamos com carregamentos repetidos com intervalo de repouso curto. Trabalha-se num regime elástico, sem se preocupar com a ruptura do corpo de prova. Com a passagem de uma carga acontece deslocamento elástico reversível na camada asfáltica, onde a face superior fica submetida à compressão e a face inferior à tração. Segundo 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 solitação 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.

As deformações resilientes são deformações elásticas recuperáveis. Entretanto, não variam necessariamente de modo linear com as tensões aplicadas, e dependem de vários fatores que não são considerados no conceito convencional de elasticidade, como por exemplo a temperatura. Essa metodologia resultou na possibilidade de analisar e prever estados tensão-deformação de estruturas de pavimentos através de programas computacionais, como o *everstress 5.0*. O módulo de deformação resiliente é determinado pela seguinte expressão: (BRASIL, 2006, p. 49).

$$MR = \sigma_d / \epsilon_r \quad (\text{fórmula 3})$$

Sendo:

MR = módulo de deformação resiliente;

σ_d = tensão-desvio aplicada repetidamente;

ϵ_r = deformação específica axial resiliente correspondente a um número particular de repetição da tensão-desvio.

O módulo de resiliência tem grande importância no dimensionamento de pavimentos, visto que os materiais de pavimentação podem ser considerados elásticos não linear. De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 349), sabe-se que:

O MR [módulo de resiliência] é usado como entrada de dados para o cálculo de tensões e deformações nos diferentes pontos do pavimento. Ressalta-se que os materiais de pavimentação não são elásticos, sendo o uso da teoria da elasticidade uma aproximação. Apesar de dependente do tempo e da história de tensões, o comportamento de alguns materiais de pavimentação pode ser aproximado como elástico não linear.

O módulo de resiliência da mistura asfáltica depende fortemente da temperatura. O ensaio deve ser realizado até a 40°C, porque acima o comportamento da mistura passa a não ser tão elástica, mas passa a ser permanente. A mistura tem que ser feita para condições atmosféricas, por exemplo, em Porto Alegre, que tem temperaturas muito elevadas no verão se fizer uma mistura muito flexível, vai ter enormes deformações permanentes, mas não terá fadiga. Se numa região de clima frio fizer uma mistura rígida terá trincamento por fadiga.

3.4 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Deve-se fazer uma otimização analisando quais são as solicitações predominantes em cada camada do revestimento asfáltico. Na camada superior, o aspecto funcional é ter atrito pneu/pavimento e também é desejável que a camada superficial atenuar o ruído. Misturas muito fechadas com pouquíssimo índice de vazios, geram um ruído enorme, pois todas ondas sonoras são refletidas. Já uma camada superficial um pouco aberta, poderá gerar uma dissipação de som. Enquanto do ponto de vista estrutural, a camada superior tem que resistir os esforços de compressão, portanto tem que ter módulo de resiliência elevado.

De acordo com Balbo (2007, p. 109), o asfalto é um produto natural presente em rochas ou depósito lacustres. A mais importante matéria prima para sua obtenção é o petróleo.

Os Cimentos Asfálticos de Petróleo, (CAP) são obtidos por processos de refinamento do petróleo cru, para as finalidades específicas de pavimentação, podendo ser chamados de betumes por possuírem em grande quantidade (BALBO, 2007, p. 110-111).

O revestimento de um pavimento asfáltico é a camada que recebe diretamente as cargas dos veículos e a ação climática. Portanto deve ser impermeável e oferecer resistência a derrapagem, a fadiga e ao trincamento térmico (BERNUCCI et al., 2008, p. 157).

A distribuição granulométrica dos agregados influencia muito em várias propriedades que fazem aumentar a qualidade de um pavimento. Um material bem graduado tem maior resistência e maior vida de fadiga, já uma mistura com granulometria aberta, é deformável e permite a penetração de água. Conforme Bernucci et al. (2008, p. 121), sabe-se que:

A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, etc. [...]

Um dos concretos para pavimentação mais usados no Brasil é o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), que é o resultado da mistura de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico aquecidos em temperaturas escolhidas em função das características do ligante (BERNUCCI et al., 2008, p. 158). A figura 6 mostra um exemplo de misturas asfálticas usinadas a quente.

Figura 6 – Corpos de prova de mistura asfáltica a quente



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 161)

Quando a solução de um projeto for fazer uma camada asfáltica muito espessa, pode-se dividi-la em duas camadas. A parte superior da camada de revestimento asfáltico fica sujeita a esforços de compressão que geram deformações permanentes. Em cima, então, se coloca uma mistura mais rígida, pois essa mistura com MR elevado vai sofrer pequenas deformações

permanentes. Essa rigidez pode ser obtida com ligante asfáltico mais duro, e como o MR se torna mais elevado, as tensões que vão para camada inferior são menores, pois existe uma absorção maior das tensões geradas pelo tráfego. Na face de baixo do revestimento asfáltico ocorrem tensões de tração que geram fadiga, então precisa de uma camada que acomode melhor as deformações de tração, portanto uma camada mais flexível com MR menor e com maior resistência à tração.

O revestimento asfáltico deve ser executado em mais de uma camada, quando a espessura calculada for superior a 70 mm. Conforme Bernucci et al. (2008, p. 162), sabe-se que:

Quando a espessura de projeto de revestimento for maior que 70 mm é comum fazer uma subdivisão em duas camadas para fins de execução; a superior que fica em contato com os pneus dos veículos é chamada de camada de rolamento ou simplesmente de “capa” e tem requisitos de vazios bastante restritos, para garantir a impermeabilidade; a camada inferior é referida como camada de ligação ou intermediária (ou ainda de *binder*) e pode ser projetada com um índice de vazios ligeiramente maior, com a finalidade de diminuir o teor de ligante e baratear a massa asfáltica. Esse procedimento também modificará as características mecânicas e de flexibilidade da mistura, o que deve ser levado em conta no dimensionamento do pavimento.

3.5 EMPREGO DE GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos podem atuar de duas maneiras: desviando as trincas ou convertendo as trincas em microfissuras ao se propagarem, também por serem impermeáveis protegem as camadas inferiores da ação das chuvas, evitando assim que a água penetre nas microfissuras e cause uma deterioração prematura (BERNUCCI et al., 2008, p. 469).

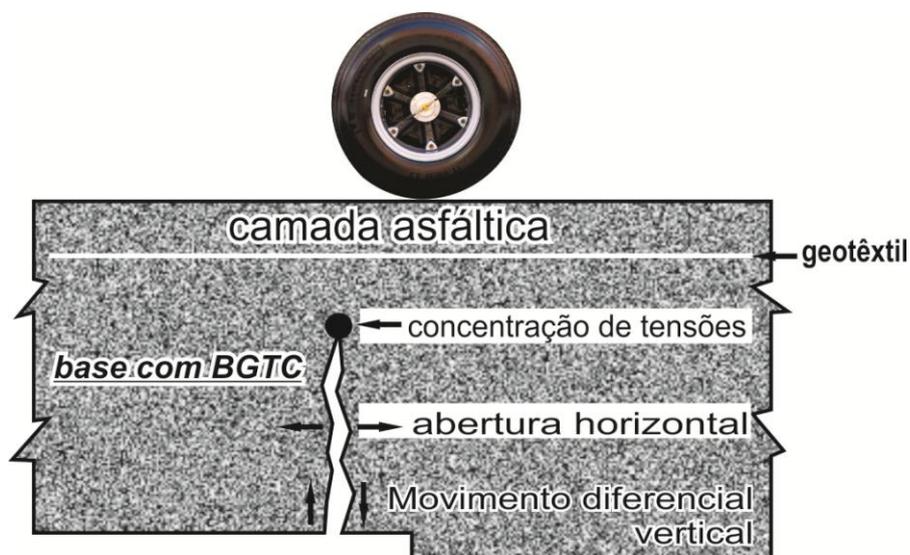
O retardamento da propagação das trincas ocorre, pois a interface entre a geotêxtil e o revestimento asfáltico forma uma camada de descontinuidade visco-elástica que minimiza a intensidade das tensões sobre a trinca existente no momento de solicitação da carga de roda ou efeito térmico. O uso do geotêxtil impregnado com asfalto tem um comportamento rígido sob tensões rápidas produzidas pelo tráfego e quando atuam tensões lentas, de origem térmica, tem um comportamento dúctil.

3.5.1 Geotêxtil

Quando são utilizados geotêxteis impregnados com ligante asfáltico na interface entre o revestimento antigo deteriorado e um recapeamento, devido à presença do geotêxtil, tem-se

uma taxa maior de ligante asfáltico nessa interface do que a obtida com uma pintura de ligação convencional. Esse ligante asfáltico melhora a desviar as trincas. E, quando refletidas, a reflexão é atenuada e normalmente na direção horizontal. Também ocorre uma manutenção da estanqueidade do revestimento. Não é tão efetivo na presença de grandes movimentos verticais ou horizontais, e é mais eficiente em regiões de clima ameno (BERNUCCI et al., 2008, p. 469). A figura 7 mostra uma estrutura de pavimento com geotêxtil.

Figura 7 – Geotêxtil abaixo da camada asfáltica



(fonte: adaptado de BERNUCCI et al., 2008, p. 472)

3.5.2 Geogrelha

A reflexão com o uso de geogrelha se dá através da formação de microfissuras de baixa intensidade que se propagam aleatoriamente, com progressão lenta, podendo ainda sua formação ser interrompida se houver descontinuidade do processo de dissipação de energia na extremidade das microfissuras, devido a mudanças de orientação nas trajetórias de propagação. (BERNUCCI et al., 2008, p. 471). A figura 9 mostra a geogrelha já aplicada e a camada asfáltica sendo executada.

Figura 8 – Geogrelha e uma camada asfáltica sendo aplicada em cima



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 471)

3.6 REFLEXÃO DE TRINCAS

É a propagação das trincas existentes no pavimento antigo seguindo sua trajetória e chegando até a nova camada de revestimento asfáltico. As trincas no pavimento antigo surgem devido as tensões que geram deflexões diferenciais, variação de temperatura e umidade. As trincas por reflexão surgem acima de juntas ou trincas existentes em camadas de revestimento antigo. Cuidados adicionais, como uso de uma camada que absorva as tensões que tentam chegar na nova camada de revestimento, devem ser tomados durante a restauração para reduzir a intensidade de sua propagação. As baixas temperaturas enrijecem o revestimento asfáltico, tornando a reflexão mais crítica e o alto volume de tráfego também favorece a propagação das trincas. São desenvolvidas tensões de tração elevadas nas camadas de recapeamento devido a movimentos originados nas trincas existentes no revestimento antigo deteriorado. A reflexão se dá normalmente de baixo para cima no recapeamento. As medidas a serem tomadas é o uso de um material geossintético, camadas intermediárias de alívio de tensões, espessura do recapeamento aumentada, reciclagem do revestimento existente, emprego de revestimentos asfálticos com ligantes modificados (BERNUCCI et al., 2008, p. 469-473).

3.6.1 Camadas intermediárias de alívio de tensões

São camadas executadas na superfície de uma base cimentada antes de receber a camada asfáltica de pavimento. Essas camadas intermediárias, chamadas de SAMI (*stress absorbing membrane interlayer*), podem ser constituídas de microrrevestimentos asfálticos, tratamentos superficiais por penetração com ligantes asfálticos modificados por polímeros ou por borracha de pneus, ou mesmo misturas asfálticas com elevado teor de asfalto modificado por polímero em camadas delgadas. Sua principal função é dissipar os movimentos e tensões transformando em trincas e juntas de baixa intensidade. Esse efeito ocorre devido às características de recuperação elástica do ligante asfáltico empregado (BERNUCCI et al., 2008, p. 472).

3.7 SUBLEITO

É a camada que recebe as cargas vindas das camadas superiores, portanto deve ser capaz de resisti-las. Conforme Balbo (2007, p. 38):

Pode-se concluir que os esforços verticais transmitidos ao subleito devem ser compatíveis com sua capacidade de resistir-lhes. Essa assertiva é naturalmente válida para qualquer outra camada superior do pavimento. Para aliviar as pressões sobre as camadas de solo inferiores, surgem as camadas de base e sub-base, que também podem desempenhar papel importante na drenagem subsuperficial dos pavimentos.

O reconhecimento dos solos do subleito é feito em duas fases:

- a) sondagem no eixo e nos bordos da plataforma da rodovia para identificação dos diversos horizontes de solos (camadas) por intermédio de uma inspeção expedita do campo e coleta de amostras;
- b) realização dos ensaios já citados nas amostras das diversas camadas de solo para um posterior traçado dos perfis de solos.

Para a identificação das diversas camadas de solo, são feitas sondagens, de 100 a 200 m no eixo e nos bordos da estrada. A profundidade dos furos de sondagem será, de modo geral, de 0,60 m a 1,00 m abaixo do greide projetado para a regularização do subleito (BRASIL, 2006, p. 124-125).

3.8 CAMADAS GRANULARES E CIMENTADAS

Materiais granulares são aqueles que não possuem coesão e portanto não tem resistência à tração, mas resistem aos esforços de compressão. Os materiais cimentados, na sua maioria, são materiais granulares que recebem adição de cimento, cal ou outro aditivo, proporcionando um aumento de resistência à compressão e uma resistência à tração. Os materiais cimentados mais frequentes são: brita graduada tratada com cimento (BGTC); solo-cimento; solo-cal-cimento; concreto compactado a rolo (BERNUCCI et al., 2008, p. 352).

3.8.1 Brita graduada tratada com cimento

A brita graduada tratada com cimento (BGTC) tem sido bastante utilizada, principalmente em pavimentos de vias de alto volume de tráfego. No Brasil, começou a ser mais usada no final da década de 1970. A BGTC é empregada geralmente como base de pavimentos com revestimentos betuminosos. Na década de 1990, passou-se a empregar a BGS como base e a BGTC como sub-base em pavimentos asfálticos, denominados neste caso de pavimentos invertidos (BERNUCCI et al., 2008, p. 362-363). A figura 9 mostra a BGTC.

Figura 9 – Brita graduada tratada com cimento



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 356)

A estabilização dos materiais pode ser de três tipos:

- a) granulométrica: os estudos em laboratório são desenvolvidos para melhorar a granulometria do solo com a adição de agregados ou areia;
- b) química: se utiliza um agente químico estabilizador como cimento ou cal para conferir ao solo uma ação de cimentação entre as partículas e grãos;
- c) a física: ocorre estabilização com a aplicação mecânica de uma energia para a compactação do solo.

Também podem ser usados dois ou mais tipos de estabilização juntos, como, por exemplo, ocorre na compactação, que é genericamente utilizada conjuntamente a todos os outros tipos de estabilização. Dentre as diversas formas existentes para a estabilização química de solos, a estabilização com cimento Portland é a que possui maior fonte de dados e de estudos relacionados às propriedades de resiliência e fadiga (FRANCO, 2007, p. 123-124).

Uma pequena quantidade de cimento adicionada a brita graduada simples confere um aumento de resistência à compressão e à tração deste material. Conforme Balbo (2007, p. 195), sabe-se que:

A BGTC (brita graduada tratada com cimento) compreende uma mistura de agregados do tipo BGS (pedras britadas) com uma pequena quantidade de cimento Portland, em geral de 3% a 4% em peso da mistura total. Esse baixo consumo de cimento significa algo em torno de 75kg/m³.

3.8.2 Macadame hidráulico e macadame seco

O macadame hidráulico foi um dos materiais mais empregados nas primeiras rodovias brasileiras. Trata-se de camada granular, composta por agregados graúdos, naturais ou britados, cujos vazios são preenchidos em pista por agregados miúdos e aglutinados pela água. A estabilidade é obtida pela ação mecânica enérgica de compactação. Os agregados graúdos devem ser duros, limpos e duráveis e livres de contaminações prejudiciais.

O macadame seco é um material com distribuição granulométrica semelhante ao macadame hidráulico, porém sem uso de água para auxílio do preenchimento dos agregados graúdos pelos miúdos. Os agregados graúdos são de dimensões variando entre 2” e 5”, chamados de “pedra pulmão”, de graduação uniforme, e preenchidos por agregados miúdos. As espessuras

das camadas acabadas variam entre 12 e 20 cm (BERNUCCI et al., 2008, p. 357-358). A figura 10 mostra o macadame hidráulico e o seco, respectivamente.

Figura 10 – Macadame hidráulico e seco



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 353)

4. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DE PAVIMENTOS

Os principais mecanismos que fazem um pavimento se deteriorar e são usados no programa *everstress 5.0* são a fadiga, deformação permanente e tensões de tração.

4.1 FADIGA

Fadiga é o enfraquecimento progressivo de um material devido a alternância de esforços, e está sempre associada à tração. É importante conhecer a deformação atuante na face inferior da camada asfáltica. Nos meios contínuos a fadiga pode ocorrer, no caso da brita graduada simples não ocorre. É fortemente influenciada pela deformação horizontal na fibra inferior do revestimento asfáltico, conseqüentemente a partir dessas respostas é possível estimar o trincamento por fadiga.

Os materiais de pavimentação não rompem por tensão de ruptura, mas por alternância de cargas que provocam fadiga. Isso acontece com qualquer material contínuo. A fadiga é inevitável, mas se pode fazer pavimentos para não sofrer trincamento prematuro. Para isso é necessário conhecer bem o material e determinar o módulo de deformação elástica (recuperáveis) nos materiais de pavimentação que é chamado de módulo de resiliência.

É um fenômeno que se manifesta nos materiais quando ocorre uma repetição de solicitação em níveis de tensão inferiores àqueles de ruptura. Lentamente se desenvolve alterações na estrutura interna, que resulta na perda de características estruturais originais. Isso gera um processo de microfissuração progressiva que resulta no desenvolvimento de fraturas e, conseqüentemente no rompimento do material (BALBO, 2007, p. 261).

A fadiga nos revestimentos asfálticos é de grande importância para o bom dimensionamento de estruturas de pavimentos. Além dos materiais asfálticos, a fadiga ocorre também nas camadas de base ou sub-base estabilizadas quimicamente, tais como as britas graduadas tratadas com cimento (FRANCO, 2007, p. 189).

A fadiga se manifesta em todos materiais de maneira progressiva, desde quando o material começa a ser solicitado já começa ocorrer microfissuração, que ao longo da sua vida útil vai aumentando. Conforme Bernucci et al. (2008, p. 311-312), sabe-se que:

[...] 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.

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).

A fadiga **não** é o principal mecanismo de degradação dos pavimentos nos seguintes casos:

- a) pavimentos com revestimento asfáltico muito delgado, como por exemplo, tratamento superficial. Quando são muito delgados, eles trabalham à compressão. Nesse caso, o que pode acontecer é uma ruptura da base granular por cisalhamento;
- b) pavimento com revestimento asfáltico muito espessos, nesse caso a espessura é tão elevada que as tensões na fibra inferior acabam sendo baixas. Essas tensões geram deformações muito pequenas e mesmo quando surge um trincamento, essa trinca sofre uma auto selagem;
- c) pavimento com revestimento asfáltico sobre base cimentada, por exemplo, a brita graduada tratada com cimento. Neste caso, tem-se uma camada asfáltica com módulo de, por exemplo: 3000 a 4000 MPa sobre uma camada cimentada e essa camada cimentada tem um módulo bem superior. Também, a espessura da camada cimentada é maior que a espessura do revestimento asfáltico, portanto pelo fato da camada inferior ser mais espessa e ter módulo maior, na fibra inferior da camada asfáltica as tensões são de compressão.

4.2 DEFORMAÇÕES PERMANENTES

A deformação permanente, conforme mostrado na figura 11 na prática se percebe pelos afundamentos ao longo da trilha de roda e pelas irregularidades na superfície do pavimento que, por sua vez, dificultam a drenagem e aumentam o risco de aquaplanagem. Esses efeitos causam insegurança e falta conforto ao rolamento das estradas, ruas e avenidas. Portanto, ocorre uma redistribuição da camada asfáltica do revestimento com o aumento das cargas. Nas áreas urbanas em pontos concentrados como em paradas de ônibus, onde a velocidade é baixa. Porém, este tipo de defeito é mais uma questão de dosagem da mistura asfáltica, quantidade de teor de ligante, do que de dimensionamento de pavimentos, pois não depende da espessura da camada de revestimento. Quando se pretende implantar um novo método de dimensionamento, o efeito da deformação permanente tem que ser avaliado a partir dos modelos que vem sendo propostos. (FRANCO, 2007, p. 173-174).

Figura 11 – Deformação permanente no revestimento asfáltico



(fonte: FRANCO, 2007, p. 174)

Este defeito deve ser avaliado em todas as camadas do pavimento. De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 316), sabe-se que:

Deformação permanente é um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica, podendo ser atribuída ao revestimento – Figura 12 (a), ou às subcamadas – Figura 12 (b), ou ainda a uma combinação de efeitos. As camadas não-asfálticas abaixo do revestimento podem apresentar deformações permanentes principalmente por densificação adicional pelo tráfego e por ruptura ao cisalhamento. Esses problemas podem ser evitados por uma seleção dos materiais e compactação adequada e um bom projeto.

Figura 12 a – Deformação permanente no revestimento



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 316)

Figura 12 b – Deformação permanente no sistema



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 316)

5 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

Buscando modernizar e introduzir análises informatizadas para os métodos de dimensionamento de pavimentos, surgiram as análises mecanística-empíricas, que levam em consideração a deflexão superficial, deformação horizontal, tensão horizontal de tração e tensão vertical de compressão. Análise mecanística-empírica de pavimentos vem da mecânica dos sólidos. Parte-se de uma estrutura pré-estabelecida e é verificado se o pavimento está em condições de suportar o tráfego.

A necessidade de melhorar os projetos de pavimentação existentes no Brasil incentivou o conhecimento de novas misturas asfálticas. Conforme Bernucci et al. (2008, p. 178), sabe-se que:

A necessidade de novos padrões de misturas asfálticas serviu de motivação para o desenvolvimento de novos ensaios de laboratório com o objetivo de prever a trabalhabilidade e o desempenho mecânico (resistência à deformação permanente para capa de rolamento, rigidez e resistência ao trincamento por fadiga para camadas de ligação, ensaios considerados atualmente fundamentais para o projeto de mistura a quente).

Dimensionar um pavimento significa definir espessuras e MR de camadas e os tipos de materiais a serem utilizados, assim como suas propriedades de modo que se consiga alcançar uma estrutura que suporte o volume de tráfego e as condições climáticas locais (BALBO, 2007, p. 375).

O melhor dimensionamento de um pavimento asfáltico deve assegurar que a repetição de cargas não irá causar trincamento da camada asfáltica por fadiga dentro do período de vida do projeto. Além disso, deve garantir que as espessuras das camadas da estrutura sejam capazes de minimizar o afundamento de trilha de roda (FRANCO, 2007, p. 1).

O método empírico de dimensionamento do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) baseado no método USACE (*United States Army Corps of Engineers*) e o da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) calcula a estrutura do pavimento visando a proteção do subleito contra a geração de deformações plásticas excessivas durante sua vida útil. Sua aplicação no Brasil tem se mostrado com bom

desempenho, pois existem raras ocasiões de afundamento de trilha de roda. Portanto, esse método deve ser completado por análises que permitam considerar-se, no dimensionamento, o problema do trincamento por fadiga das camadas asfálticas. O melhor procedimento para garantir essa análise é a modelagem empírica-mecanística, pois está baseada em propriedades mecânicas dos solos e materiais de pavimentação (BRASIL, 2006, p. 150).

O método empírico de dimensionamento de pavimentos tem sido assunto de discussão entre engenheiros por muitos anos. Esses métodos se baseiam em observações e experiências com certos tipos de pavimentos e de materiais e condições específicas de clima que não necessariamente são da região de projeto. Portanto não podem ser generalizados com confiabilidade para outras regiões diferentes daquelas que foram desenvolvidos. Com a necessidade de se melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural, na qual podem-se considerar as condições ambientais e de tráfego diferentes daquelas para as quais os métodos empíricos foram desenvolvidos foram criados os métodos mecanístico-empíricos (FRANCO, 2007, p. 2).

Segundo Medina e Motta (2005, p. 405) um exemplo de dimensionamento mecanístico-empírico pode ser realizado seguindo os seguintes passos:

- a) definir o número N de projeto considerando as informações do tráfego previsto;
- b) ensaiar os materiais granulares existentes na região que serão usados e o subleito para obter os módulos de resiliência e as leis de deformação permanente, considerando nos ensaios as variações de umidade;
- c) definir um valor de módulo de resiliência para a mistura asfáltica a ser utilizada no revestimento em função da temperatura média esperada para o local da obra ao longo do ano;
- d) adotar uma estrutura inicial, definindo as espessuras iniciais de cada camada, com os materiais disponíveis;
- e) calcular, com o programa de dimensionamento empírico-mecanístico o estado de tensões e deformações atuantes na estrutura carregada com o eixo padrão;
- f) comparar os valores calculados de deformações e tensões com os critérios de ruptura estabelecidos em função do número N de projeto (curvas de fadiga, deflexão admissível e tensão ou deformação de compressão admissível no subleito);
- g) verificar o afundamento de trilha de roda, previsto para o número N de projeto considerando-se a contribuição de todas as camadas e comparar com valores admissíveis;

- h) se os critérios previstos em “f” e “g” forem atendidos, considera-se o pavimento dimensionado. Caso alguns dos critérios não sejam atendidos, devem-se alterar as espessuras e refazer os cálculos.

Ainda não se tem apenas um critério de dimensionamento universal. Cada critério apresenta vantagens e desvantagens inerentes à consideração de parâmetros físicos e numéricos (BALBO, 2007, p. 377).

5.1 NÚMERO N

É o número de repetições da carga do eixo padrão sobre o pavimento durante sua vida útil. Foi definido de forma arbitrada como sendo um eixo simples de rodas duplas de 8,2 toneladas. O número N é calculado pela fórmula 1:

$$N = V_t \cdot F_v \cdot F_r \quad (\text{fórmula 1})$$

Sendo:

N= número de repetições da carga do eixo padrão;

V_t = volume total de veículos em todo período de projeto;

F_v = fator de veículos;

F_r = fator climático regional.

As cargas dos veículos são diferentes, portanto é necessário transformar em cargas equivalentes, em poder destrutivo, à carga do eixo padrão de 8,2 toneladas. O fator de veículos é definido pela fórmula 2: (FRANCO, 2007, p. 151).

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

Sendo:

F_v = fator de veículos;

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

F_c = é o fator de carga: um número que, multiplicado pelo número de eixos que operam, fornece o número de eixos equivalentes ao eixo padrão.

5.2 SOFTWARE EVERSTRESS 5.0

Este *software* livre e disponível na internet foi desenvolvido pelo WSDOT (*Washington State Department of Transportation*) nos Estados Unidos, fazendo parte do pacote Everseries de análise de pavimentos. Com esse *software* se calcula as tensões, deformações e deslocamentos nas camadas elásticas semi-infinitas do pavimento. O programa trabalha com um limite de 5 camadas, 20 cargas e 50 pontos de avaliação. Os parâmetros de entrada para o software são (WASHINGTON STATE, 2005, p. 1)

- a) espessura das camadas;
- b) carregamento da estrutura;
- c) coeficiente de Poisson das camadas;
- d) módulo de resiliência das camadas;
- e) pontos em que se deseja obter os resultados (abaixo da roda e entre as rodas);
- f) raio de aplicação da carga.

A figura 13 mostra a tela inicial onde o programa solicita alguns parâmetros.

Figura 13 – Tela inicial para entrar com alguns parâmetros

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							

(fonte: WASHINGTON STATE, 2005, p. 8)

Depois de ter os dados preenchidos e selecionando <Load & Evaluation Locations>, irá abrir uma tela com característica do carregamento, número de cargas, localização de cada ponto da carga e o número de pontos de avaliação XY. Os pontos de avaliação serão calculados a partir da espessura das camadas de entrada. As coordenadas Z são os pontos padrão na parte inferior da camada do pavimento nos quais os parâmetros de saída são calculados (WASHINGTON STATE, 2005, p. 8). A figura 14 mostra a tela de entrada de dados das características do carregamento e dos pontos de avaliação.

Figura 14 – Tela para entrar dos pontos de avaliação, da carga e pressão dos pneus

(WASHINGTON STATE, 2005, p. 8)

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) deformações nos sentidos de X-Y-Z (E_{xx} , E_{yy} , E_{zz});
- e) deflexões nos sentidos de X-Y-Z (U_x , U_y , U_z);
- f) tensões principais (S_1 , S_2 , S_3);
- f) deformações principais (E_1 , E_2 , E_3).

6 MODELOS DE PREVISÃO 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.

6.1 MODELOS DE FADIGA

Para fazer uma comparação dos valores de tensões, deflexões e deslocamentos calculados pelo *software* nesta pesquisa são usados os modelos de vida de fadiga para estruturas asfálticas da República Sul-Africana e assim, poder determinar os valores admissíveis de cada um. Estes modelos consistem em ábacos e gráfico 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 semi-infinitas 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.

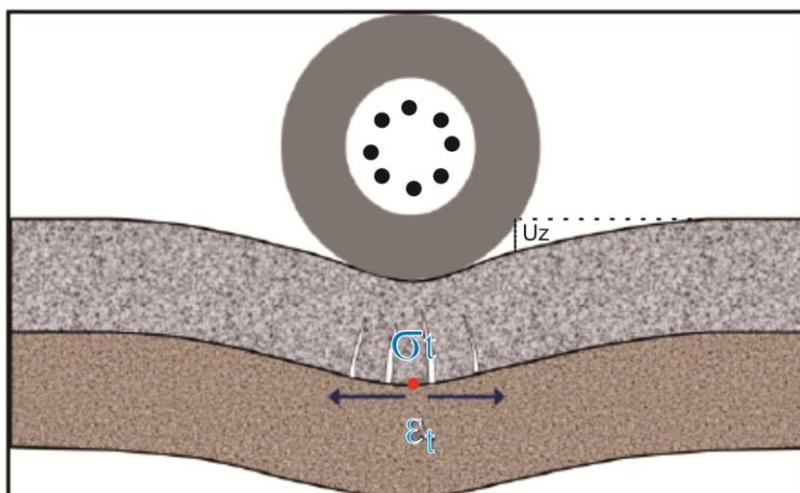
6.2 CONCRETO ASFÁLTICO

Na mistura asfáltica do dimensionamento do pavimento da rodovia BR-290 se analisa três respostas estruturais em seus respectivos pontos críticos, considerando os parâmetros de ruptura dos modelos de fadiga e deformação permanente:

- a) deflexão superficial (U_z)
- b) deformação horizontal na parte inferior da camada asfáltica (ϵ_t);
- c) tensão horizontal de tração (σ_t).

A figura a seguir ilustra os pontos críticos na camada asfáltica:

Figura 15 – Deflexão, tensão e deformação na camada asfáltica



(fonte: adaptado de ÁFRICA do Sul, 2013, p. 73)

6.2.1 Deflexão superficial (U_z)

A deflexão superficial é verificada no topo da camada asfáltica, tendo contato direto com o tráfego. Preussler¹ (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 o dimensionamento dos dois tipos de pavimento desta rodovia tem-se a situação de espessura maior que 10 cm.

¹ 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.

$$\text{Log}(U_z) = 3,479 - 0,289 \cdot \log(N_f) \text{ para } h > 10 \text{ cm} \quad (\text{modelo 1})$$

$$\text{Log}(U_z) = 3,148 - 0,188 \cdot \log(N_f) \text{ para } h < 10 \text{ cm} \quad (\text{modelo 2})$$

Sendo:

N_f = é o número de repetições de carga do pavimento;

U_z = é a deflexão máxima total admissível X (0,01mm).

6.2.2 Deformação horizontal na parte inferior da camada asfáltica (ϵ_t)

O trincamento por fadiga é provocado pela repetição das cargas alternadas e amplitude de variação de tensões também é um parâmetro importante. Esse trincamento é controlado pela deformação horizontal, sendo que nas fibras inferiores da camada de concreto asfáltico do pavimento invertido é onde acontecem os maiores esforços de tração.

A forma geral das funções de iniciação de trinca de transferência para camadas de asfalto é calculada pelo modelo 3. A tabela 1 contém os coeficientes de regressão α e β , considerando rodovia de categoria B e módulo de resiliência aproximado do concreto asfáltico (ÁFRICA do Sul, 2013, p. 73).

$$N_f = 10^{\alpha(1 - \frac{\log \epsilon_t}{\beta})} \quad (\text{modelo 3})$$

Sendo:

N_f = vida de fadiga;

α, β = coeficientes de regressão;

ϵ_t = deformação horizontal.

Tabela 1 – Coeficientes de regressão para camada asfáltica com módulo de 5000 e 3000 MPa

Bases de asfalto espessos (> 75mm)										
Nível de confiabilidade (categoria)	Rigidez do asfalto (MPa)									
	1000		2000		3000		5000		8000	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
95% (A)	16.44	3.378	16.09	3.357	15.78	3.334	15.52	3.317	15.086	3.227
90% (B)	16.81	3.453	16.43	3.428	16.11	3.403	15.73	3.362	15.296	3.272
80% (C)	17.25	3.543	16.71	3.487	16.26	3.435	15.83	3.383	15.390	3.291
50% (D)	17.87	3.671	17.17	3.583	16.68	3.524	16.10	3.441	15.650	3.346
Mudança de fatores para propagação de fissuras										
Se a espessura da camada < 25mm					SF = 1					
Se a espessura da camada \geq 25mm					SF = 0.0489.t - 0.2225					
Onde t = espessura da camada em mm										

(fonte: ÁFRICA do Sul, 2013, p. 73)

Para este trabalho, foram utilizados, os coeficientes $\alpha = 15,73$ e $\beta = 3,362$, para MR de 5000 MPa e $\alpha = 16,11$ e $\beta = 3,403$ para MR de 3000 MPa, representando os coeficientes do modelo 3 para MR da camada asfáltica de 5000 e 3000 MPa.

O trincamento começa na parte inferior da camada asfáltica, portanto este modelo sugere um fator de correção (SF) para o N_f , obtido em função da espessura do concreto asfáltico, que neste trabalho é maior que 25 mm. O SF é multiplicado pelo N_f para se obter o N_{AASHTO} correspondente à vida de fadiga do pavimento. O modelo 4 apresenta o cálculo de N_{AASHTO} .

$$N_{AASHTO} = N_f \times SF \quad (\text{modelo 4})$$

Sendo:

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

N_f = é o número de repetições de carga do início do trincamento;

SF = fator de correção, conforme tabela 1.

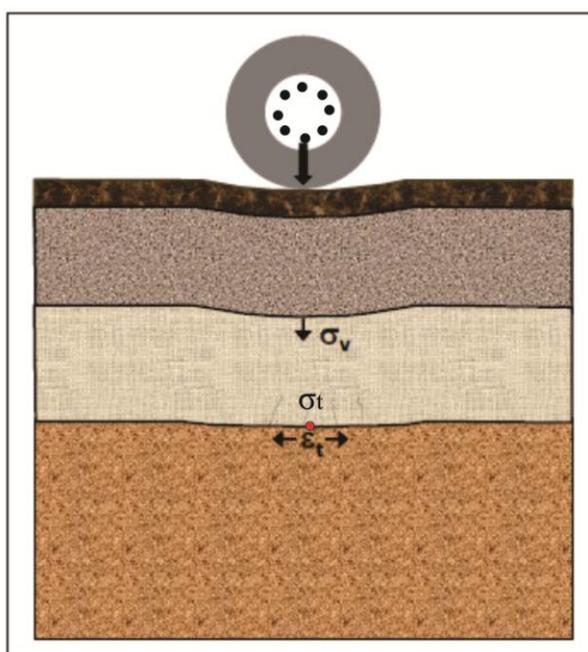
6.2.3 Tensão horizontal de tração (σ_t)

A ruptura por tensões de tração acontece na fibra inferior da camada asfáltica do pavimento invertido. Para esta situação, considera-se para a mistura asfáltica convencional a tensão horizontal de tração admissível $\sigma_{tadm} = 1$ 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 (BALBO, 2007, p. 227).

6.3 BGTC

Na camada cimentada pode ocorrer esmagamento do material no topo da camada, ruptura por fadiga ou trincamento por retração. Os parâmetros de ruptura utilizados para a camada de base são a tensão vertical de compressão no topo de sua camada, a deformação horizontal e a tensão horizontal de tração na fibra inferior da camada. Esses três pontos críticos serão especificados a seguir com os modelos de fadiga utilizados para a determinação dos valores admissíveis dessas deformações e tensões. A figura 16 mostra os pontos de análise na camada de BGTC.

Figura 16 – tensão e deformação na BGTC



(fonte: ÁFRICA do Sul, 2013, p. 78)

6.3.1 Tensão vertical de compressão (σ_v)

Para camada de base 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 (ÁFRICA do Sul, 2013, p. 79) a tensão vertical de compressão admissível é calculada pelo modelo 5:

$$N_{ci/ca} = 10^{a(1-\frac{\sigma_v}{b UCS})} \quad (\text{modelo 5})$$

Sendo:

$N_{ci/ca}$ = é o número de repetições de carga do pavimento da AASHTO;

σ_v = é a tensão vertical de compressão no topo da camada;

a, b = constantes dada pela tabela 3;

UCS = é a resistência à compressão simples em KPa, valores recomendados pela tabela 2.

Tabela 2 – Valores de resistência à compressão UCS

Classe inicial	Módulo (MPa)	Deformação na ruptura (ϵ_b)	UCS (kPa)	Classe equivalente granular	Módulo (MPa)
C3	2 000	125	2250	EG4	300
C4	1 500	145	1125	EG5	200

(fonte: ÁFRICA do Sul, 2013, p. 79)

6.3.2 Deformação horizontal (ϵ)

A camada de BGTC tem um módulo de resiliência relativamente alto logo após sua construção, por isso se desenvolvem as deformações horizontais na sua base, ou seja, na fibra inferior e, essas microfissuras se propagam para superfície e podem comprometer o desempenho da estrutura do pavimento. Apesar da presença de microfissuras, a camada cimentada ainda permanece intacta e apresenta uma resistência à compressão simples muito elevada, porém, a resistência à tração deve ser avaliada, pois a camada rompe à tração. Segundo África (2013, p. 79) a deformação horizontal de extensão (ϵ) é dada pelo modelo 6:

$$N_{eff} = SF \cdot 10^{c(1-\frac{\epsilon}{d \epsilon b})} \quad (\text{modelo 6})$$

Sendo:

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

ϵ = é a deformação horizontal na parte inferior da camada, em microstrain ($\mu\epsilon$);

c, d = constantes fornecidas pela tabela 3;

ϵ_b = é o valor recomendados pela tabela 2, levando em consideração o limite de ruptura;

SF = fator de correção, depende da espessura da camada, conforme indicado na tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes e fator de correção

Mudança de fatores (SF) para explicar a espessura da camada (t)						
espessuras			Fator de desvio			
< 102 mm			1			
102 mm to 319 mm			10 ^(0.00285t - 0.293)			
> 419 mm			8			
Constantes						
Nível de confiabilidade	Início do esmagamento		esmagamento avançado		fadiga eficaz	
	a	b	a	b	c	d
50% (Categoria D)	8.216	1.21	8.894	1.31	7.06	7.86
80% (Categoria C)	7.706	1.31	8.384	1.23	6.87	7.66
90% (Categoria B)	7.506	1.10	8.184	1.20	6.84	7.63
95% (Categoria A)	7.386	1.09	8.064	1.19	6.72	7.49

(fonte: ÁFRICA do Sul, 2013, p. 79)

6.3.3 Tensão Horizontal de tração (σ_t)

A tensão horizontal de tração é verificada na fibra inferior da camada de BGTC, pois é neste ponto crítico que começam as microfissuras que posteriormente se propagam em direção a camada asfáltica. De acordo com ensaios, considera-se para a tensão horizontal de tração admissível $\sigma_{tadm} = 1,20$ MPa (BALBO, 2007, p. 225).

6.4 SUBLEITO

No topo do subleito é analisada a deformação permanente ϵ_v , conforme mostra a figura 17. Esta deformação depende muito da espessura das camadas superiores, pois elas dissipam as tensões que chegam no subleito. Segundo África (2013, p. 81) a deformação no subleito é dada pelo modelo 7:

$$N_{PD} = 10^{(a - 10 \log \epsilon_v)} \quad (\text{modelo 7})$$

Sendo:

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

ϵ_v = é a deformação horizontal na parte inferior da camada, em microstrain ($\mu\epsilon$);

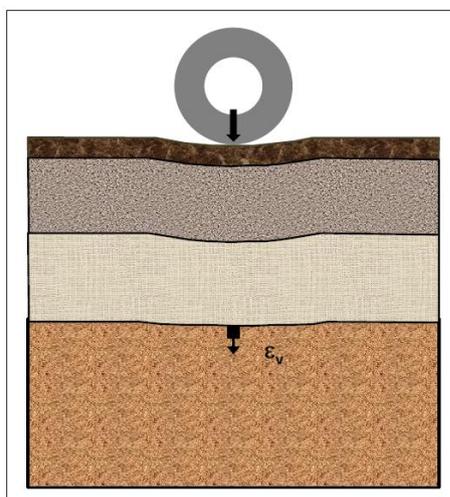
a = constantes dada pela tabela 4.

Tabela 4 – Constantes para categoria B

Reliability Level	Constants	
	A	
	10 mm Terminal Rut Depth	20 mm Terminal Rut Depth
95% (Category A)	33.70	36.70
90% (Category B)	33.47	36.47
80% (Category C)	33.38	36.38
50% (Category D)	33.30	36.30

(fonte: ÁFRICA do Sul, 2013, p. 81)

Figura 17 – Deformação no subleito



(fonte: ÁFRICA do Sul, 2013, p. 80)

6.5 ESTRUTURAS ANALISADAS

Para analisar o comportamento das diferentes estruturas de pavimentos, dois tipos foram desenvolvidos. O primeiro é um pavimento semi-rígido e o segundo um invertido.

6.5.1 Estrutura 1: pavimento semi-rígido

Esta estrutura é calculada pela seguinte combinação de camada de materiais:

- a) camada com 15 cm de concreto asfáltico convencional;
- b) camada de base com 30 cm de BGTC;
- c) camada de sub-base com 20 cm de BGS;

d) macadame seco com 20 cm de espessura.

A figura 18 mostra as espessuras, os módulos de resiliência e os coeficientes de *Poisson* de cada camada.

Figura 18 – Estrutura do pavimento semi-rígido

		Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson (μ)
concreto asfáltico	5000 MPa	8	5000 MPa	0,3
	3000 MPa	7	3000 MPa	0,3
Base de BGTC	15000 MPa	30	15000 MPa	0,20
Sub-base de BGS	200 MPa	20	200 MPa	0,35
Macadame seco	300 MPa	20	300 MPa	0,35
Subleito	200 MPa		200 MPa	0,45

(fonte: montagem elaborada pelo autor)

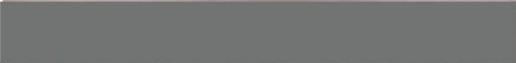
6.5.2 Estrutura 2: pavimento invertido

Esta estrutura é calculada pela seguinte combinação de camada de materiais:

- camada com 11 cm de concreto asfáltico com ligante polimerizado;
- camada com 12 cm de concreto asfáltico com ligante convencional;
- camada de base com 20 cm de BGS;
- camada de sub-base com 20 cm de BGTC;
- macadame seco com 20 cm de espessura.

A figura 19 mostra as espessuras, os módulos de resiliência e os coeficientes de *Poisson* de cada camada.

Figura 19 – Estrutura do pavimento invertido

		Espessura cm	Módulo de Resiliência MPa	Coefficiente de Poisson (μ)
concreto asfáltico		11	5000 MPa	0,3
		12	3000 MPa	0,3
Base de BGS		20	200 MPa	0,35
Sub-base de BGTC		20	15000 MPa	0,20
Macadame seco		20	250 MPa	0,35
Subleito				0,45

(fonte: montagem elaborada pelo autor)

7 SIMULAÇÃO, RESULTADOS E CUSTOS

A estrutura do pavimento projetado para a BR-290 foi dimensionada usando-se o método mecanístico para dimensionamento de pavimentos da República da África do Sul. 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 adoção deste método para este trabalho se deve aos seguintes aspectos:

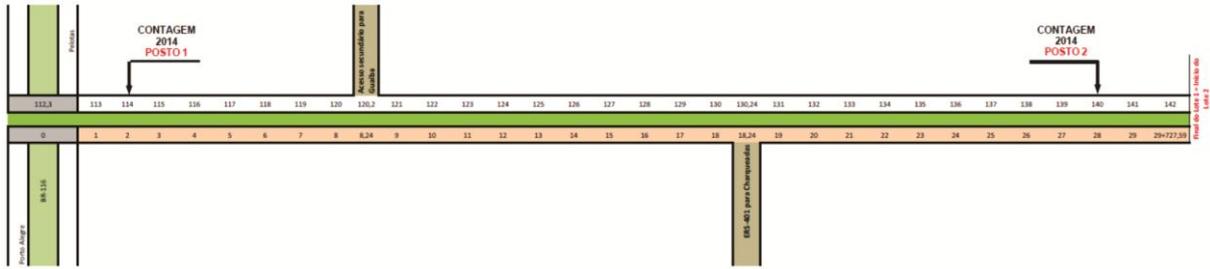
- a) a República Sul-Africana é um dos países mais avançados em termos de estudo e implantação de novas tecnologias na área de pavimentação;
- b) os modelos de fadiga do concreto asfáltico e de materiais artificialmente cimentados obtidos em ensaios laboratoriais foram calibrados através de cuidadoso monitoramento de pavimentos reais;
- 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.

Para o estudo do volume tráfego da rodovia BR-290 foi considerado o primeiro lote, dividido em 2 sub-trechos, ao longo de sua extensão de 29,7 km, considerando o NAASHTO acumulado para 10 anos de projeto, obteve-se: $NAASHTO = 1,95 \times 10^7$ para o sub-trecho do km 140, no posto 2 de contagem.

Como esta pista tem duas faixas, considerou a faixa da direita mais carregada, portanto com 90% do volume de tráfego, conforme mostra a tabela 5 todos os valores já estão calculados.

A figura 20 mostra os postos de contagem de tráfego:

Figura 20 – Postos de contagem de tráfego



(fonte: DNIT, estudo de tráfego, 2014)

Tabela 5 – Valor do N_{AASHTO} estimado para 10 anos de projeto

PROJEÇÃO DO VMDAT E DO NÚMERO N									
Rodovia:		BR-290/RS							
Posto 2:		km 140							
Ano	Valores do Número N				Observações				
	Passeio	Coletivo	Carga	Total	USACE		AASHTO		
					Ano a Ano	Acumulado	Ano a ano	Acumulado	
2014	6.112	426	2.395	8.933	-	-	-	-	Projeto
2015	6.326	441	2.479	9.246	-	-	-	-	Obra
2016	6.547	456	2.566	9.569	-	-	-	-	Obra
2017	6.776	472	2.655	9.904	7,74E+06	7,74E+06	1,84E+06	1,84E+06	1º ano
2018	7.014	489	2.748	10.251	8,01E+06	1,58E+07	1,91E+06	3,75E+06	
2019	7.259	506	2.845	10.610	8,29E+06	2,40E+07	1,97E+06	5,72E+06	
2020	7.513	524	2.944	10.981	8,58E+06	3,26E+07	2,04E+06	7,76E+06	
2021	7.776	542	3.047	11.365	8,88E+06	4,15E+07	2,11E+06	9,88E+06	
2022	8.048	561	3.154	11.763	9,19E+06	5,07E+07	2,19E+06	1,21E+07	
2023	8.330	581	3.264	12.175	9,52E+06	6,02E+07	2,26E+06	1,43E+07	
2024	8.622	601	3.378	12.601	9,85E+06	7,01E+07	2,34E+06	1,67E+07	
2025	8.923	622	3.497	13.042	1,02E+07	8,03E+07	2,43E+06	1,91E+07	
2026	9.236	644	3.619	13.498	1,06E+07	9,08E+07	2,51E+06	2,16E+07	10º ano
FAIXA MAIS CARREGADA $N \times 0,9 =$					8,17E+07		1,95E+07		
Composição Percentual do Tráfego / 2017 (%)			Parâmetros Adotados no Cálculo do Número de Operações do Eixo- Padrão de 8,21 - Número N'						
Passeio	Coletivo	Cargas	Fatores de Veículos - FV		Fator Climático		Fator de Pista		
68,75%	4,55%	26,71%	FV - USACE	FV - AASHTO	FR	FP			
Taxas de Crescimento do Tráfego (%)			13,56173	3,22737	1,0	0,500			
Passeio	Coletivo	Cargas	Ano inicial para o cálculo do número N						2017
3,50%	3,50%	3,50%	Período de Projeto para o Cálculo do Número N'-P (anos)						10

(fonte: DNIT, estudo de tráfego, 2014)

7.1 DISTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO

O tráfego deve ser dimensionado em função de características das vias e estradas, em função das características das cidades servidas, para a qual ela será projetada. Em rodovias duplicadas se distribui melhor o tráfego e as atividades sócio-econômicas das cidades interligadas podem indicar que os veículos trafeguem com uma certa carga em um sentido e outra carga no sentido contrário. O percentual de veículos de projeto deve ser detalhado para cada sentido da via. Na prática se assume um valor de 50% de fluxo em cada sentido, o que

pode não ser sempre verdadeiro. Outro cuidado é nas rotas diferentes que os veículos de cargas fazem para o transporte de bens que dependem dos tipos de produtos a serem transportados. Em algumas regiões, os veículos de carga saem totalmente carregados em um sentido e retornam descarregados, como é o caso das épocas de colheita de grãos no Rio Grande do Sul. Em regiões de serra, é comum uma via possuir mais de uma faixa em um sentido, portanto o percentual de passagens dos veículos para cada uma das faixas de projeto deve ser avaliado. Normalmente, em rodovias duplicadas, a maioria dos veículos mais pesados trafega pela faixa da direita, isso implica no valor no número N (FRANCO, 2007, p. 159-160).

No caso do cálculo do número N da rodovia BR-290 foi adotado 90% do tráfego na faixa da direita.

7.2 APLICAÇÃO DO *SOFTWARE* EVERSTRESS 5.0

Os parâmetros de entrada necessários para o software EVERSTRESS 5.0 fazer as iterações são os listados abaixo:

Para a determinação das respostas estruturais (deflexões, deformações e tensões) na estrutura de cada pavimento estudado, foi aplicado o *software* EVERSTRESS 5.0 de análises mecánísticas. Para o programa fazer as iterações precisa inserir os parâmetros de entrada 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) pontos em que se deseja obter os dados (pontos críticos).

7.2.1. Espessuras

Durante a análise mecânica no programa as estruturas estudadas de pavimentos são modificadas na camada de revestimento asfáltico, na base e na sub-base. A camada de macadame seco é formada com 20 cm. A camada de sub-leito, que é constituído de material em solo fino da região, e considerada com espessura infinita.

7.2.2 Módulo de resiliência

O módulo de resiliência (MR) das camadas do pavimento expresso em MPa é um parâmetro importante, pois faz com que a camada asfáltica se torne mais flexível ou frágil. Para o concreto asfáltico adotou-se o MR de 5000 MPa para camada superior do revestimento e 3000 MPa para camada inferior do revestimento asfáltico.

Balbo (1993, p. 106) define que para a camada de BGTC o MR ideal admitido é limitado em 15000 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.

7.2.3 Coeficiente de *Poisson*

Os coeficientes de *Poisson* das camadas foram obtidos através de ensaios de laboratórios. No caso da mistura asfáltica ele depende muito da temperatura. Segundo Balbo (2007, p. 232) o coeficiente de *Poisson* da BGTC é 0,20 e da mistura asfáltica 0,35, e é considerado neste trabalho. A tabela 7 apresenta os coeficientes de todas as camadas.

Tabela 7 – Valores dos coeficientes de *poisson*

MATERIAL	FAIXA DE VARIAÇÃO
Concretos asfálticos	0,32 – 0,38
Concreto de cimento Portland	0,15 – 0,20
BGS, MH, BC	0,35 – 0,40
CCR, BGTC	0,15 – 0,20
SC, SMC	0,20 – 0,30
SCA	0,25 – 0,30
Solos arenosos	0,30 – 0,35
Areias compactadas	0,35 – 0,40
Solos finos	0,40 – 0,45

(fonte: BALBO, 2007, p. 232)

7.2.4 Carregamento

É um parâmetro de entrada muito importante para análise mecânica pelo *software* EVERSTRESS 5.0. Tem forte influência nas respostas estruturais. Para este dimensionamento, o carregamento tem as seguintes características:

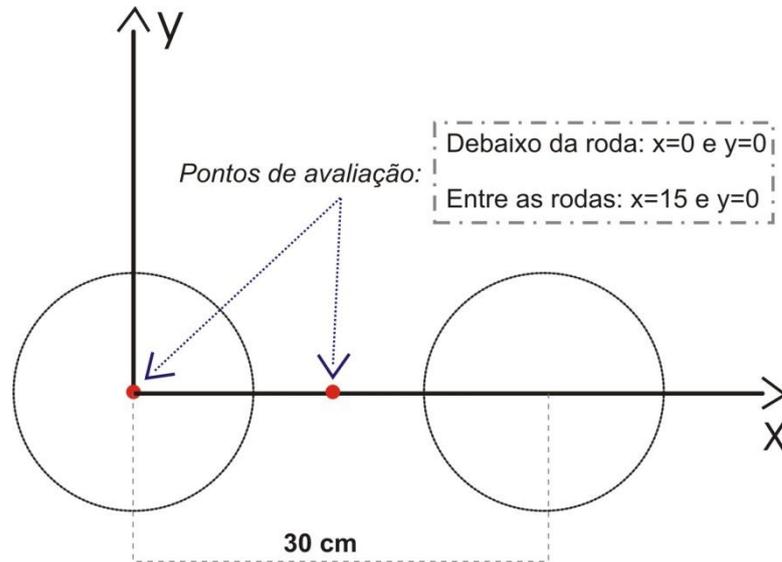
- a) duas cargas distribuídas em áreas circulares, considerando apenas o efeito do semi-eixo (padrão nas análises de fadiga);
- b) a pressão de inflação dos pneus será 80 psi (560 MPa) para as análises de fadiga;
- c) para as análises de fadiga, é considerada a carga do eixo padrão dividida pelo número de rodas de cada eixo, ou seja, $82000\text{N}/4 = 20500\text{ N}$.

A figura 21 mostra as coordenadas da carga considerada e o afastamento das rodas para o semi-eixo padrão.

As coordenadas x e y dos dois pontos de aplicação da carga são parâmetros de entrada no *software*, e são as seguintes:

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

Figura 21 – Pontos de avaliação do carregamento



(fonte: montagem elaborada pelo autor)

7.2.5 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. Dividindo-se a carga pela pressão dos pneus se obtém a área e conseqüentemente o raio.

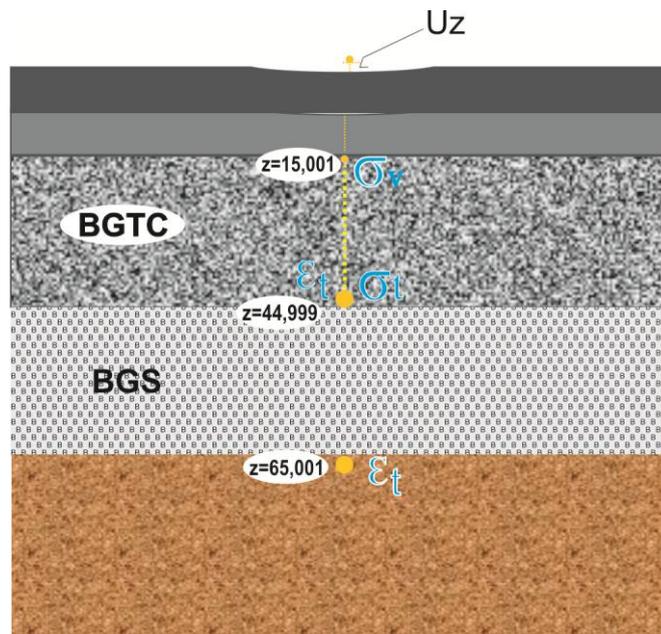
7.2.6 Pontos críticos

São os pontos onde ocorrem as tensões, deformações e deflexão que podem causar fadiga ou deformações permanentes precoces. A análise mecânica foi feita nestas coordenadas z dos pontos críticos. Para o pavimento do segundo trecho da rodovia, as análises foram feitas para as seguintes profundidades (em cm), como mostra a figura 22:

Para o pavimento do tipo semi-rígido, as análises contemplam o concreto asfáltico, a BGTC e o subleito. As respostas estruturais foram feitas para as seguintes profundidades (em cm):

- a) $z = 0$ para verificação da deflexão superficial;
- b) $z = 15,001$ para verificação da tensão de compressão na parte superior da camada de BGTC;
- c) $z = 44,999$ para verificação da tensão de tração e da deformação na fibra inferior da BGTC;
- d) $z = 65,001$ para verificação da deformação no topo do subleito.

Figura 22 – Pontos críticos no pavimento semi-rígido

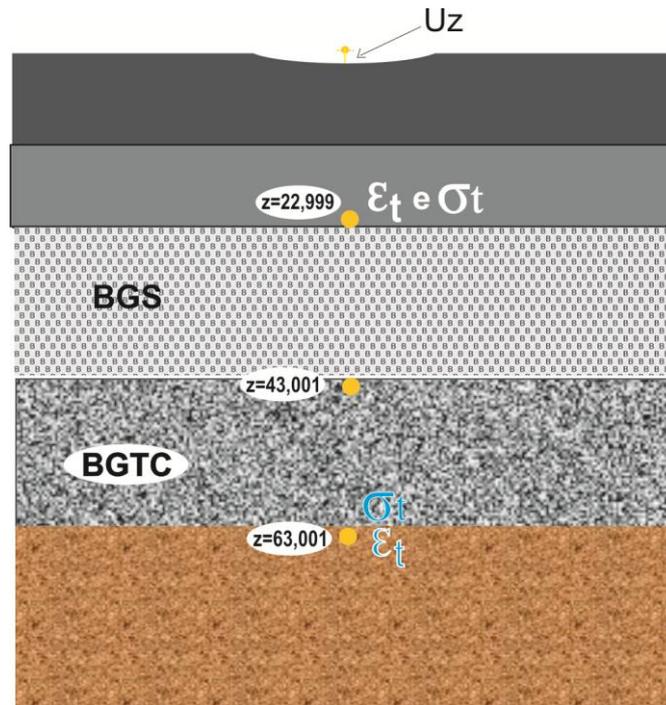


(fonte: montagem elaborada pelo autor)

Para o pavimento, as análises contemplam o concreto asfáltico a BGTC e o subleito. As respostas estruturais foram feitas para as seguintes profundidades (em cm), como mostra a figura 23:

- a) $z = 0$ para verificação da deflexão superficial;
- b) $z = 22,999$ para verificação da tensão de tração e da deformação na fibra inferior da camada asfáltica;
- c) $z = 43,001$ para verificação da tensão de compressão na BGTC;
- d) $z = 63,001$ para verificação da deformação no topo do subleito.

Figura 23 – Estrutura do pavimento invertido



(fonte: montagem elaborada pelo autor)

7.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO

As tabelas 8 e 9 a seguir mostram os resultados calculados pelos modelos de fadiga e as respostas estruturais admissíveis calculados pelo *software* EVERSTRESS 5.0. Os valores negativos representam tensão de compressão e os positivos representam tensão de tração.

Tabela 8 – Comparação das respostas estruturais com os valores admissíveis no pavimento semi-rígido

	Deflexão na superfície do revestimento asfáltico Uz (mm)	Deformação na fibra inferior da camada asfáltica ϵ_t ($\mu \epsilon$)	Tensão na fibra inferior do revestimento asfáltico σ_t (Mpa)	Tensão de esmagamento na fibra superior da camada de BGTC σ_v (Mpa)	Tensão na fibra inferior da camada de BGTC σ_t (Mpa)	Deformação na fibra inferior da camada de BGTC ϵ_t ($\mu \epsilon$)	Deformação no topo do subleito ϵ_t ($\mu \epsilon$)	N_{AASHTO}
valores admissíveis	0,235	83,46	1,08	-0,294	1,22	19,50	836	$1,95 \times 10^7$
valores calculados pelo programa	0,178	-11,47	-0,15 compressão	-0,291	0,34	18,74	-33	
	debaixo das rodas	entre as rodas	debaixo das rodas	debaixo das rodas	entre as rodas	entre as rodas		

(fonte: montagem elaborada pelo autor)

Tabela 9 – Comparação das respostas estruturais com os valores admissíveis no pavimento invertido

	Deflexão na superfície do revestimento asfáltico U_z (mm)	Deformação na fibra inferior da camada asfáltica ϵ_t ($\mu\epsilon$)	Tensão na fibra inferior do revestimento asfáltico σ_t (Mpa)	Tensão de esmagamento na fibra superior da camada de BGTC σ_v (Mpa)	Tensão na fibra inferior da camada de BGTC σ_t (Mpa)	Deformação na fibra inferior da camada de BGTC ϵ_t ($\mu\epsilon$)	Deformação no topo do subleito ϵ_t ($\mu\epsilon$)	N_{AASHTO}
valores admissíveis	0,24	121,12	1,08	-0,294	1,22	19,50	836	$1,95 \times 10^7$
valores calculados pelo programa	0,21	121	0,45	-0,041	0,28	12,68	12	
	debaixo das rodas	entre as rodas	entre as rodas		entre as rodas	entre as rodas		

(fonte: montagem elaborada pelo autor)

Os itens a seguir mostram os resultados obtidos com as análises mecânicas-empíricas feitas com o uso do *software* EVERSTRESS 5.0. Inicialmente são obtidas as respostas estruturais e depois comparadas com os valores admissíveis calculados pelos modelos já apresentados. Os resultados vindos da aplicação do EVERSTRESS 5.0 para os pavimentos estudados são mostrados nos apêndices A e B.

7.3.1 Estrutura semi-rígida com 15 cm de concreto asfáltico

Esta estrutura é o pavimento semi-rígido com 15 cm de concreto asfáltico, 30 cm de BGTC; 20 cm de BGS, 20 cm de macadame seco e camada final de terraplenagem. O dimensionamento desta estrutura de pavimento levou em consideração todas as deflexões, deformações e tensões. Neste tipo de pavimento a resposta estrutural mais crítica é a tensão de esmagamento na parte superior da BGTC. Como esta base é um material cimentado de alto módulo, faz com que toda camada asfáltica trabalhe na compressão, portanto a tensão de esmagamento na BGTC foi quem comandou o dimensionamento. Como se observa na tabela 8, a tensão admissível é de 294 KPa e a resposta estrutural de 291 KPa de compressão debaixo da roda.

7.3.2 Estrutura de pavimento invertido com 23 cm de concreto asfáltico

Esta estrutura de pavimento tem-se a vantagem de não se preocupar com a reflexão de trincas, porque a camada asfáltica é muito espessa, portanto a parte de baixo da camada asfáltica trabalha tracionada, pois abaixo dela tem a base de BGS que tem um módulo baixo de 200 MPa resultando numa relação modular de 15, comparando com a camada asfáltica de 3000 MPa que está logo acima.

Isso faz com que as tensões que chegam na fibra inferior da camada asfáltica sejam elevadas. Portanto a deformação ϵ na fibra inferior da camada asfáltica é o ponto mais crítico e é ela que determina o dimensionamento, ou seja, ela é que faz com que a camada asfáltica seja aumentada para que se tenha uma resposta estrutural menor que a admissível. Como mostrado na tabela 9 o valor admissível é de 121,1 $\mu\epsilon$ e a resposta estrutural é de 121 $\mu\epsilon$, e ocorre entre as rodas.

7.4 COMPARATIVO DOS CUSTOS

Para fazer uma comparação entre os dois tipos de pavimentos dimensionados, foi adotado o primeiro lote da duplicação que está entre os Km 112,3 e Km 142, totalizando uma extensão de 29,7 Km. Neste lote, tem dois postos de contagem, portanto a extensão adotada para cálculo dos custos foi 50% da total, resultando em 14,85 Km. A imprimação é feita antes e depois da aplicação da manta geossintética, ou seja, a aderência é feita dos dois lados, com isso o valor da área imprimada é duas vezes o valor da área da manta. Considerando uma largura por faixa de 3,6 m, que é o mínimo utilizado para pista dupla convencional, se determinou os volumes de materiais e área a serem imprimadas. As tabelas 10 e 11 abaixo mostram os resultados para cada uma das duas estruturas.

Tabela 10 – Custo da construção do pavimento semi-rígido com geossintético

Pavimento semi-rígido com geossintético						
	Concreto asfáltico	BGTC	BGS	Macadame	Geossintético	pintura de ligação
extensão (m)	14850	14850	14850	14850	14850	14850
área (m ²)	106920	106920	106920	106920	106920	213840
volume de material (m ³)	16038	32076	21384	21384		
custo de cada material	286,5/m ³	80/m ³	52,7/m ³	187,42/m ³	6,95/m ²	1,44/m ²
custo total de cada material	R\$ 4.594.887,00	R\$ 2.566.080,00	R\$ 1.126.936,80	R\$ 4.007.789,28	R\$ 743.094,00	R\$ 307.929,60
Custo total do pavimento						R\$ 13.346.716,68

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 11 – Custo da construção do pavimento invertido

Pavimento invertido				
	Concreto asfáltico	BGTC	BGS	Macadame
extensão (m)	14850	14850	14850	14850
área (m ²)	106920	106920	106920	106920
volume de material (m ³)	24591,6	21384	21384	21384
custo de cada material (m ³)	R\$ 286,50	R\$ 80,00	R\$ 52,70	R\$ 187,42
custo total de cada material	R\$ 7.045.493,40	R\$ 1.710.720,00	R\$ 1.126.936,80	R\$ 4.007.789,28
Custo total do pavimento				R\$ 13.890.939,48

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando o custo dos dois tipos de pavimentos dimensionados, tem-se pouca diferença de valores, sendo o custo do invertido 4% maior que o semi-rígido. Também é importante observar que os custos dos materiais de pavimentação variam com o tempo e o local onde são adquiridos. O pavimento invertido tem seu custo muito dependente do preço do concreto asfáltico, pois necessitou de uma espessura maior que o semi-rígido e um custo maior em relação as camadas granulares.

Tabela 12 – Custo dos materiais de pavimentação

5	PAVIMENTAÇÃO		
5.1	ARRANCAMENTO DE GUIAS, INCLUI CARGA EM CAMINHAO	M	2,72
5.2	ARRANCAMENTO DE PARALELEPIPEDOS, INCLUI CARGA EM CAMINHAO	M2	5,06
5.3	DEMOLICAO DE PAVIMENTO DE CONCRETO, SARJETA OU SARJETAO, INCLUI CARGA EM CAMINHAO	M2	9,28
5.4	DEMOLICAO DE PAVIMENTO ASFALTICO, INCLUSIVE CAPA, INCLUI CARGA NO CAMINHAO	M2	8,5
5.5	DEMOLICAO DE CAPA ASFALTICA, INCLUI CARGA NO CAMINHAO	M2	1,79
5.6	DEMOLICAO DE ROCHA E CARGA NO CAMINHAO (COM EMPREGO DE EXPLOSIVO)	M3	74,56
5.7	REGULARIZACAO E COMPACTACAO DE RUAS DE TERRA (IE-5)	M2	1,23
5.8	REMANEJAMENTO DE RAMAL DOMICILIAR DE AGUA, INCLUSIVE ABERTURA E FECHAMENTO DE VALA	M	7,2
5.9	REMANEJAMENTO GERAL DE AGUA ATE 4", INCLUSIVE ABERTURA E FECHAMENTO DE VALA	M	12,38
5.10	ABERTURA DE CAIXA ATE 40 CM, INCLUI ESCAVACAO, COMPACTACAO, TRANSPORTE E PREPARO DO SUB-LEITO	M2	9,37
5.11	ABERTURA DE CAIXA ATE 25 CM, INCLUI ESCAVACAO, COMPACTACAO, TRANSPORTE E PREPARO DO SUB-LEITO	M2	7,22
5.13	BASE DE CONCRETO FCK= 15,00 MPA PARA GUIAS, SARJETAS OU SARJETOES	M3	165,18
5.14	FORNECIMENTO E ASSENTAMENTO DE GUIAS TIPO PMSP 100, INCLUSIVE ENCOSTAMENTO DE TERRA	.	.
5.14.1	FCK= 20,0 MPA	M	17,69
5.14.2	FCK= 25,0 MPA	M	18,34
5.14.3	FCK= 30,0 MPA	M	20,65
5.16	FORNECIMENTO E ASSENTAMENTO DE GUIAS PARA JARDIM 7 X 11 X 100 CM (IE-3)	M	9,43
5.17	ARRANCAMENTO E REASSENTAMENTO DE GUIAS SOBRE CONCRETO	M	10,01
5.18	ABERTURA DE GARGULA COM RECONSTRUCAO DE TRECHO DA CANALIZACAO	UN	11,73
5.19	CONSTRUCAO DE SARJETA OU SARJETAO DE CONCRETO	.	.
5.19.1	FCK= 22,5 A 26,0 MPA	M3	219,99
5.19.2	FCK= 18,0 A 21,0 MPA	M3	206,81
5.20	FUNDACAO DE RACHAO	M3	48,75
5.21	BASE DE MACADAME HIDRAULICO	.	78,26
5.21.1	BASE DE MACADAME HIDRAULICO	M3	.
5.21.2	CAMADA DE ISOLAMENTO SOB O MACADAME HIDRAULICO CONFORME IE-8	M3	49,6
5.22	BASE DE COXIM DE AREIA	M3	56,04
5.23	BASE DE CONCRETO FCK= 15,0 MPA, PARA PAVIMENTO	M3	174,04
5.24	BASE DE MACADAME BETUMNOSO	.	187,42
5.24.1	BASE DE MACADAME BETUMINOSO	M3	.
5.24.2	BASE DE MACADAME BETUMINOSO COM EMULSAO ASFALTICA CATIONICA	M3	181,55
5.25	BASE DE BINDER	.	.
5.25.1	BASE DE BINDER ABERTO (SEM TRANSPORTE)	M3	177,26
5.25.2	BASE DE BINDER DENSO (SEM TRANSPORTE)	M3	232,85
5.26	IMPRIMACAO BETUMINOSA LIGANTE	M2	1,44
5.27	IMPRIMACAO BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	M2	2,88
5.28	REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFALTICO (SEM TRANSPORTE)	M3	286,5
5.29	REVESTIMENTO DE PRE-MISTURADO A QUENTE (SEM TRANSPORTE)	M3	274,72
5.30	REVESTIMENTO DE PRE-MISTURADO A FRIO (SEM TRANSPORTE)	M3	252,69
5.31	REVESTIMENTO DE MASTIQUE ASFALTICO, COM ESPESURA DE 3,0 CM	M2	18,56
5.32	FORNECIMENTO E ASSENTAMENTO DE PARALELEPIPEDOS SOBRE AREIA (IE-23)	M2	44,83
5.33	FORNECIMENTO E ASSENTAMENTO DE PARALELEPIPEDOS SOBRE BASE DE CONCRETO, FCK= 15,0 MPA (IE-23)	M2	53,14
5.34	ARRANCAMENTO E REASSENTAMENTO DE PARALELEPIPEDOS SOBRE CONCRETO FCK= 15,0 MPA (IE-23)	M2	26,37
5.35	ARRANCAMENTO E REASSENTAMENTO DE PARALELEPIPEDOS SOBRE AREIA (IE-23)	M2	14,49
5.36	ARRANCAMENTO, LIMPEZA E EMPILHAMENTO DE PARALELEPIPEDOS	M2	3,7
5.37	REJUNTAMENTO DE PARALELEPIPEDOS COM AREIA (IE-23)	M2	5,09
5.38	REJUNTAMENTO DE PARALELEPIPEDOS COM ARGAMASSA DE CIMENTO E AREIA 1:3 (IE-23)	M2	5,69
5.39	REJUNTAMENTO DE PARALELEPIPEDOS COM ASFALTO E PEDRISCO (IE-23)	M2	12,84
5.40	TRANSPORTE DE PARALELEPIPEDOS	M2XKM	0,22
5.42	PASSEIO DE CONCRETO FCK= 15,0 MPA A FCK= 16,9 MPA, INCLUSIVE PREPARO DE CAIXA E LASTRO DE BRITA	M3	253,63
5.43	PASSEIO DE MOSAICO, INCLUSIVE PREPARO DE CAIXA E BASE CONCRETO COM 5 CM DE ESPESURA	M2	136,48
5.44	PASSEIO DE LADRILHO HIDRAULICO, INCLUSIVE PREPARO DE CAIXA E BASE DE CONCRETO COM 5 CM DE ESPESURA	M2	61,88
5.45	PLANTIO DE GRAMA EM PLACAS	M2	4,75
5.46	REVESTIMENTO PRIMARIO COM PEDRA BRITADA N.2 MISTURADA AO SOLO LOCAL, INCLUSIVE ESCARIFICACAO, VERIFICACAO, UMEDECIMENTO, COMPACTACAO E ENSAIOS, CAMADA	M3	44,65
5.47	BASE DE BICA CORRIDA	M3	44,65
5.48	BASE DE BRITA GRADUADA	M3	52,7

(fonte: prefeitura municipal de São Paulo, 2013)

Tabela 13 – Custo da manta geotêxtil

6.50	ASSENTAMENTO DE TUBOS DE CONCRETO EXISTENTE, DIAMETRO 30 CM	M	1,82
6.51	ASSENTAMENTO DE TUBOS DE CONCRETO EXISTENTE, DIAMETRO 40 CM	M	6,46
6.52	ASSENTAMENTO DE TUBOS DE CONCRETO EXISTENTE, DIAMETRO 50 CM	M	6,74
6.53	ASSENTAMENTO DE TUBOS DE CONCRETO EXISTENTE, DIAMETRO 60 CM	M	8,69
6.54	ASSENTAMENTO DE TUBOS DE CONCRETO EXISTENTE, DIAMETRO 70 CM	M	15,43
6.55	ASSENTAMENTO DE TUBOS DE CONCRETO EXISTENTE, DIAMETRO 80 CM	M	16,61
6.56	ASSENTAMENTO DE TUBOS DE CONCRETO EXISTENTE, DIAMETRO 90 CM	M	20,63
6.57	ASSENTAMENTO DE TUBOS DE CONCRETO EXISTENTE, DIAMETRO 100 CM	M	21,68
6.58	ASSENTAMENTO DE TUBOS DE CONCRETO EXISTENTE, DIAMETRO 110 CM	M	30,73
6.59	ASSENTAMENTO DE TUBOS DE CONCRETO EXISTENTE, DIAMETRO 120 CM	M	32,03
6.60	ASSENTAMENTO DE TUBOS DE CONCRETO EXISTENTE DIAMETRO 150 CM	M	48,53
6.61	FORNECIMENTO E COLOCACAO DE MANTA GEOTEXTIL BIDIM OP - 20 OU SIMILAR	M2	2,94
6.62	FORNECIMENTO E COLOCACAO DE MANTA GEOTEXTIL BIDIM OP-40 OU SIMILAR	M2	4,74
6.63	FORNECIMENTO E COLOCACAO DE MANTA GEOTEXTIL BIDIM OP-50 OU SIMILAR	M2	5,86
6.64	FORNECIMENTO E COLOCACAO DE MANTA GEOTEXTIL BIDIM OP-60 OU SIMILAR	M2	6,95
6.65	BOCA DE LEAO	.	

(fonte: prefeitura municipal de São Paulo, 2013)

8 CONCLUSÕES

Analisando as duas estruturas de pavimento projetadas, resultou na estrutura 1: (pavimento semi-rígido com 15 cm de concreto asfáltico); estrutura: 2 (pavimento invertido com 23 cm de camada asfáltica dividida em duas subcamadas).

Em relação à deflexão (U_z) na superfície do pavimento, as três estruturas apresentam deflexões aceitáveis, dentro dos valores admissíveis. A estrutura que apresentou menor deflexão foi a do pavimento semi-rígido, e os pavimentos invertidos também atendem a este parâmetro.

Analisando a tensão horizontal de tração (σ_t) na fibra inferior da camada de concreto asfáltico, as duas estruturas atendem a tensão máxima admissível de 1,08 MPa. A camada asfáltica do pavimento semi-rígido, tem uma tensão negativa, que significa compressão, pois logo abaixo dela existe uma camada de BGTC que faz com que toda camada asfáltica trabalhe à compressão, portanto está bem segura a este parâmetro. No pavimento invertido, ocorre tensão horizontal de tração na camada asfáltica com sinal positivo, mostrando que está tracionada, porém ainda dentro dos limites admissíveis.

No caso da deformação horizontal (ϵ) na fibra inferior da camada de concreto asfáltico, as duas estruturas de pavimentos estão dentro dos valores admissíveis. No caso do pavimento semi-rígido, essa deformação tem valor negativo, que indica compressão, e portanto está completamente segura a fadiga. No pavimento invertido, essa deformação atingiu valor de 121 $\mu\epsilon$, mais próximo do valor admissível de 121,1 $\mu\epsilon$. Foi este parâmetro que comandou o dimensionamento, no caso do pavimento invertido.

Analisando a tensão de esmagamento (σ_v) na BGTC, se observa, que no caso do pavimento semi-rígido, se encontra uma tensão de compressão de 0,291 MPa, próximo da admissível de 0,294 MPa, porém ainda aceitável. Nos pavimentos invertidos essa tensão de esmagamento é muito baixa, em torno de 0,040 MPa, portanto longe de alcançar o valor admissível. Essa baixa tensão de esmagamento se deve ao fato da BGTC neste pavimento estar distante do ponto de aplicação da carga, e portanto, as tensões se dissipam nas camadas acima.

Em relação a tensão de tração (σ_t) da fibra inferior da BGTC, os dois pavimentos calculados estão dentro do valor admissível de 1,22 MPa, portanto o pavimento semi-rígido tem a maior tensão, 0,34 MPa, e o pavimento invertido que resultou em 0,28 MPa.

A deformação (ϵ) na fibra inferior da BGTC também está dentro do valor admissível para as duas estruturas estudadas. No pavimento semi-rígido essa deformação resultou em 18,74 $\mu\epsilon$, e no invertido 12,68 $\mu\epsilon$. Comparando com a admissível de 19,50 $\mu\epsilon$ as duas estruturas estão corretamente dimensionadas.

A deformação no topo do subleito está muito abaixo da admissível nas duas estruturas de pavimento estudadas, pois esse ponto de análise está distante do ponto de aplicação da carga, e isso faz com que as tensões sejam dissipadas nas camadas superiores.

Em relação as duas estruturas a que oferece menor resultado de custo é a do semi-rígido, visto que tem uma camada asfáltica de 15 cm, que é inferior a de 23 cm do pavimento invertido, mesmo com o uso de geossintético e imprimação no pavimento semi-rígido, ele oferece menor custo.

REFERÊNCIAS

ÁFRICA, do Sul. **South African Pavement Engineering Manual**. África do Sul: Roads Agency, 2013.

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

_____. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 1993.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 1. ed. (3. reimpr.). Rio de Janeiro: Petrobrás; Associação Brasileira das eses Distribuidoras de Asfalto, 2008 (reimpr. 2010).

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: 10 mar. 2015.

FRANCO, F. A. C. de P. **Método de dimensionamento mecânico-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, 2007.

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

SÃO PAULO, Prefeitura municipal. **Orçamento referencial**: tabela SIURB. São Paulo: 2013. Disponível em: <www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/infraestrutura/tabelas_de_custos/index.php?p=193877>. Acesso em: 10 out. 2015.

WASHINGTON STATE, (2005) Department of Transportation. Everseries Pavement Programs, versão 5: Washington State. Conjunto de programas para análises diversas em pavimentos, desde análises mecânicas até retroanálises. Disponível em <<http://www.wsdot.wa.gov/biz/mats/apps/epg.htm>>. Acesso em: 12 mar. 2015.

APÊNDICE A – Planilha de resultado da análise empírica-mecânica do pavimento semi-rígido com 15 cm de concreto asfáltico obtidas com uso do *software* EVERSTRESS 5.0

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: trecho2		No of Loads: 2		No of X-Y Evaluation Points: 2		
No of Layers: 5						
Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.30	8.000	5000.00			
2	.30	7.000	3000.00			
3	.20	30.000	15000.00			
4	.35	20.000	300.00	33.02	80.00	.800
5	.45		250.00	131.12	90.00	-.100
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	
No of Iteration: 13			Maximum Error in Modulus: .0			

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

Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-540.21	-559.19	-560.00	.00	.00	.00
14.990	2	-154.62	-155.84	-301.58	.00	22.20	.00
44.990	3	281.25	323.30	-6.05	.00	.26	.00
64.990	4	-2.58	-2.57	-5.44	.00	.24	.00
65.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-40.89	-45.82	-46.04	2.791	.000	124.585
14.990	2	-5.80	-6.33	-69.48	1.315	.000	111.969
44.990	3	14.52	17.88	-8.46	-2.319	.000	109.447
64.990	4	6.73	7.36	-110.33	-1.048	.000	85.008
65.001	5	.00	.00	.00	.000	.000	.000

Principal 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	-559.19	-540.21	-46.04	-45.82	-40.89
14.990	2	-294.86	-155.84	-151.34	-70.90	-6.33	-4.38
44.990	3	-6.05	281.25	323.30	-8.46	14.52	17.88
64.990	4	-5.46	-2.57	-2.56	-111.13	7.36	7.52
65.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00

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

Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	66.73	-182.80	.00	.00	.00	.00
14.990	2	-124.95	-115.20	-186.62	.00	.00	.00
44.990	3	305.53	340.91	-6.21	.00	.00	.00
64.990	4	-2.62	-2.62	-5.56	.00	.00	.00
65.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	24.31	-40.56	6.96	.000	.000	114.955
14.990	2	-11.47	-7.24	-38.19	.000	.000	112.788
44.990	3	15.91	18.74	-9.03	.000	.000	110.655
64.990	4	7.12	7.52	-112.73	.000	.000	85.539
65.001	5	.00	.00	.00	.000	.000	.000

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-182.80	.00	66.73	-40.56	6.96	24.31
14.990	2	-186.62	-124.95	-115.20	-38.19	-11.47	-7.24
44.990	3	-6.21	305.53	340.91	-9.03	15.91	18.74
64.990	4	-5.56	-2.62	-2.62	-112.73	7.12	7.52
65.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00

APÊNDICE B – Planilha de resultado da análise empírica-mecânica do pavimento invertido com 11 cm de concreto asfáltico com ligante polimerizado e 12 cm de concreto asfáltico convencional, obtidas com uso do *software* EVERSTRESS 5.0

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: Fernando						
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 (MPa)	Power
1	.30	11.000	5000.00			
2	.30	12.000	3000.00			
3	.35	20.000	200.00	70.39	80.00	.700
4	.35	20.000	15000.00			
5	.45		200.00	130.53	90.00	-.100
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	
No of Iteration: 9			Maximum Error in Modulus: .0			

Location No: 1		X-Position (cm): .000		Y-Position (cm): .000			
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
Normal Stresses							
.000	1	-832.50	-947.95	-560.00	.00	.00	.00
10.990	1	98.12	137.14	-263.47	.00	49.59	.00
22.990	2	343.47	431.41	-45.01	.00	2.75	.00
62.990	4	263.48	274.83	-10.70	.00	.50	.00
63.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
Normal Strains and Deflections							
.000	1	-76.02	-106.04	-5.17	8.792	.000	217.313
10.990	1	27.21	37.35	-66.81	-1.481	.000	211.774
22.990	2	75.85	113.96	-92.49	-11.067	.000	202.319
62.990	4	11.40	12.42	-13.27	-1.781	.000	120.047
63.001	5	.00	.00	.00	.000	.000	.000
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
Principal Stresses and Strains							
.000	1	-947.95	-832.50	-560.00	-106.04	-76.02	-5.17
10.990	1	-270.15	104.80	137.14	-68.55	28.94	37.35
22.990	2	-45.03	343.49	431.41	-92.50	75.86	113.96
62.990	4	-10.71	263.48	274.83	-13.27	11.40	12.42
63.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00

Location No: 2		X-Position (cm): 15.000		Y-Position (cm): .000			
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
Normal Stresses							
.000	1	-282.14	-623.31	.00	.00	.00	.00
10.990	1	-51.57	118.20	-119.08	.00	.00	.00
22.990	2	326.48	447.44	-47.28	.00	.00	.00
62.990	4	277.01	283.37	-10.98	.00	.00	.00
63.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
Normal Strains and Deflections							
.000	1	-19.03	-107.73	54.33	.000	.000	215.020
10.990	1	-10.26	33.88	-27.81	.000	.000	216.815
22.990	2	68.81	121.23	-93.15	.000	.000	209.314
62.990	4	12.11	12.68	-13.81	.000	.000	121.347
63.001	5	.00	.00	.00	.000	.000	.000
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
Principal Stresses and Strains							
.000	1	-623.31	-282.14	.00	-107.73	-19.03	54.33
10.990	1	-119.08	-51.57	118.20	-27.81	-10.26	33.88
22.990	2	-47.28	326.48	447.44	-93.15	68.81	121.23
62.990	4	-10.98	277.01	283.37	-13.81	12.11	12.68
63.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00

APÊNDICE C – Projeção do Tráfego e Número N

ESTUDOS DE TRÁFEGO - DIAGRAMA E RESUMO

