UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**LUCAS KIYOSHI PINHEIRO NAGAI**

# COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL EMPÍRICOS E ANÁLISE MECANICISTA

São Luís
2017

**LUCAS KIYOSHI PINHEIRO NAGAI**

# COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL EMPÍRICOS E ANÁLISE MECANICISTA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana

São Luís

2017

**LUCAS KIYOSHI PINHEIRO NAGAI**

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL EMPÍRICOS E ANÁLISE MECANICISTA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 26/06/2017.

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana (Orientador)**
Doutor em Engenharia de Transportes
Universidade Estadual do Maranhão

**Prof.ª Dr.ª Maria Teresinha de Medeiros Coelho**
Doutora em Urbanismo
Universidade Estadual do Maranhão

**Prof. Anderson Nascimento Silva**
Universidade Estadual do Maranhão

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado a oportunidade de concluir mais uma etapa da minha vida, sempre renovando minhas forças e me fazendo superar os obstáculos.

Aos meus pais, Marcelo e Ivete, por sempre estarem ao meu lado, fornecendo apoio, educação, exemplo, carinho e amor.

A minha família, pela confiança em minha capacidade e por sempre poder contar com seu apoio a qualquer momento.

Ao meu orientador, Walter, por sua disposição em me orientar e disponibilizar seu tempo e conhecimento para realizar um trabalho de melhor qualidade.

Aos meus amigos da vida, que sempre pude contar com seu companheirismo a qualquer momento.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Civil, incluindo professores, por percorrerem comigo esta jornada, sempre dispostos a ajudar e presentes nas horas de dificuldades e alegrias.

*"Bem-aventurado aquele que teme ao Senhor e anda nos seus caminhos. Pois comerás do trabalho das tuas mãos; feliz serás, e te irá bem".*

Sal. 128.1-2

# RESUMO

O presente trabalho trata-se de comparações entre métodos empíricos de dimensionamento e análises mecanicistas de pavimentos flexíveis. São abordados dois métodos empíricos, o método do DNIT e o método da AASHTO, e análises mecanicistas realizadas por dois programas, o ELSYM5 e o SisPav. Primeiramente é apresentada uma breve fundamentação teórica sobre o pavimento e seu dimensionamento e então trata-se dos métodos e programas. Em seguida são apresentados roteiros para o dimensionamento pelos métodos empíricos e roteiros de utilização dos programas para realizar análises mecanicistas. Por fim, são utilizados os roteiros para dimensionamento e análises mecanicistas, em simulações e em uma situação real de projeto de pavimentação, para uma discussão de resultados. Dessa forma, destaca-se as principais características dos métodos empíricos e análises mecanicistas, concluindo-se que os métodos empíricos são insuficientes para prever o comportamento dos materiais e a geração de danos no pavimento. Assim, torna-se necessária a utilização das análises mecanicistas a fim de obter um bom dimensionamento de pavimentos e de contribuir para a atual situação das rodovias do país.



**Palavras-chave:** Método do DNIT. Método da AASHTO. ELSYM5. SisPav.

## ABSTRACT

The present work deals with comparisons between empirical methods of design and mechanistic analysis of flexible pavements. Two empirical methods, the DNIT method and the AASHTO method, and mechanistic analysis performed by two programs, ELSYM5 and SisPav, are discussed. Firstly, a brief theoretical background about the pavement and its design is presented, and then the methods and programs are discussed. Next, the designing scripts by the empirical methods and scripts for the use of the programs to perform mechanistic analysis are presented. Finally, the scripts are used for design and mechanistic analysis, in simulations and in a real situation of a paving project, for a discussion of results. Thus, the main features of the empirical methods and mechanistic analysis are highlighted, and it is concluded that the empirical methods are insufficient to predict the behavior of the materials and the generation of damages in the pavement. Then, it becomes necessary to use the mechanistic analysis in order to obtain a good design of pavements and to contribute to the current situation of the country's highways.



**Keywords**: DNIT Method. AASHTO method. ELSYM5. SisPav.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES


Figura 1 – Rodovia de pavimento flexível 17
Figura 2 – Pavimento flexível típico 18
Figura 3 – Áreas de contato pneu x pavimento 19
Figura 4 – Distribuição de pressões 20
Figura 5 – Efeitos superpostos 22
Figura 6 – Classificação dos revestimentos flexíveis 25
Figura 7 – Pavimento de alvenaria poliédrica 26
Figura 8 – Pavimento de paralelepípedos 26
Figura 9 – Corpo de prova de misturas asfálticas 27
Figura 10 – Agregados de granulometrias diferentes 27
Figura 11 – Amostra de ligante asfáltico 27
Figura 12 – Subcamadas do revestimento 27
Figura 13 – Pressões verticais em alívio com a profundidade 28
Figura 14 – Classificação de Bases e Sub-bases 29
Figura 15 – Subdivisão de base muito espessa em base e sub-base 30
Figura 16 – Esforços sendo dissipados no subleito 31
Figura 17 – Curvas do ensaio de penetração para determinar o CBR 36
Figura 18 – Deslocamento entre partículas gerando tensão cisalhante 37
Figura 19 – Tensões no pavimento causando deformação 37
Figura 20 – Esquema dos loops 5 e 6 da Pista Experimental da AASHO 38
Figura 21 – Vista aérea da Pista Experimental da AASHO 38
Figura 22 – Serventia do pavimento em função do tempo e tráfego 39
Figura 23 – Número estrutural x Módulo de resiliência 41
Figura 24 – Tensões e deslocamentos em sistema elástico de duas camadas 41
Figura 25 – Fluxograma da análise realizada pelo ELSYM5 utilizando-se funções de transferência 44
Figura 26 – Detalhe da malha de Elementos Finitos no contato pneu / pavimento 45
Figura 27 – Fluxograma de análise e dimensionamneto do programa SisPav 46
Figura 28 – Fatores de equivalência de operação 50
Figura 29 – Determinação de espessuras do pavimento 54

Figura 30 – Espessuras no dimensionamento do pavimento 55
Figura 31 – Nomograma para dimensionamento de pavimento flexível utilizando-se valores médios 61
Figura 32 – Esquema das espessuras do pavimento 64
Figura 33 – Tela inicial do DOSBox 66
Figura 34 – Tela de instalação do ELSYM5 66
Figura 35 – Tela do menu principal do ELSYM5 67
Figura 36 – Submenu de entrada de dados 67
Figura 37 – Tela de dados das camadas 68
Figura 38 – Tela de dados do carregamento 70
Figura 39 – Tela dos dados dos pontos de análise 71
Figura 40 – Pontos de análise na estrutura do pavimento 72
Figura 41 – Tela da opção de exportar arquivo 73
Figura 42 – Tela do submenu de alteração dos dados de entrada 74
Figura 43 – Tela da opção de importação de arquvio 74
Figura 44 – Tela de execução da análise 75
Figura 45 – Tela dos resultados da análise 76
Figura 46 – Resultado das tensões na superfície do revestimento 76
Figura 47 – Interface do SisPav 1.0 78
Figura 48 – Detalhe da tabela exibida na interface da aba Estrutura 79
Figura 49 – Detalhe das opções do botão Alterar Estrutura 80
Figura 50 – Interface da janela de Propriedades da camada 81
Figura 51 – Interface da aba principal Tráfego 82
Figura 52 – Interface da aba principal Clima 83
Figura 53 – Interface da aba principal Modelos 84
Figura 54 – Detalhe da aba Ferramentas 85
Figura 55 – Detalhe da interface Opções 86
Figura 56 – Detalhe da aba Resultados no menu principal 88
Figura 57 – Mensagem de resultado do dimensionamento 88
Figura 58 – Resultados em forma de gráfico 89
Figura 59 – Resultados em forma de planilha 90

## LISTA DE QUADROS


Quadro 1 – Pesos máximos por eixo 21
Quadro 2 – Ensaios de medição de resistência em materiais utilizados na pavimentação 24
Quadro 3 – Subdivisão de camadas do revestimento asfáltico 28
Quadro 4 – Constantes do material para critério de deformação vertical 35
Quadro 5 – Classificação dos materiais empregados no pavimento 47
Quadro 6 – Granulometria para materiais de base granular 48
Quadro 7 – Determinação do fator de operações 50
Quadro 8 – Coeficientes de equivalência estrutural 52
Quadro 9 – Espessuras mínimas para revestimentos betuminosos 53
Quadro 10 – Período de análise para as condições da rodovia 57
Quadro 11 – Distribuição do tráfego em porcentagem pelo número de faixas 58
Quadro 12 – Níveis de confiança de projeto 58
Quadro 13 – Valores para coeficiente de equivalência estrutural 62
Quadro 14 – Classificação da drenagem em função do tempo 62
Quadro 15 – Coeficientes de drenagens 63
Quadro 16 – Espessuras mímimas para as camadas 64
Quadro 17 – Valores típicos de coeficientes de Poisson 69
Quadro 18 – Estimativa de módulo de resiliência para diversos materiais 69
Quadro 19 – Modelos de previsão de comportamento do SisPav 84
Quadro 20 – Simulações de dimensionamento do método do DNIT 91
Quadro 21 – Resultados dos simulações pelo método do DNIT 92
Quadro 22 – Simulações de dimensionamento do método da AASHTO 94
Quadro 23 – Resultados das simulações pelo método da AASHTO 94
Quadro 24 – Estruturas analisadas pelo ELSYM5 95
Quadro 25 – Resultado das análises realizadas com o ELSYM5 96
Quadro 26 – Resultados das simulações utilizando-se o ELSYM5 98
Quadro 27 – Simulações na estrutura de número 1 100
Quadro 28 – Resultados das análises de vida de projeto pelo SisPav 100
Quadro 29 – Defeito responsável pelo dano crítico nas estruturas 102
Quadro 30 – Estruturas obtidas das análises de dimensionamento pelo SisPav 103
Quadro 31 – Materiais e seus parâmetros utilizados nas simulações 104

Quadro 32 – Estrutura de projeto adotada de acordo com o dimensionamento 106
Quadro 33 – Estrutura da AASHTO 106
Quadro 34 – Estrutura analisada pelo ELSYM5 107
Quadro 35 – Estrutura obtida no ELSYM5 107
Quadro 36 – Estrutura analisada pelo SisPav 108
Quadro 37 – Estrutura obtida no SisPav 108
Quadro 38 – Comparação das estruturas obtidas 109

SUMÁRIO


| | | |
|---|---|---|
| **1** | **INTRODUÇÃO** | **14** |
| **1.1** | **Justificativa** | **15** |
| **1.2** | **Objetivos** | **16** |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 16 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 16 |
| **2** | **O PAVIMENTO** | **17** |
| **2.1** | **A Estrutura do Pavimento Flexível** | **18** |
| 2.1.1 | Carregamento na estrutura do pavimento | 19 |
| 2.1.2 | Composição estrutural do pavimento | 24 |
| **3** | **DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS** | **32** |
| **3.1** | **Modelo de previsão de desempenho** | **33** |
| **3.2** | **Funções de transferências** | **33** |
| **3.3** | **Método do DNIT** | **35** |
| **3.4** | **Método da AASHTO** | **38** |
| **3.5** | **O Programa ELSYM5** | **41** |
| **3.6** | **O Programa SisPav** | **44** |
| **4** | **ROTEIROS DE DIMENSIONAMENTO** | **47** |
| **4.1** | **Roteiro de dimensionamento pelo método do DNIT 2006** | **47** |
| 4.1.1 | Materiais empregados | 47 |
| 4.1.2 | Tráfego | 48 |
| 4.1.3 | Coeficientes estruturais | 52 |
| 4.1.4 | Espessura do revestimento | 53 |
| 4.1.5 | Espessuras das camadas | 53 |
| **4.2** | **Roteiro de dimensionamento pelo método da AASHTO 1993** | **56** |
| 4.2.1 | Restrições de tempo | 56 |
| 4.2.1.1 | Período de desempenho | 56 |
| 4.2.1.2 | Período de análise | 57 |
| 4.2.2 | Tráfego | 57 |
| 4.2.3 | Confiabilidade | 58 |
| 4.2.4 | Serventia | 59 |
| 4.2.5 | Caracterização dos materiais | 59 |
| 4.2.6 | Número estrutural | 60 |

4.2.7 Coeficientes de equivalência estrutural das camadas 62
4.2.8 Coeficiente de drenagem 62
4.2.9 Espessura das camadas 63
**4.3 Roteiro da utilização do ELSYM5 para análise de dimensionamento 65**
4.3.1 Execução do programa ELSYM5 65
4.3.2 Entrada de dados 67
4.3.2.1 Título da operação 68
4.3.2.2 Dados das camadas elásticas 68
4.3.2.3 Dados do carregamento 70
4.3.2.4 Dados dos pontos de análise 71
4.3.2.5 Exportar um arquivo com dados 72
4.3.3 Alteração dos dados de entrada 73
4.3.4 Executar análise 75
**4.4 Roteiro de dimensionamento utilizando o programa SisPav 77**
4.4.1 Execução do SisPav 77
4.4.2 Estrutura do pavimento 79
4.4.3 Tráfego 81
4.4.4 Clima 82
4.4.5 Modelos de previsão 83
4.4.6 Opções do SisPav 85
4.4.7 Dimensionamento e análise da estrutura 87
**5 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS DIMENSIONAMENTOS DE PAVIMENTO 91**
**5.1 Método do DNIT 91**
**5.2 Método da AASHTO 93**
**5.3 Análise mecanicista pelo ELSYM5 95**
**5.4 Análise mecanicista pelo SisPav 100**
**5.5 Análise de uma situação real de projeto de pavimentação 105**
**5.6 Discussão dos resultados 108**
**6 CONCLUSÃO 110**
**REFERÊNCIAS 112**
**APÊNDICES 114**
**APÊNDICE A – EXEMPLO DE ARQUIVO DE DADOS DE ENTRADA DO ELSYM5 115**

**APÊNDICE B – EXEMPLO DE ARQUIVO DE DADOS DE SAÍDA DO ELSYM5** **116**
**APÊNDICE C – EXEMPLO DE RELATÓRIO GERADO PELO SISPAV** **121**
**ANEXOS** **125**
**ANEXO A – NOMOGRAMA DO COEFICIENTE ESTRUTURAL DE BASES GRANULARES AASHTO 93** **126**
**ANEXO B – NOMOGRAMA DO COEFICIETE ESTRUTURAL DE SUB-BASES GRANULARES AASHTO 93** **127**
**ANEXO C – NOMOGRAMA DO COEFICIENTE ESTRUTURAL DE BASES TRATADAS COM CIMENTOS AASHTO 93** **128**
**ANEXO D – NOMOGRAMA DO COEFICIENTE ESTRUTURAL DE BASES BETUMINOSAS AASHTO 93** **129**

# 1 INTRODUÇÃO

A pavimentação rodoviária tem apresentado uma evolução constante dos métodos de dimensionamento de pavimento. No Brasil, o estudo para aprimorar técnicas de dimensionamento já é de longa data, mas a partir dos anos 50, houve um avanço significativo criando a necessidade de regularizar e normatizar as técnicas dando surgimento ao Manual de Pavimentação.

O dimensionamento de um pavimento consiste em estabelecer a espessura das camadas e seus materiais criando uma estrutura que suporte as condições climáticas e da carga do tráfego garantido suas funções estruturais e funcionais (BALBO, 2007).

O método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) baseado na metodologia do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR) elaborado pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza teve sua primeira versão mais completa em 1966 e, desde então, feitas algumas atualizações, é agora denominado de método do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) sendo o atual método de dimensionamento de pavimento flexível usado no Brasil (DNIT, 2006).

Internacionalmente temos que destacar o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) que foi baseado em dados de uma pista experimental projetada e construída na década de 50 na cidade de Ottawa, Illinois nos Estados Unidos da América (EUA).

Os métodos citados acima são considerados como empíricos, ou seja, modelos gerados a partir de parâmetros obtidos em campo associados à observação da condição do pavimento (BALBO, 2007). O método do DNIT pode ser considerado também como semiempírico visto que ele associa uma metodologia teórica ao modelo de observação (BALBO, 2007). Entretanto, os métodos empíricos e semiempíricos possuem limitações onde sua aplicação se restringe a áreas com condições semelhantes à da área do modelo observacional (BALBO, 2007).

Com o passar dos anos e a evolução nos estudos e tecnologias surgiram os métodos empírico-mecanicistas ou de análise mecanicista que procura avaliar o comportamento da estrutura do pavimento de acordo com modelos teóricos associados a parâmetros obtidos empiricamente em campo ou laboratório. Existem várias ferramentas computacionais atualmente disponíveis para realizar análise mecanicista como o Alizé III, FEPAVE II, Dama 3, *Elastic Layer System Model 5* (ELSYM5), SisPav, dentre outros. Segundo Balbo (2007) o ELSYM5 tem sido uma das ferramentas computacionais mais

utilizadas no Brasil pelos antigos, para realizar o dimensionamento por análise mecanicista. Já o SisPav vem sendo desenvolvido como uma proposta de reduzir o empirismo no dimensionamento de pavimentos (FRANCO, 2007).

Observando todo esse desenvolvimento nos métodos de dimensionamento, esse trabalho busca analisar os métodos de dimensionamentos de pavimentos flexíveis empíricos e por análise mecanicista. A análise será feita entre os métodos do DNIT, versão 2006, e AASHTO, versão 1993, e a utilização do ELSYM5, versão 1985, e do SisPav, versão 2007, no dimensionamento de um pavimento em determinadas condições de tráfego, clima e materiais utilizados com posterior comparação de resultados. Também será considerada uma situação real de projeto realizada por um órgão público.

A organização do trabalho se encontra da seguinte forma:

O capítulo 1 abrange uma introdução do assunto a ser trabalhado como sua natureza e importância. Também contém a justificativa e motivação que levaram a realizar este trabalho e determinar os objetivos a serem alvejados.

O capítulo 2 trata de uma fundamentação teórica sobre o pavimento, sua estrutura e o carregamento aplicado nela.

O capítulo 3 traz uma fundamentação teórica sobre o dimensionamento de pavimentos flexíveis e apresenta os métodos do DNIT, da AASHTO e os programas ELSYM5 e o SisPav, respectivamente.

O capítulo 4 apresenta roteiros de aplicação para os métodos de dimensionamento do DNIT e da AASHTO e roteiros de aplicação para análises de dimensionamento pelos programas ELSYM5 e SisPav.

O capítulo 5 aborda as comparações entre os métodos de dimensionamento, do DNIT e da AASHTO, e análises de dimensionamento, pelos programas ELSYM5 e SisPav, utilizando-se simulações e uma situação real de projeto.

O capítulo 6 encerra o trabalho trazendo as principais considerações a respeito dos métodos empíricos e análises mecanicistas apresentados e os resultados de suas comparações.

## 1.1 Justificativa

Em um dimensionamento de pavimento é necessário considerar os parâmetros analisados e a metodologia utilizada para obtenção dos resultados. Dessa forma, os diferentes métodos de dimensionamento são reflexos das diversas condições que um pavimento pode ser submetido e do critério utilizado em seu dimensionamento (BALBO, 2007).

Segundo Confederação Nacional do Transporte (2016), dados da pesquisa realizada revelam que do total de 103.259 km de rodovias pavimentadas avaliadas, quase metade (48,3%) apresentaram algum tipo de problema no pavimento. Segundo a mesma pesquisa, o estado do Maranhão teve um total de 4551 km de rodovias pavimentadas avaliadas e apresentou 44,17% em situação Regular, Ruim ou Péssimo referentes ao estado do pavimento.

Diante a situação dos pavimentos rodoviários no país e no estado do Maranhão, esse estudo surge com o intuito de aprimorar o entendimento dos métodos de dimensionamento de pavimento flexível utilizado atualmente no país de forma a contribuir com as condições das rodovias.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Comparar e analisar o dimensionamento de pavimentos flexíveis por métodos empíricos e por análise mecanicista.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar roteiros de dimensionamento de pavimento flexível para os métodos do DNIT, da AASHTO, e roteiros de análise de dimensionamento utilizando-se os programas ELSYM5 e SisPav;
- Apresentar e discutir os resultados conforme os critérios de cada método.

# 2 O PAVIMENTO

O pavimento é a estrutura construída sobre o terreno natural terraplenado, destinada a suportar principalmente o tráfego de veículos (Figura 1). Ele é composto por diversas camadas com espessuras finitas com a função de distribuir e resistir aos esforços gerados pelo tráfego e pelo clima, proporcionando condições de rolamento com segurança e conforto para o tráfego de veículos e de vida útil longa, visando evitar ou diminuir serviços de manutenção e correções (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 1 – Rodovia de pavimento flexível

Fonte: Adaptado de CNT (2016)

O pavimento pode ser classificado basicamente em rígido e flexível. Os pavimentos rígidos possuem uma placa de concreto de cimento Portland, onde a espessura do pavimento é determinada em função da resistência à flexão dessas placas e da resistência das camadas subjacentes, podendo elas ser armadas ou não com barras de aço (BERNUCCI et al., 2008).

Os pavimentos flexíveis possuem o revestimento composto por uma mistura de ligantes asfálticos e agregados. É composto pelas camadas de revestimento, base, sub-base e reforço do subleito podendo ter ausência de algumas camadas dependendo do tráfego e matérias disponíveis (BERNUCCI et al., 2008). Para o DNIT (2006, p.95) pavimento rígido é "[...] aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado". Enquanto o pavimento flexível, segundo o DNIT (2006, p.95) é "[...] aquele em que todas as

camadas sofrem sob o carregamento aplicado, e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas". Dentre os pavimentos flexíveis, aqueles que possuem na camada da base algum aglutinante como cimento ou concreto podem ser também classificados como pavimentos semirrígidos (DNIT, 2006).

Segundo Senço (2007) os pavimentos rígidos rompem por tração na flexão quando sujeitos a deformações e os pavimentos flexíveis resistem a deformações até certo limite sem romper, porém quando acontecem deformações prementes a estrutura rompe por fadiga.

O presente trabalho terá como foco de estudo os pavimentos flexíveis.

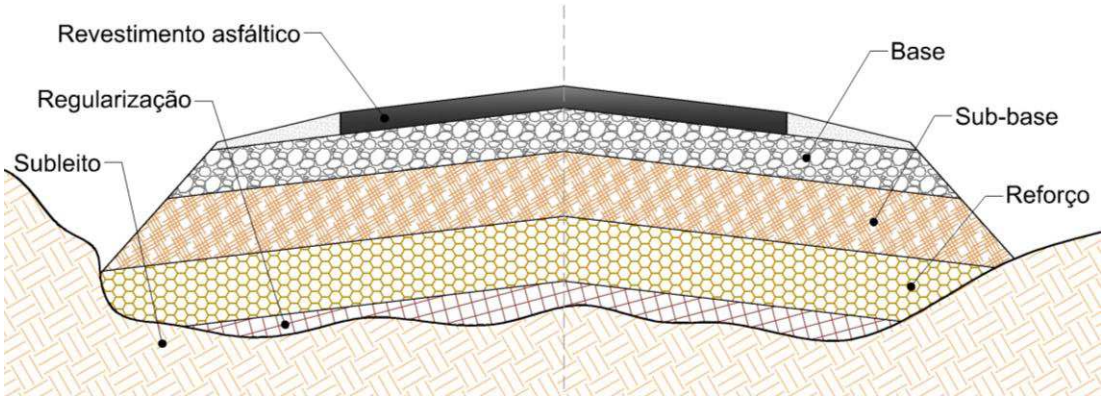
## 2.1 A Estrutura do Pavimento Flexível

Como mencionado anteriormente, o pavimento flexível é composto pelas camadas de revestimento, base, sub-base e reforço do subleito. Todas essas camadas trabalham juntas com o subleito, que funciona como fundação para toda estrutura ao receberem cargas aplicadas pelo tráfego e ambiente externo (BALBO, 2007). Também existe uma camada de regularização do subleito, responsável por adequá-la transversal e longitudinalmente com as especificações de projeto, todavia, ela não consiste exatamente uma camada do pavimento, já que ela é uma operação de corte ou aterro do subleito (DNIT, 2006).

> Para melhor compreender as definições das camadas que compõem um pavimento, é preciso considerar que a distribuição dos esforços através do mesmo deve ser tal que as pressões que agem na interface entre o pavimento e a fundação, ou subleito, sejam compatíveis com a capacidade de suporte desse subleito (SENÇO, 2007, p.10).

A Figura 2 representa a estrutura de um pavimento flexível típico sobre o subleito:

Figura 2 – Pavimento flexível típico




Fonte: O autor (2017)

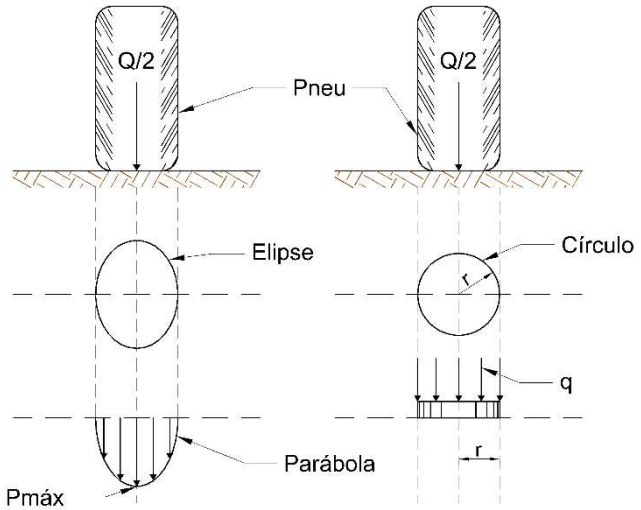
### 2.1.1 Carregamento na estrutura do pavimento

As cargas que solicitam o pavimento são aplicadas através das rodas dos veículos. A área de contato da roda com o pavimento tem forma aproximadamente de uma elipse e a distribuição da pressão exercida é aproximadamente uma parábola, com sua pressão máxima no centro (SENÇO, 2007).

> Para efeito apenas do estudo da ação das cargas, visando ao dimensionamento do pavimento, pode-se admitir uma carga aplicada gerando uma pressão de contato uniformemente distribuída numa área de contatos circular. A pressão de contato é aproximadamente igual à pressão dos pneus, sendo a diferença desprezível para efeito do dimensionamento (SENÇO, 2007, p.8).

A Figura 3 exemplifica as situações do contato pneu com o pavimento, onde do lado esquerdo tem-se a situação real e do lado direito tem-se a situação considerada para efeito de estudo:

Figura 3 – Áreas de contato pneu x pavimento




Fonte: Adaptado de Senço (2007)

As pressões a serem admitidas ou calculadas, por serem transmitidas pelas rodas, são referidas como cargas das rodas. Entretanto, é muito comum que se faça referência a cargas por eixo (SENÇO, 2007). Para calcular o raio da área circular de contato para qualquer valor de carga, desde que seja conhecida a pressão de contato aplicada, utiliza-se a equação:

$$Q = 2 \times \pi \times r^2 \times q \qquad (1)$$

onde:

Q = carga transmitida por eixo simples;

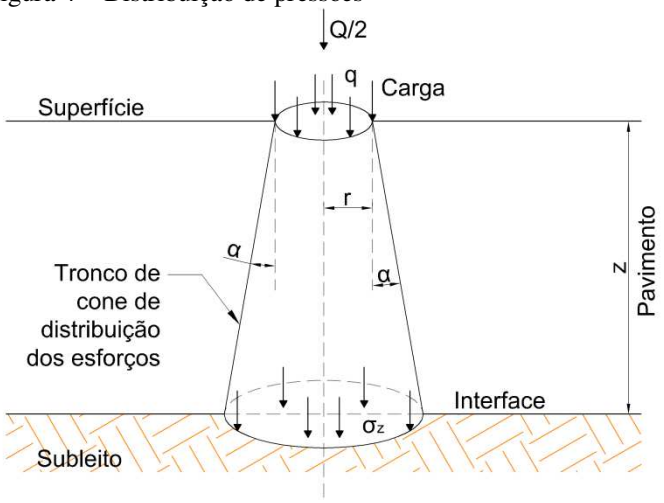
R = raio da área circular de contato;
q = pressão de contato aplicada.

Da Expressão 1, temos que a carga por roda será:

$$\frac{Q}{2} = \pi \times r^2 \times q \qquad (2)$$

Segundo Senço (2007), considerando a pressão de contato (q) como a pressão aplicada pela roda na superfície do pavimento, pode-se estabelecer uma distribuição de pressão segundo um ângulo (α). Assim, as pressões são referentes às suas profundidades, de forma crescente, até a intercessão do pavimento com o subleito na profundidade (z), com uma pressão ($\sigma_z$) (Figura 4).

Figura 4 – Distribuição de pressões




Fonte: Adaptado de Senço (2007)

É necessário para o estudo das cargas atuantes no pavimento o estabelecimento de equivalência, para os modelos de eixo de carga, e para os tipos de roda do veículo, já que é interessante conhecer o comportamento da transmissão das cargas no pavimento e não apenas o valor de sua carga (SENÇO, 2007).

Segundo Senço (2007, p.11) a carga de roda equivalente "É a carga sobre uma roda simples, com a mesma área de contatos que uma das rodas de um conjunto, que produz o mesmo efeito desse conjunto a uma determinada profundidade".

Os limites legais, referentes ao peso máximo por eixo, estabelecidos pelo Código de Trânsito Brasileiro foram regulamentados através da Resolução nº 210/06 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) e da Portaria nº 63/2009, de 31/03/2009, do Departamento

Nacional de Trânsito (DENATRAN), e dependem do tipo de eixo do veículo ou de suas combinações, em função do comprimento total dos veículos (DNIT, 2012).

O Quadro 1 apresenta os limites legais de peso máximo de acordo com os tipos de eixos, rodas e dimensões dos veículos:

Quadro 1 – Pesos máximos por eixo

| EIXO / CONJUNTO DE EIXOS | RODAGEM | SUSPENSÃO | ENTRE-EIXOS (m) | CARGA (kg) | TOLERÂNCIA (7,5%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Isolado | Simples | Direcional | - | (1) 6.000 | 6.450 |
| Isolado | Simples | Direcional | - | (2) 6.000 | 6.450 |
| Isolado | Dupla | - | - | 10.000 | 10.750 |
| Duplo | Simples | Direcional | - | 12.000 | 12.290 |
| Duplo | Dupla | *Tandem* | >1,20 ou ≤ 2,40 | 17.000 | 18.280 |
| Duplo | Dupla | Não em *tandem* | >1,20 ou ≤ 2,40 | 15.000 | 16.130 |
| Duplo | Simples + Dupla | Especial | < 1,20 | 9.000 | 9.680 |
| Duplo | Simples + Dupla | Especial | >1,20 ou ≤ 2,40 | 13.500 | 14.520 |
| Duplo | Extralarga (4) | Pneumática | >1,20 ou ≤ 2,40 | 17.000 | 18.280 |
| Triplo (3) | Dupla | *Tandem* | >1,20 ou ≤ 2,40 | 25.500 | 27.420 |
| Triplo (3) | Extralarga (4) | Pneumática | >1,20 ou ≤ 2,40 | 25.500 | 27.420 |

Fonte: Adaptado de DNIT (2012)

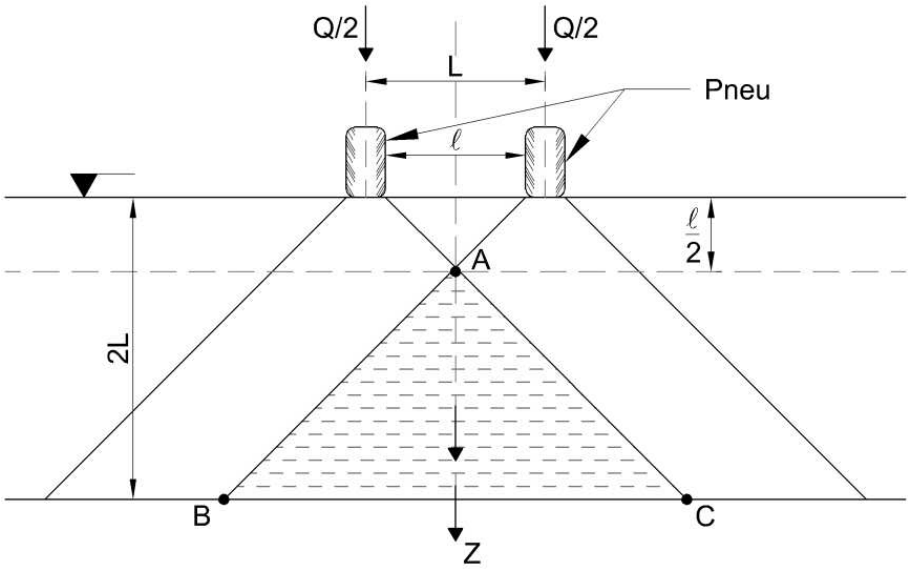
Nota: (1) Para rodas com diâmetro inferior ou igual a 830 mm;
(2) observada a capacidade e os limites de peso indicados pelo fabricante dos pneumáticos e diâmetro superior a 830 mm;
(3) aplicável somente a semirreboques;
(4) pneu single (385/65 R 22,5) aplicável somente a semirreboques e reboques conforme a Resolução nº 62 de 22/05/98 do CONTRAN.

De forma resumida, as cargas máximas legais para os tipos de eixos são:

- Eixo Simples de Rodas Simples (ESRS): 6.000 kg;
- Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD): 10.000 kg;
- Eixo *Tandem* Duplo (ETD): 17.000 kg;
- Eixo *Tandem* Triplo (ETT): 25.500 kg.

Para analisar o efeito conjunto de rodas ou eixos sobre o pavimento e estabelecer a carga equivalente, temos a Figura 5, que mostra os efeitos da superposição de cargas por eixos ou de rodas próximas:

Figura 5 – Efeitos superpostos




Fonte: Adaptado de Senço (2007)

No caso de um eixo simples de rodagem isolada, mostrado na Figura 5, temos:

l = distância entre as faces internas das rodas;
L = distância entre os centros das rodas;
Q = carga por eixo simples;
Q/2 = carga de roda.

O triângulo ABC, na Figura 5, representa a área de superposição de efeitos, onde podemos admitir as seguintes zonas de distribuição de tensão (SENÇO, 2007):

- Zona 1: vai da superfície do pavimento até a profundidade l/2, onde cada roda atua isoladamente e a carga equivalente da roda é igual a carga da roda;
- Zona 2: faixa entre as profundidades l/2 e 2L, onde o efeito da superposição das rodas tem intensidade variando em função do quadrado da profundidade e a carga equivalente da roda varia entre a carga de uma roda isolada até a carga das duas rodas totalmente superpostas;
- Zona 3: toda faixa além da profundidade 2L, onde as duas rodas atuam combinadas como apenas uma e a carga equivalente da roda é igual a carga das duas rodas totalmente superpostas.

Com esse entendimento da transmissão de cargas no pavimento, Senço (2007, p.13) diz que "De uma forma genérica e dependendo das condições do subleito, é possível admitir que a espessura necessária de um pavimento é proporcional à raiz quadrada da carga de roda equivalente".

Segundo Senço (2007), a relação da carga com a espessura do pavimento já possui um amplo campo de pesquisa e experiências desenvolvidas de onde podemos extrair as seguintes verdades:

a) As espessuras dos pavimentos são proporcionais, de forma aproximada, ao logaritmo do número de repetições das cargas de roda;
b) É comum em métodos de dimensionamento associar uma carga de roda ou de eixo padrão com as cargas que solicitarão o pavimento, considerando o número de repetições necessárias para produzir os mesmos efeitos;
c) Considerar que as pressões são aliviadas com a profundidade é interessante, do ponto de vista econômico, para estabelecer a estrutura definitiva de um pavimento.

> Como a pressão aplicada é reduzida com a profundidade, as camadas superiores estão submetidas a maiores pressões, exigindo na sua construção materiais de melhor qualidade. Para a mesma carga aplicada, a espessura do pavimento deverá ser tanto maior quanto pior forem as condições do material de subleito. Sem rigorismo extremo, pode-se mencionar a regra de que subleito ruim e cargas pesadas levam a pavimentos espessos; subleito de boa qualidade, e cargas leves levam a pavimentos delgados (SENÇO, 2007, p.14).

A relação de carga com a espessura do pavimento, como um todo, influencia diretamente na espessura de cada camada que o compõe e sua resposta estrutural dependerá dos materiais que as constituem. Sem grande rigor, pode-se dizer que as solicitações geradas no pavimento serão pressões ou tensões verticais e horizontais, flexão e cisalhamento (BALBO, 2007). O dimensionamento do pavimento utilizando tais conceitos, pertencentes à mecânica dos pavimentos, possibilita a escolha dos materiais da estrutura (MEDINA; MOTTA, 2005). Dessa forma, dependendo do método de dimensionamento adotado, surgem conceitos e parâmetros para a seleção dos materiais de acordo com suas resistências aos esforços solicitantes (BERNUCCI et al., 2008).

Como exemplo desses conceitos e parâmetros pode-se citar o coeficiente de Poisson, que é o inverso da relação da deformação vertical provocada pela deformação horizontal aplicada ao material, necessário para análise de sistemas de camadas elásticas, e a relação entre o módulo de resiliência e a resistência a tração, a qual relaciona a rigidez do material com sua capacidade de reter esforços, de forma que quanto maior a resistência do material que compõe a camada, maior será seu módulo de elasticidade (BALBO, 2007). Segundo Hveem (1995 apud BERNUCCI et al., 2008, p.291):

> Os estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais usados em pavimentação foram iniciados na década de 1930 com Francis Hveem, que foi o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos. Foi ele também quem adotou o termo “resiliência”, que é

> definido classicamente como "energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações".

Referente à seleção dos agregados utilizados, também se tem propriedades como a distribuição granulométrica e a resistência, durabilidade e forma dos grãos (BERNUCCI et al., 2008).

> Para os materiais de base, sub-base e reforço do subleito, empregam-se métodos de seleção e de caracterização de propriedades. A seleção é uma etapa preliminar que consiste em averiguar os materiais disponíveis quanto às características de natureza para serem empregados na estrutura dos pavimentos. As características de natureza interferem nas propriedades geotécnicas no estado compactado. De maneira geral, os materiais de pavimentação compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura (BERNUCCI et al., 2008, p.339).

Conforme Balbo (2007) "A resistência de um material diz respeito à medida do valor da força ou pressão que causa ruptura, ou seja, que impõe um nível de deformação de ruptura no material". Assim, são muitos os ensaios empregados para determinar a resistência dos materiais utilizados na pavimentação.

O Quadro 2 descreve alguns desses ensaios:

Quadro 2 – Ensaios de medição de resistência em materiais utilizados na pavimentação

| Ensaio | Descrição |
|---|---|
| Cisalhamento direto | Empregado para aferir resistência na interface de materiais sobrepostos; |
| Cisalhamento ou CBR | Ensaio CBR que consiste na medida de deformações sobre superfície de solos compactados com uso de pistão de penetração, em laboratório ou campo; |
| Compressão (uniaxial) simples | Ensaio convencional de compressão até a ruptura de corpos de prova cilíndricos (no Brasil); |
| Compressão diametral | Sobre amostras cilíndricas para afeição da resistência à tração indireta; |
| Tração direta (tração uniaxial) | Ensaio para avaliação direta da resistência à tração de amostras cilíndricas; |
| Tração na flexão | Realizado com dois cutelos (mais comum) para determinação do momento fletor de ruptura de amostra prismática. |

Fonte: Adaptado de Balbo (2007)

### 2.1.2 Composição estrutural do pavimento

A estrutura do pavimento trabalha em conjunto para aliviar as solicitações, porém cada camada é constituída por determinado material, o qual deve ser compatível com as funções de cada uma delas.

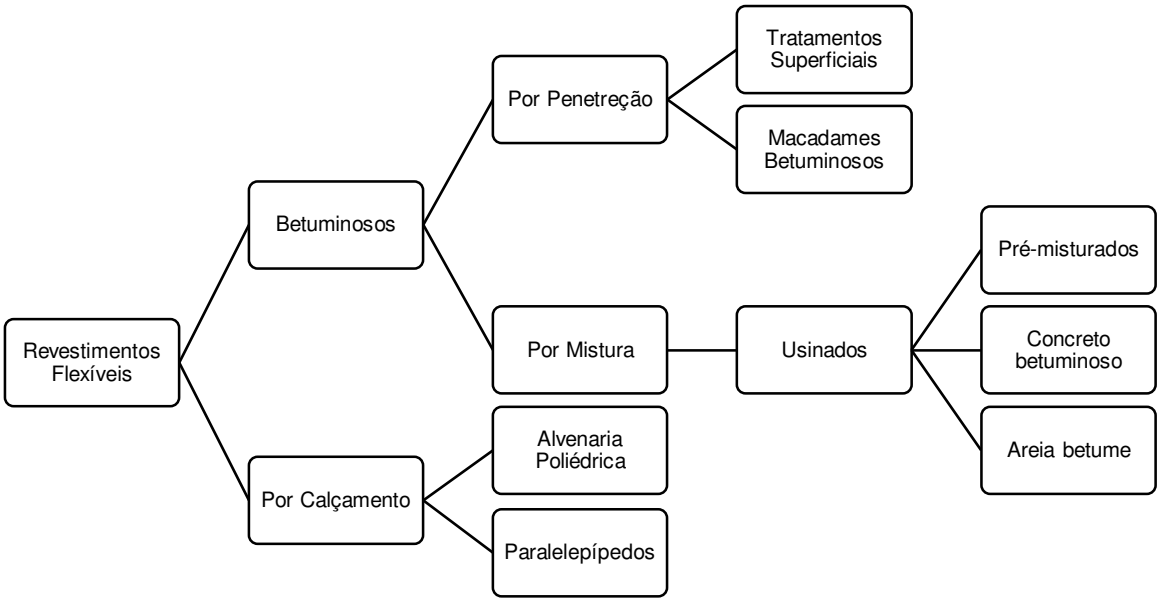
2.1.2.1 Revestimento

O revestimento é a camada que recebe diretamente a ação do clima e das cargas oriundas do tráfego de veículos, devido a isso ela deve resistir aos esforços causados pelo contato do rolamento do veículo com o pavimento e ser o máximo possível impermeável (BERNUCCI et al., 2008). Algumas de suas funções são "[...] receber as cargas, estáticas ou dinâmicas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou, ainda, perda de compactação" (BALBO, 2007, p.36).

Para Senço (2007, p.20), a camada de revestimento também é "[...] destinada a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, além de resistir ao desgaste, ou seja, aumentando a durabilidade da estrutura".

Os revestimentos flexíveis podem ser divididos em dois grupos, os revestimentos flexíveis betuminosos e os revestimentos flexíveis por calçamento (DNIT, 2006). A Figura 6 esquematiza a divisão dos revestimentos flexíveis com alguns exemplos:

Figura 6 – Classificação dos revestimentos flexíveis




Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Os revestimentos flexíveis por calçamento consistem em camadas de pedras irregulares, no caso de alvenaria poliédrica, ou blocos regulares de pedra ou pré-moldados, no caso dos paralelepípedos, assentados sobre uma camada granular de regularização (DNIT, 2006). Sobre os calçamentos, Senço (2007, p.28) diz que:

> Constituem-se, hoje em dia, em revestimentos aplicados exclusivamente em zonas urbanas. Pequenos inconvenientes, como uma certa lentidão na execução, a trepidação e sonoridade que provocam, são pouco sentidos ou altamente atenuados em locais que, por natureza, não permitem altas velocidades, como devem ser as zonas urbanas. Ademais, esses inconvenientes podem ser muito bem compensados pelas facilidades que esses pavimentos oferecem quando da necessidade de retiradas para serviços no subsolo, inclusive permitindo reaproveitamento praticamente total.

A Figura 7 mostra um pavimento de alvenaria poliédrica, e a Figura 8, um pavimento de paralelepípedos de blocos de concreto pré-moldados:

Figura 7 – Pavimento de alvenaria poliédrica

Fonte: Adaptado de <https://blogdaengenhariacivil.wordpress.com>

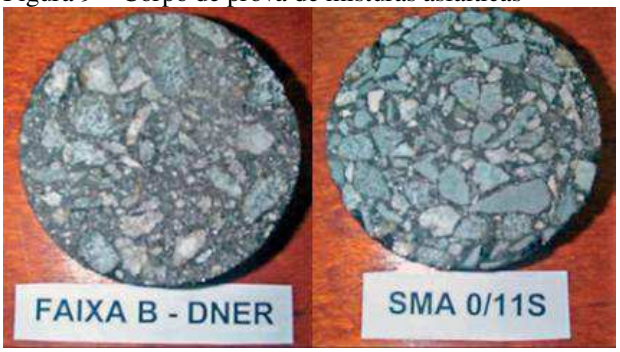
Figura 8 – Pavimento de paralelepípedos

Fonte: Adaptado de <https://tecparpavimentos.wordpress.com>

No caso dos revestimentos flexíveis betuminosos, são usadas misturas asfálticas como material para a camada de revestimento (Figura 9). As misturas asfálticas são compostas basicamente por agregados (Figura 10), que oferecem resistência às tensões impostas pelo pavimento, e ligantes asfálticos, que tem origem no petróleo e possui propriedades de um adesivo termoviscoplástico e impermeável à água (Figura 11).

Essas misturas são responsáveis por garantirem ao revestimento flexibilidade, durabilidade, resistência e impermeabilidade (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 9 – Corpo de prova de misturas asfálticas




Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008)

Figura 10 – Agregados de granulometrias diferentes

Fonte: Bernucci et al. (2008)

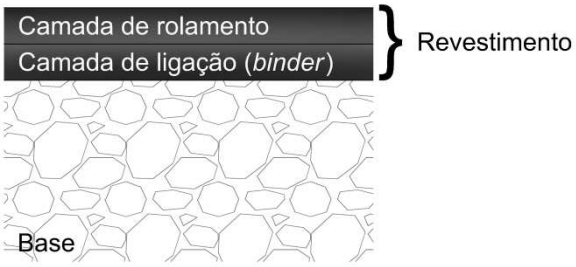
Figura 11 – Amostra de ligante asfáltico

Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008)

A associação de agregados e ligantes asfálticos pode ser feita tanto por penetração, onde, simplificadamente, os agregados são espalhados e compactados antes da aplicação do ligante asfáltico ou vice-versa, quanto por mistura, onde os agregados, antes da compactação, são pré-envolvidos com o ligante asfáltico, podendo ser pré-misturas a frio, quando o espalhamento da mistura pode ser feito a temperatura ambiente, ou pré-misturas a quente, quando é necessário aquecer a mistura antes de ser espalhada (DNIT, 2006).

É comum nos revestimentos asfálticos haver uma subdivisão em duas ou mais camadas (Figura 12), por suas razões técnicas, construtivas e de custo (BALBO, 2007).

Figura 12 – Subcamadas do revestimento




Fonte: O autor (2017)

O Quadro 3 apresenta algumas distinções entre as possíveis camadas de revestimento asfáltico:

Quadro 3 – Subdivisão de camadas do revestimento asfáltico

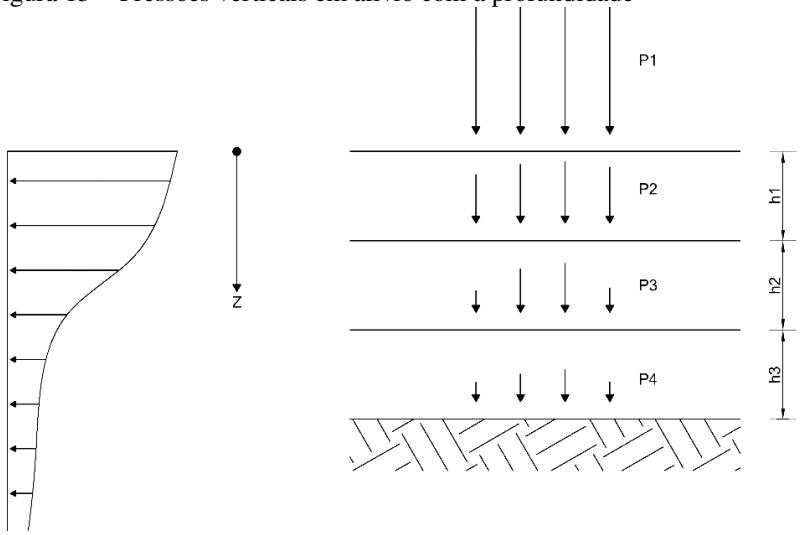
| Designação do revestimento | Definição | Associações |
|---|---|---|
| Camada de rolamento | É a camada superficial do pavimento, diretamente em contato com as cargas e com ações ambientais | Camada de desgaste, capa de rolamento, revestimento |
| Camada de ligação | É a camada intermediária, também em mistura asfáltica, entre a camada de rolamento e a base do pavimento | Camada de *binder* ou simplesmente *binder* |
| Camada de nivelamento | Em geral, é a primeira camada de mistura asfáltica empregada na execução de reforços (recapeamento), cuja função é corrigir os desníveis em pista, afundamentos localizados, enfim, nivelar o perfil do greide para posterior execução da nova camada de rolamento | Camada de reperfilagem ou simplesmente reperfilagem |
| Camada de reforço | Nova camada de rolamento, após anos de uso do pavimento existente, executada por razões funcionais, estruturais ou ambas | "Recape" e recapeamento são termos populares (usa-se também a expressão "pano asfáltico", que muitas vezes parece comprometer menos) |

Fonte: Adaptado de Balbo (2007)

### 2.1.2.2 Base e Sub-base

As camadas base e sub-base possuem a função de aliviar e distribuir os esforços a que são submetidas para as camadas inferiores (Figura 13). Elas também são importantes para a drenagem subsuperficial do pavimento (BALBO, 2007).

Figura 13 – Pressões verticais em alívio com a profundidade



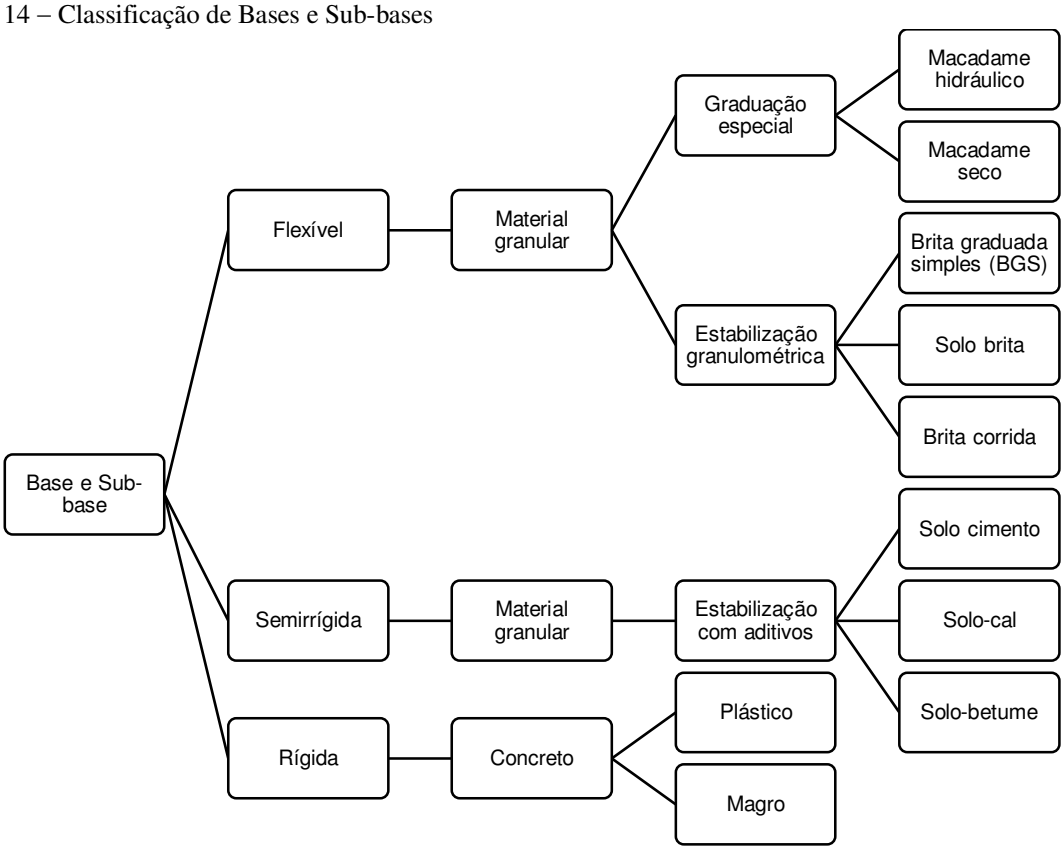

Fonte: Adaptado de Balbo (2007)

As bases e sub-bases podem ser classificadas como flexíveis, semirrígidas e rígidas, de acordo com o material ou solo utilizado. Em geral, as bases e sub-bases que utilizam solos ou materiais granulares, de graduação especial ou estabilizados granulometricamente apresentando solos com misturas de granulometria apropriada, são classificadas como flexíveis e as que utilizam solos ou materiais granulares estabilizados com aditivos, os quais apresentam misturas com baixo teor de cimento, cal ou material betuminoso, são classificadas como semirrígidas. Já as bases e sub-bases rígidas são caracterizadas por serem de concreto de cimento, apresentando uma acentuada resistência à tração (DNIT, 2006).

> Entende-se por materiais granulares aqueles que não possuem coesão (a não ser aparente pela sucção) e que não resistem à tração, trabalhando eminentemente aos esforços de compressão. Os solos coesivos resistem à compressão, principalmente, e também à tração de pequena magnitude, graças à coesão dada pela fração fina. Os materiais cimentados são materiais granulares ou solos que recebem adição de cimento, cal ou outro aditivo, de forma a proporcionar um acréscimo significativo de rigidez do material natural e um aumento da resistência à compressão e à tração. Há ainda misturas asfálticas e solo-asfalto que se destinam à camada de base e que poderiam ser classificadas como coesivas. Nesse caso a ligação entre agregados ou partículas é dada pelo ligante asfáltico, sendo a resistência à tração bastante superior aos solos argilosos [...] (BERNUCCI et al., 2008, p.352).

A Figura 14 apresenta a classificação das bases e sub-bases com alguns exemplos:

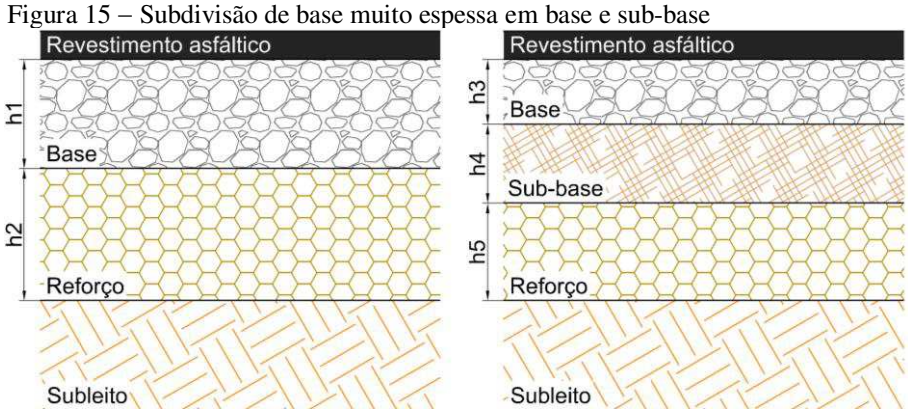
Figura 14 – Classificação de Bases e Sub-bases




Fonte: O autor (2017)

A divisão entre base e sub-base ocorre quando a espessura da base necessária para atender a estrutura do pavimento se torna muito espessa, afetando o processo construtivo e o custo do pavimento, fazendo-se necessário dividir a base em duas camadas (Figura 15), surgindo assim, a camada de sub-base que geralmente possui menor custo (BALBO, 2007).

Figura 15 – Subdivisão de base muito espessa em base e sub-base




Fonte: O autor (2017)

O material das bases e sub-bases é composto em geral por "[...] agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros." (BERNUCCI et al., 2008, p.339).

### 2.1.2.3 Reforço do subleito

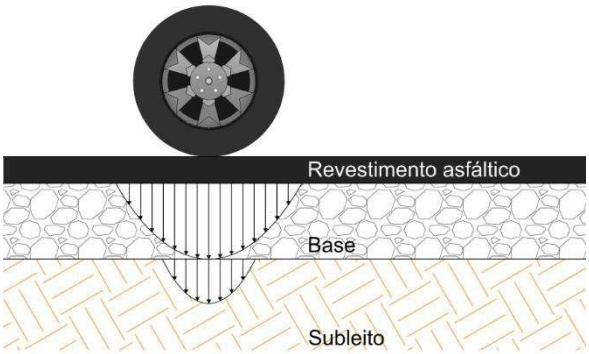
A camada de reforço é localizada logo acima do subleito e tem a função de aliviar os esforços antes de serem transmitidos para o subleito. Ele se faz necessário quando o material do subleito não apresenta resistência suficiente aos esforços transmitidos a ele. Apesar das camadas de base e sub-base também possuírem essa função, nem sempre é possível em termos construtivos e econômicos, pois aumentaria a espessura dessas camadas (SENÇO, 2007). Segundo Balbo (2007, p.38):

> O emprego de camada de reforço de subleito não é obrigatório, pois espessuras maiores de camada superiores poderiam, em tese, aliviar as pressões sobre um subleito medíocre. Contudo, procura-se utilizá-lo em tais circunstâncias por razões econômicas, pois subleitos de resistência baixa exigiriam, para alguns tipos de pavimento (especialmente os flexíveis), do ponto de vista de projeto, camadas mais espessas de base e sub-base. Logicamente, o reforço do subleito, por sua vez, resistirá a solicitações de maior ordem de grandeza, respondendo parcialmente pelas funções do subleito e exigindo menores espessuras de base e sub-base sobre si, sendo em geral menos custoso o emprego de solos de reforço, em vez de maiores espessuras de camadas granulares ou cimentadas, quaisquer que sejam.

2.1.2.4 Subleito

O subleito é a fundação para a estrutura do pavimento. Ele tem a função de receber os esforços transmitidos através das camadas superiores e dissipá-los em sua profundidade (Figura 16). Ele é composto pelo terreno natural compactado e consolidado no caso de cortes, e por material transportado e compactado no caso de aterros (BALBO, 2007).

Figura 16 – Esforços sendo dissipados no subleito




Fonte: O autor (2017)

Em caso do semi-espaço infinito no subleito, apenas a camada mais próxima, geralmente de 1 a 1,5 m aproximadamente, é considerada como fundação efetiva, devido a dissipação dos esforços com a profundidade (SENÇO, 2007).

Os materiais do subleito são avaliados pelo seu potencial de ruptura, de acordo com o método de dimensionamento utilizado.

# 3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

O dimensionamento de um pavimento constitui-se em determinar as espessuras das camadas e seus materiais empregados na construção de sua estrutura, a qual deve ser capaz de suportar o carregamento do tráfego preestabelecido e as condições climáticas, proporcionando o desempenho pretendido para suas funções (BALBO, 2007).

Segundo Balbo (2007), a diferença entre os diversos métodos de dimensionamento existentes tem como principal razão a ausência de uma definição universal e exata, em termos quantitativos, do modo como de fato se consiste uma ruptura de um pavimento. Dessa forma, a principal diferença entre os muitos métodos de dimensionamento pode ser resumida nos critérios de ruptura da estrutura do pavimento.

> No decorrer dos anos foram observadas muitas mudanças e avanços na filosofia de projeto de pavimentos asfálticos, sendo que atualmente pode-se afirmar que os mesmos rompem por diversas causas e as que estão mais intimamente associadas à repetição de cargas sobre as estruturas de pavimentos são o fenômeno de fadiga, responsável pela fissuração de revestimentos betuminosos e de bases cimentadas e o acúmulo de deformações plásticas (permanentes) devido à ação das deformações cisalhantes que ocorrem em camadas granulares e no subleito (SEVERI et al., 1998, p.2).

Os métodos de dimensionamentos foram, em geral, criados de dois modos diferentes: baseados no desempenho ao longo do tempo, adquirido através de experiências em campo (modelos empíricos) ou partindo-se de teorias elásticas adequadas para interpretar os fenômenos (modelos semiteóricos). Métodos de dimensionamento também podem surgir da associação dos modelos empíricos e semiteóricos (modelos semiempíricos) (SEVERI et al., 1998).

Conforme Balbo (2007), os métodos de dimensionamento são classificados como:

a) Métodos empíricos: originados das observações da evolução do estado de condição dos pavimentos com a modelagem elástica dos parâmetros obtidos em campo;
b) Métodos semiempíricos: gerados de extrapolações teóricas e racionais de modelos de observação obtidos pelo acúmulo de resultados empíricos;
c) Métodos empírico-mecanicistas: são análises do comportamento estrutural do pavimento associando modelos teóricos, parametrizando-se as características mecânicas dos materiais, obtidas de forma empírica, em campo ou em laboratório.

## 3.1 Modelo de previsão de desempenho

Segundo o DNIT (2006), um modelo de previsão de desempenho é uma função que possibilita medir a geração de defeitos ao longo da vida de serviço do pavimento. Recebe a denominação de modelo empírico-mecanicista quanto constituído pelas três partes seguintes:

a) Um modelo estrutural para cálculo das respostas induzidas pelo carregamento do tráfego no pavimento, na forma de tensões-deformações ou deflexões elásticas relacionadas ao desenvolvimento de defeitos na estrutura;
b) Funções de transferência baseadas em teorias empiricamente validadas que relacionam as respostas da estrutura às cargas do tráfego e ao desenvolvimento de defeitos;
c) Fatores ou funções de calibração, que regulam as previsões das funções de transferências de forma a reproduzir dados baseados empiricamente. Consideram parâmetros que não puderam ser explicitados tanto no modelo estrutural como nas funções de transferências.

## 3.2 Funções de transferências

O desenvolvimento de modelos para análise da vida de fadiga associados às repetições de cargas nas estruturas dos pavimentos tem sido realizado especialmente por meio de funções de transferências teoricamente embasadas e com resultados empíricos de laboratório (GONÇALVES, 1999).

Geralmente essas funções são expressas da seguinte forma (DNIT, 2006):

$$N_0 = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^n \times F \qquad (3)$$

onde:

$N_0$ = número de repetições de carga para a ocorrência do trincamento por fadiga;
K, n = constantes da equação de fadiga de laboratório;
$\varepsilon_t$ = deformação específica de tração;
F = fator laboratório-campo.

Conforme ensaios realizados por Pinto (1991), o seguinte modelo reflete a vida de fadiga em função da deformação específica de tração:

$$N = 6{,}64 \times 10^{-7} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2{,}93} \tag{4}$$

Preussler e Pinto (1981 apud SEVERI et al., 1998) apresentaram um procedimento fundamentado em modelos de fadiga de misturas betuminosas. O critério de fadiga apresentado, associado à deflexão máxima para determinado número de repetição do carregamento necessário para a ruptura completa da amostra, foi:

- Para revestimentos com espessura menor que 10 cm:

$$N = 5{,}548 \times 10^{16} \times D_0^{-5{,}319} \tag{5}$$

- Para revestimentos com espessura maior que 10 cm:

$$N = 3{,}036 \times 10^{13} \times D_0^{-3{,}922} \tag{6}$$

onde:

N = número de repetição de carga;
$D_0$ = deflexão, expressa em $10^{-2}$ mm;

Além dos modelos de análise da vida de fadiga do pavimento, também foram desenvolvidos os que analisam a ocorrência das deformações plásticas excessivas. Esse tipo de modelo consiste-se em limitar a deformação ou tensão vertical de compressão no topo do subleito (GONÇALVES, 1999).

> Esse procedimento assume que a deformação plástica na superfície do pavimento irá permanecer abaixo de limites tidos como toleráveis se o limite de deformação ou de tensão no topo do subleito não é excedido. Portanto, estes procedimentos não levam em conta as deformações que ocorrem nas camadas superiores do pavimento (sub-base, base e revestimento) (GONÇALVES, 1999).

O critério para analisar a deformação plástica ocorridas em pavimentos flexíveis, em geral, é modelado por relações do tipo (GONÇALVES, 1999):

$$N_d = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^{n} \tag{7}$$

onde:

$N_d$ = número de repetição de carga admissível;
$\varepsilon_v$ = deformação vertical de compressão no topo do subleito;
K, n = constantes do material.

O Quadro 4 traz alguns valores de K e n oriundos de pesquisas visando estabelecer modelos que permitam analisar a ocorrência de deformação plástica nas estruturas de pavimentos flexíveis:

Quadro 4 – Constantes do material para critério de deformação vertical

| Fonte | K | n |
|---|---|---|
| Transport & Road Research Laboratory | $1{,}130 \times 10^{-6}$ | 3,570 |
| Belgian Road Research Center | $3{,}050 \times 10^{-9}$ | 4,350 |
| U.S. Army Corps of Engineers | $1{,}807 \times 10^{-15}$ | 6,527 |
| Instituto do Asfalto | $1{,}365 \times 10^{-9}$ | 4,477 |
| SHELL Research | $6{,}150 \times 10^{-7}$ | 4,000 |
| CHEVRON | $1{,}337 \times 10^{-9}$ | 4,484 |

Fonte: Adaptado de Gonçalves (1999)

## 3.3 Método do DNIT

O método do DNIT, também conhecido antigamente como método do DNER, foi elaborado pelo prof. Murilo Lopes de Souza e consiste em uma variação da aplicação do critério CBR, tendo como base as formulações e concepções do trabalho de Turnbull et al. (1962), *Design of Flexible Pavement Considering Mixed Loads and Traffic Volume*, pertencente ao *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), e as observações e resultados obtidos na pista experimental da AASHTO. A versão atualmente usada no Brasil é a do DNIT 2006, a qual consta algumas poucas alterações em relação à do DNER 1996, sua versão anterior (DNIT, 2006).

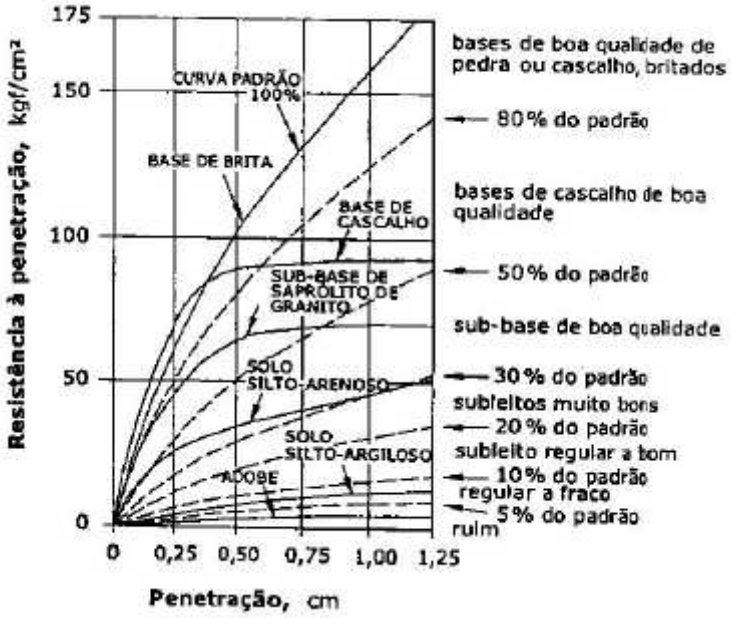
O método simula os efeitos de repetições de carga de um eixo-padrão de 18.000 lbs relacionando-se um coeficiente estrutural para os materiais, determinados através do ensaio de CBR (BALBO, 2007).

> O ensaio de índice suporte Califórnia (*California bearing ratio*) foi desenvolvido por O.J. Porter em 1929 para avaliar a capacidade de suporte relativa dos subleitos, comparada à de uma brita. Faz-se a penetração de um pistão de diâmetro 4,96cm (1,95pol), área da seção transversal de 19,4cm$^2$ (3pol$^2$), numa amostra compactada de solo à razão de 0,127cm/min (0,05pol/min) até 1,27cm (0,5pol). A pressão aplicada que produza penetração de 0,25cm (0,1pol), dividida por 70kgf/cm$^2$ (1000lb/pol$^2$) – pressão que produz a mesma penetração numa brita referência – dá o valor do CBR que se exprime em porcentagem (MEDINA; MOTTA, 2005, p.353).

Na época da pesquisa da metodologia CBR, a partir do critério de ruptura adotado, foram selecionados diversos materiais granulares usados nas camadas de pavimentos. O valor de CBR=100% é equivalente à média de resistência dos melhores materiais separados e submetidos ao ensaio de penetração CBR (BERNUCCI et al., 2008). Esse valor é considerado padrão e é a referência utilizada para realizar o ensaio em outros tipos de materiais. O método de ensaio adotado para determinar o CBR do subleito e das camadas tem base na norma DNER-ME – 049/94.

Segundo a *American Society of Civil Engineers* (ASCE, 1950 apud MEDINA; MOTTA, 2005) a Figura 17 curvas do ensaio de penetração para determinar o CBR de vários materiais com base na curva da brita de referência:

Figura 17 – Curvas do ensaio de penetração para determinar o CBR



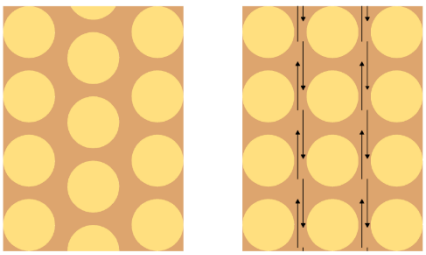

Fonte: Adaptado de ASCE (1950 apud MEDINA; MOTTA, 2005)

O critério de ruptura adotado pela metodologia CBR é pelo cisalhamento das camadas granulares e do subleito, causando deformações permanentes na camada de rolamento e subcamadas ou rupturas plásticas do subleito (BALBO, 2007).

A ruptura por cisalhamento acontece a partir da pressão aplicada no revestimento do pavimento que é transmitida através de suas camadas até o subleito. Essa pressão transmitida verticalmente faz surgir deslocamentos do material das camadas e do subleito (Figura 18), gerando o esforço cisalhante, e à medida que esses deslocamentos aumentam eles causam deformações em pontos próximos (BALBO, 2007). As deformações permanentes são

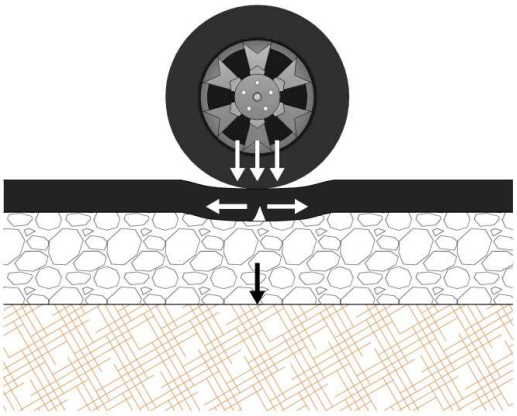
acúmulos desses deslocamentos das camadas (Figura 19). Já a ruptura plástica do subleito acontece quando a resistência específica do subleito é superada pelo esforço solicitante.

Figura 18 – Deslocamento entre partículas gerando tensão cisalhante



Fonte: Adaptado de Balbo (2007)

Figura 19 – Tensões no pavimento causando deformação



Fonte: Adaptado de Medina; Motta (2005)

Na década de 1950 até o início de 1960, no Brasil, utilizavam-se curvas de CBR para o dimensionamento de pavimentos de rodovias, estabelecidas na Califórnia, que relacionava a espessura do pavimento com o CBR. Durante esse período, duas questões elementares eram discutidas entre os projetistas (MEDINA; MOTTA, 2005):

a) como considerar o tráfego, sendo sua incidência em diferentes tipos de eixo;
b) como avaliar o comportamento estrutural do pavimento, sendo composto por diferentes tipos de materiais.

A resposta da primeira teve como base o trabalho da USACE, que estabeleceu correlações entre uma carga de eixo estabelecida como padrão, as cargas de eixo de valores diferentes e seu fator de equivalência de operações. A resposta da segunda foi fundamentada nos coeficientes estruturais dos materiais constituintes dos pavimentos obtidos através dos resultados da Pista Experimental da AASHTO. Essas duas contribuições deram origem ao método do DNIT. Conhecendo a capacidade de resistência do material através do CBR, o

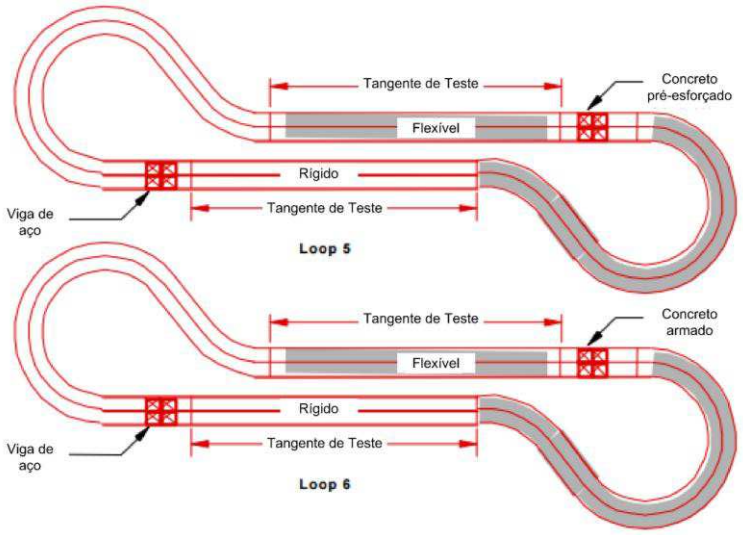
método estabeleceu relações entre o número de repetições de cargas, a carga do eixo, coeficiente de equivalência estrutural e a espessura da camada (MEDINNA; MOTTA, 2005).

Na versão atual do método, foram adicionadas outras relações ligadas às propriedades físicas do material utilizado, como índice de grupo, expansão, limite de liquidez e índice de plasticidade (DNIT, 2006).

## 3.4 Método da AASHTO

O método de dimensionamento da AASHTO tem como fundamento os dados obtidos na Pista Experimental da *American Association of State Higway Officials* (AASHO), construída entre setembro de 1956 e agosto de 1960, em Ottawa, no Estado de Illinois dos EUA (BALBO, 2007). As Figuras Figura 20 e Figura 21 trazem ilustrações da Pista Experimental da AASHO:

Figura 20 – Esquema dos *loops* 5 e 6 da Pista Experimental da AASHO




Fonte: Adaptado de <www.camineros.com>

Figura 21 – Vista aérea da Pista Experimental da AASHO

Fonte: <www.fhwa.dot.gov>

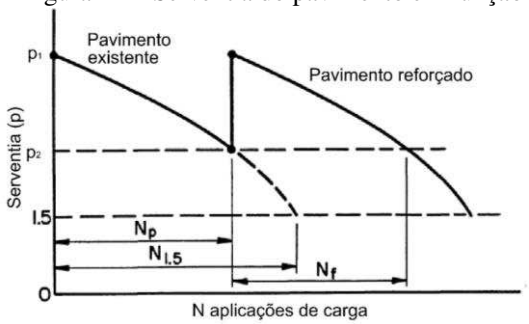
Diante os experimentos realizados, foi estabelecido o valor de carga do eixo-padrão equivalente a 18.000 lb, a partir da avaliação dos efeitos de cargas do tráfego relacionados, por meio de fatores de equivalência estrutural, com a espessura das camadas e a serventia, a qual expressava a perda de qualidade da camada de rolamento (BALBO, 2007).

Segundo a AASHTO (1993 apud BALBO, 2007, p.386):

> A serventia (p) pode ser definida como uma medida de quão bem um pavimento em dado instante do tempo serve ao tráfego usuário, com conforto e segurança de rolamento, considerando-se a existência de tráfego misto, sob qualquer condição climática. Tal medida varia dentro de uma escala de 0 a 5, e o valor 5 representa o melhor índice de serventia possível.

A Figura 22 ilustra a perda de capacidade estrutural do pavimento ao longo do tempo com o tráfego:

Figura 22 – Serventia do pavimento em função do tempo e tráfego




Fonte: Adaptado de AASHTO (1993)

onde:

$p_1$ = serventia inicial do pavimento;
$p_2$ = serventia final almejada para o pavimento ao fim do período de projeto;
$N_p$ = número equivalente de aplicações do eixo-padrão ao fim do período de projeto;
$N_{1,5}$ = número equivalente de aplicações do eixo-padrão quando o pavimento atinge a serventia limite para trafegar;
$N_f$ = número equivalente de aplicações do eixo padrão para o pavimento de reforçado atingir a serventia final;

A análise de tráfego, através de um fator de equivalência, estabelece um número de aplicações do eixo padrão ($w_{18}$) equivalente às diversas aplicações de tráfego ocorridas durante o período do projeto (SENÇO, 2007).

O método da AASHTO descreve a medida desempenho como a serventia do pavimento no decorrer do tempo. A equação de desempenho (Expressão 8), utilizada no dimensionamento do método, relaciona a serventia, o tráfego e as espessuras das camadas para determina o desempenho do pavimento no tempo (BALBO, 2007).

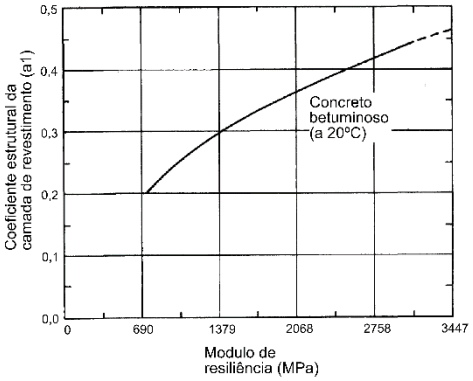
$$\log_{10} w_{18} = R \times S_0 + 9{,}36 \times \log_{10}(SN+1) - 0{,}20 + \frac{\log_{10} \frac{p_0 - p_t}{p_0 - 1{,}5}}{0{,}40 + \frac{1094}{(SN+1) \times 5{,}19}} + 2{,}32 \times \log_{10} M_R - 8{,}07 \qquad (8)$$

Segundo a AASHTO (1986 apud BALBO, 2007), essa equação leva em consideração os seguintes parâmetros:

- Número estrutural do pavimento (SN), um valor abstrato que representa a capacidade estrutural do pavimento de acordo com as aplicações do eixo padrão, serventia almejada para o período de projeto e condições ambientais. Relaciona os coeficientes estruturais (a) de cada camada com suas espessuras;
- Serventia inicial ($p_0$), valor definido após a construção do pavimento de acordo com a qualidade construtiva. Seu valor médio é 4,2, resultante dos testes da Pista Experimental da AASHO;
- Serventia terminal ($p_t$), valor desejado para a serventia do pavimento no final do seu período de projeto, em função do tipo de via. Na Pista Experimental da AASHO o valor 1,5 foi definido como a condição limite para trafegar no pavimento;
- Módulo de resiliência ($M_R$), valor que representa a capacidade de resiliência do subleito.
- Nível de confiança (R), valor determinado para assegurar que o processo de dimensionamento leve em consideração o período de vida útil do projeto e as variações nas condições de tráfego e desempenho.

Os materiais utilizados na pista experimental da AASHO, segundo SENÇO (2007), foram: "[...] concreto asfalto, brita graduada, pedra britada graduada e estabilizada, cascalho estabilizado para a sub-base e, em estudos especiais, bases estabilizadas com cimento asfalto". A Figura 23 traz um exemplo de estimativa do coeficiente estrutural da camada de revestimento ($a_1$) de concreto betuminoso em relação ao módulo de resiliência:

Figura 23 – Número estrutural x Módulo de resiliência



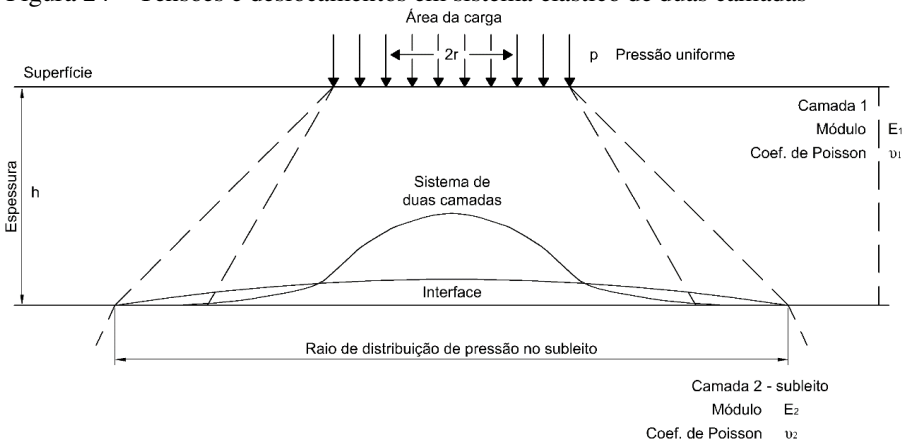

Fonte: Adaptado de AASHTO (1993)

## 3.5 O Programa ELSYM5

Na década de 60, com o avanço da programação eletrônica e o desenvolvimento tecnológico, surgiu o programa ELSYM5 para *mainframes* (computadores de grande porte) e, no ano de 1986, ganhou uma versão, escrita em linguagem Fortran, para microcomputadores operantes no Sistema Operacional em Disco (DOS). O ELSYM5 trata os problemas de pavimento com até cinco camadas aplicando em suas resoluções a Teoria de Sistema de Camadas Elásticas (TSCE) (BALBO, 2007).

A TSCE, que apresentava soluções analíticas para duas e três camadas, surgiu com os trabalhos de pesquisa analíticos, desenvolvidas pelo prof. Donald Burmister, da Columbia University, em Nova York. Segundo Balbo (2007), engenheiro e especialista em geotécnica, Burmister, desenvolveu a teoria, primeiramente, analisando os fatores físicos como a magnitude e distribuição das tensões e deslocamentos no sistema elástico com duas camadas (Figura 24).

Figura 24 – Tensões e deslocamentos em sistema elástico de duas camadas




Fonte: Adaptado de Burmsister (1944 apud BALBO, 2007)

Segundo Balbo (2007), dessa análise em duas dimensões, Burmister, formulou o problema em três dimensões a partir da Teoria da Elasticidade levando em consideração os seguintes hipóteses:

a) Em relação aos materiais, a Lei de Hooke pode ser aplicada e as camadas são consideradas homogêneas, elásticas e isotrópicas;
b) As camadas são consideradas horizontalmente infinitas, mas de espessuras finitas, já o subleito é infinito em todas as direções;
c) Na condição de superfície (primeira camada) não existe tensão de cisalhamento, já que não há tensões normais fora dos limites da área de aplicação da carga circular distribuída.

Burmister também verificou outras possibilidades de existência de tensões de cisalhamento entre a camada superior e o subleito.

> As equações de tensões e de deslocamentos foram então determinadas empregando-se uma função de tensões que satisfizesse as equações de compatibilidade da Teoria da Elasticidade, sendo definidas como funções Bessel. As análises permitiram a construção de equações para o cálculo de deslocamentos verticais, do raio de curvatura da superfície, das tensões normais e de cisalhamento [...] (BALBO, 2007, p.303).

A versão original do ELSYM5 foi desenvolvida na Universidade da Califórnia, em Berkeley, Califórnia, EUA e a versão abordada neste trabalho será a adaptada pela *SRA Technologies, Inc.* para a *Federal Highway Administration* (FHWA) na realização do estudo *Pavement Design and Analysis Procedures on Microcomputers* em 1985, a qual contém processos de entrada e saída para auxiliar o usuário com o desenvolvimento de arquivos de dados (SRA, 1985, tradução nossa).

> O ELSYM5 determinará as várias tensões, esforços e deslocamentos, juntamente com os valores principais em um sistema tridimensional ideal de camadas elásticas. O sistema em camadas será carregado com uma ou mais cargas circulares uniformes e idênticas, perpendiculares à superfície do sistema (SRA, 1985, tradução nossa).

Todas as coordenadas do sistema utilizam o Sistema de Coordenadas Retangulares XYZ, sendo o plano XY a superfície do pavimento com a coordenada Z=0, a qual cresce positivamente com a profundidade, onde as cargas serão aplicadas. Tais cargas podem ser descritas por dois dos três dados de entrada fornecidos ao programa, sendo eles a carga, a tensão e o raio da área de contato, onde o valor não fornecido será determinado pelo ELSYM5 (SRA, 1985, tradução nossa).

As camadas do pavimento são numeradas de cima pra baixo de forma crescente, onde a camada superior será a número 1. Os dados de entrada para caracterizar as camadas

são o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a espessura (SRA, 1985, tradução nossa).

Dentro do programa o usuário terá acesso a vários menus onde poderá escolher entre entrada e modificação de dados. Cada opção exibirá na tela um formulário com a descrição e valores a serem inseridos ou modificados. O programa segue uma sequência lógica de navegação entre os campos de dados, onde em cada um, o usuário tem três opções: aceitar o valor mostrado, inserir um novo valor ou sinalizar ao programa que nenhum dado deverá ser inserido na tela atual ao pressionar a tecla F2. Ao final de uma tela de preenchimento o usuário terá outra oportunidade de modificar os dados antes de prosseguir. Em todas as telas, sempre na última linha, o programa informará quais opções estão disponíveis. Tanto os arquivos de saída como os de entrada possuem formato idêntico aos da versão original e o ELSYM5 permite múltiplos casos por arquivos de dados, onde é possível modificar o arquivo uma vez já lido pelo programa para mais uma vez ser processado (SRA, 1985, tradução nossa).

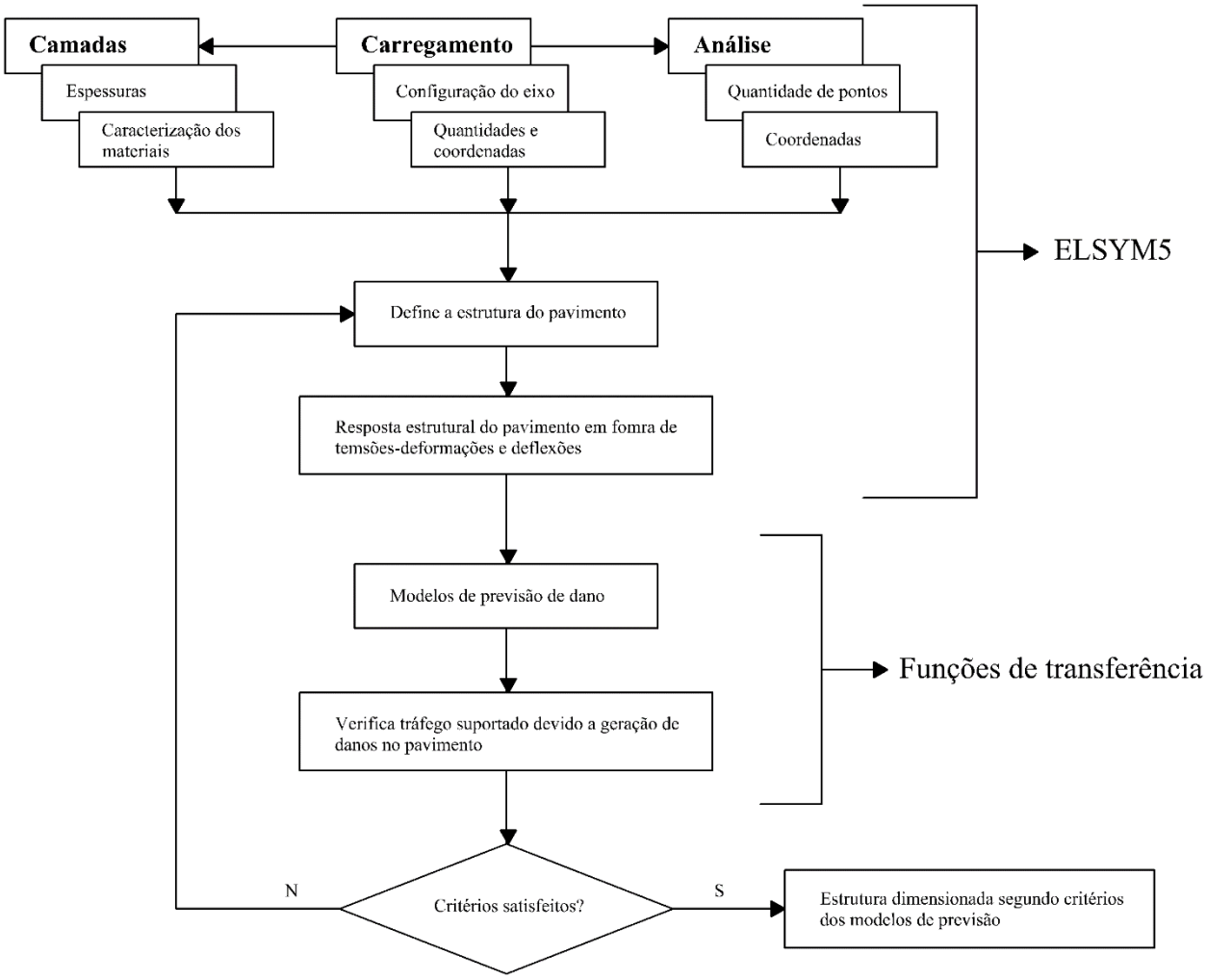
O programa é adimensional, sendo necessária apenas a entrada de dados em unidades coerentes (BALBO, 2007).

O ELSYM5 terá como dados de saída: tensões normais, tensões cisalhantes, tensões principais atuantes, deslocamentos normais, deformações normais, deformações cisalhantes e deformações principais, de acordo com o carregamento e as coordenadas dos pontos de análise na estrutura (DAROUS, 2003).

Com esses dados de saída é possível realizar a análise com modelos de previsão de desempenho do pavimento que relaciona as respostas estruturais do pavimento em reflexo ao carregamento com a geração de defeitos (DNIT, 2006).

A Figura 25 exemplifica o procedimento da análise realizada pelo ELSYM5 utilizando funções de transferências para o dimensionamento do pavimento:

Figura 25 – Fluxograma da análise realizada pelo ELSYM5 utilizando-se funções de transferência




Fonte: O autor (2017)

## 3.6 O Programa SisPav

Em uma análise mecanicista a estrutura do pavimento é avaliada de acordo com relações de tensão-deformação em função da carga imposta pelo tráfego onde os materiais constituintes das camadas são caracterizados utilizando-se parâmetros oriundos de resultados obtidos empiricamente e aplicando-se modelos matemáticos como base de seus cálculos e considerações (FREITAS, 2016).

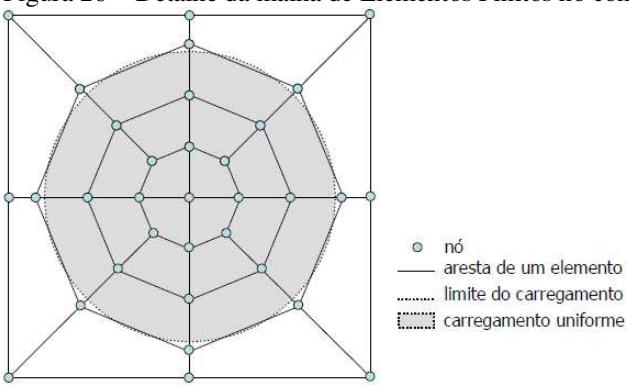
O SisPav não é diferente, apresentado por Franco, em 2007, no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), como tese de doutorado, é um programa de dimensionamento de pavimentos flexíveis através de um método de análise mecanicista e baseado no programa RIOPAVE, que calcula tensões, deformações e deslocamentos pelo

Método dos Elementos Finitos (MEF) através de uma análise tridimensional capaz de se adequar a estrutura dos pavimentos (FRANCO, 2007).

"Nos Métodos dos Elementos Finitos [...] o meio contínuo (a estrutura) é usualmente dividido em elementos fictícios de dimensões finitas, ligados entre si por pontos nodais que se assimilam a articulações sem atrito." (FRANCO, 2007, p.25). Ao adotar o MEF é necessário fazer considerações sobre a estrutura do pavimento. Uma delas é a natureza tridimensional dos carregamentos aplicados no pavimento. Apesar de na maioria dos estudos o carregamento ser considerado em duas dimensões, utilizando o MEF com uma análise tridimensional do pavimento faz com que o programa tenha uma melhor leitura do comportamento real da estrutura (FRANCO, 2007). Outro aspecto essencial a ser considerado é a elasticidade não linear que os materiais granulares apresentam (MEDINA; MOTTA, 2005). Utilizando a Teoria da Elasticidade no cálculo das tensões e deformações das camadas, o SisPav também analisa a elasticidade não linear, de forma simples, no plano vertical (FRANCO, 2007).

O SisPav tem a capacidade de "[...] modelar o problema e gerar uma malha de forma automática, um módulo de processamento que calcula, pelo MEF, as tensões, deformações e deslocamentos nos nós e nos elementos da malha" (FRANCO, 2007, p.36). A transformação dos dados para o modelo pode ser exemplificada através da carga atuante na estrutura através da roda (Figura 26). "Para essa transformação, a distribuição da carga de roda, suposta circular, foi aproximada a uma distribuição uniforme em uma área octogonal, dividida em 24 trapézios" (FRANCO, 2007, p.37).

Figura 26 – Detalhe da malha de Elementos Finitos no contato pneu / pavimento




Fonte: Franco (2007)

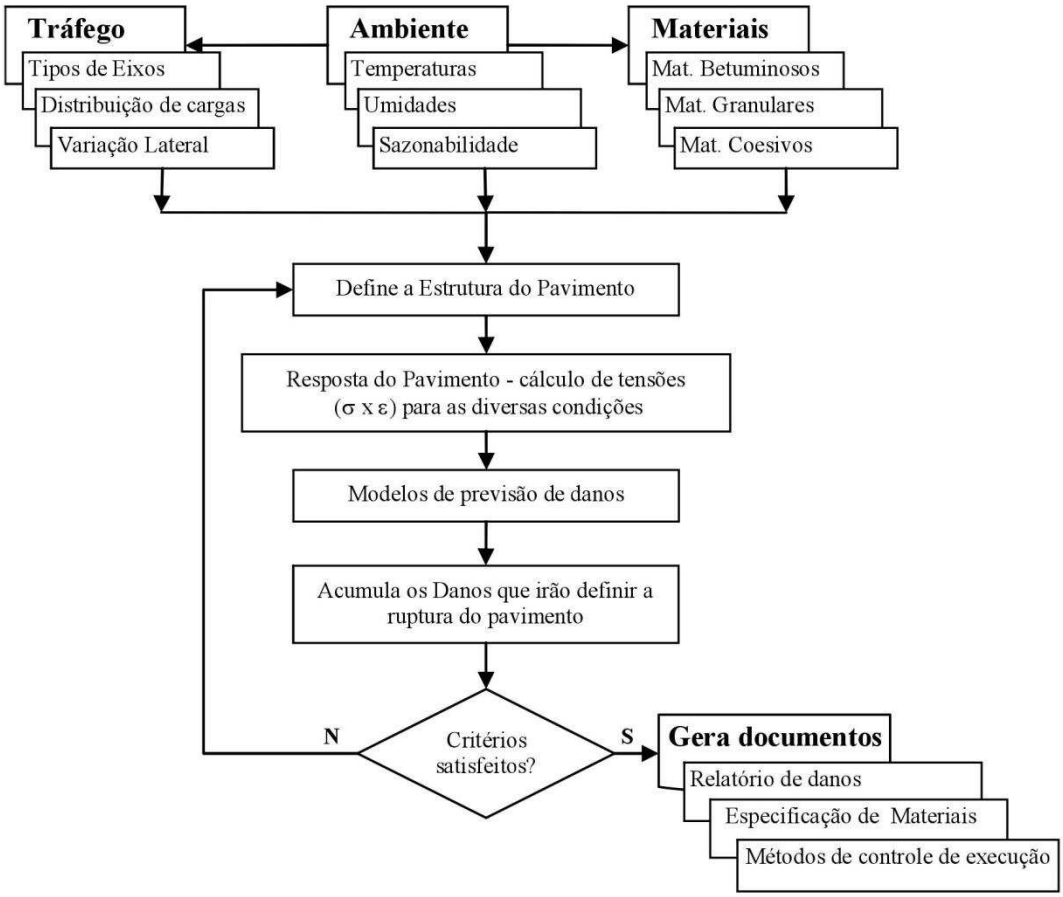
O método adotado pelo SisPav leva em consideração uma base de dados brasileira de tráfego, clima e materiais utilizados, obtidas em ensaios de laboratório. A partir desses dados, o programa gera um modelo que prever os danos causados e a acumulação de dano ao

longo do período de projeto que levará à ruptura do pavimento. Então, uma análise é realizada levando em considerações os critérios como danos por deformação permanente, a deflexão máxima na superfície do pavimento e o dano de fadiga no revestimento asfáltico. Caso os critérios não sejam satisfeitos, o programa redimensiona a estrutura até que seja possível satisfazê-los (FRANCO, 2007).

Para o dimensionamento de pavimentos flexíveis o SisPav analisa os danos por deformação permanente limite no topo do subleito, a deflexão máxima ocorrida na superfície do revestimento e o dano por fadiga causada no revestimento (FRANCO, 2007 apud FREITAS, 2016).

O fluxograma a seguir (Figura 27), detalha o método de dimensionamento realizado pelo programa SisPav:

Figura 27 – Fluxograma de análise e dimensionamneto do programa SisPav




Fonte: Franco (2007)

# 4 ROTEIROS DE DIMENSIONAMENTO

Conforme os métodos e programas para análise mecanicista do dimensionamento de pavimentos flexíveis citados no capítulo anterior apresentam-se roteiros de utilização com suas respectivas versões.

## 4.1 Roteiro de dimensionamento pelo método do DNIT 2006

A seguir apresenta-se um roteiro resumido da versão atual do método do DNIT referente à sua atualização de 2006, disposta no Manual de Pavimentação (2006).

### 4.1.1 Materiais empregados

A capacidade de resistir aos esforços solicitantes, determinada pelo CBR, dos materiais constituintes do subleito e das camadas do pavimento deve estar em concordância com os valores fixados, sempre sendo iguais ou superiores aos especificados, na determinação do CBR segundo o método de ensaio correspondente à norma DNER – ME 049/94 (DNIT, 2006). O Quadro 5 traz a classificação dos materiais do subleito e materiais empregados em cada camada do pavimento:

Quadro 5 – Classificação dos materiais empregados no pavimento

| Estrutura do pavimento | Tráfego (N) | CBR | Expansão (e) | Índice de Grupo (IG) | Limite de Liquidez (LL) | Índice de Plasticidade (IP) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Subleito | Todos | $\geq 2\%$ | $\leq 2\%$ | - | - | - |
| Reforço | Todos | $> CBR_{subleito}$ | $\leq 1\%$ | - | - | - |
| Sub-base | Todos | $\geq 20\%$ | $\leq 1\%$ | 0 | - | - |
| Base | $\leq 5 \times 10^6$ | $\geq 60\%$ | $\leq 0{,}5\%$ | - | $\leq 25\%$ | $\leq 6\%$ |
| | $> 5 \times 10^6$ | $\geq 80\%$ | $\leq 0{,}5\%$ | - | $\leq 25\%$ | $\leq 6\%$ |

Fonte: DNIT (2006)

O DNIT (2006) estabelece que os materiais granulares, empregados na camada de base, devem se enquadrar em uma das seguintes faixas granulométricas (Quadro 6):

Quadro 6 – Granulometria para materiais de base granular

| Tipos | Para N > 5 × $10^6$ | | | Para N < 5 × $10^6$ | | | Tolerâncias da faixa de projeto |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Peneiras | A | B | C | D | E | F | |
| | % em peso passando | | | | | | |
| 2” | 100 | 100 | – | – | – | – | ±7 |
| 1” | – | 75 – 90 | 100 | 100 | 100 | 100 | ±7 |
| 3/8” | 30 – 65 | 40 – 75 | 50 – 85 | 60 – 100 | – | – | ±7 |
| Nº4 | 25 – 55 | 30 – 60 | 35 – 65 | 50 – 85 | 55 – 100 | 10 – 100 | ±5 |
| Nº10 | 15 – 40 | 20 – 45 | 25 – 50 | 40 – 70 | 40 – 100 | 55 – 100 | ±5 |
| Nº40 | 8 – 20 | 15 – 30 | 15 – 30 | 25 – 45 | 20 – 50 | 30 – 70 | ±2 |
| Nº200 | 2 – 8 | 5 – 15 | 5 – 15 | 10 – 25 | 6 – 20 | 8 – 25 | ±2 |

Fonte: DNIT (2006)

Ainda relativo aos materiais granulares empregados na base, o DNIT (2006) ressalva que:

- Caso o Limite de Liquidez supere os 25% ou o Índice de Plasticidade seja maior que 6%, ou ambas as situações, o material ainda poderá ser empregado, desde que apresente Equivalente de Areia maior que 30%;
- Em qualquer faixa granulométrica, a parcela do material que passa na peneira Nº200 deve ser inferior a 2/3 da parcela que passa na peneira Nº40;
- A parcela de material graúdo deve apresentar desgaste Los Angeles igual ou menor que 50, caso apresente valores superiores, pode ser admitido, desde que haja experiência no uso do material.

### 4.1.2 Tráfego

A análise de tráfego, para o dimensionamento do pavimento, é feita pelo número equivalente (N) de operações do eixo padrão, eixo simples de carga 8,2 t (18.000 lb), ao longo do período de projeto estabelecido. Os dados do tráfego e fatores são necessários para determinar o número equivalente (DNIT, 2006).

#### 4.1.2.1 Volume do tráfego

Dados do tráfego para a estrada considerada no projeto, em que são calculados através de dados estatísticos, pode-se também determina-los através de estudo econômico da região. É realizada uma contagem do tráfego, para a estrada considerada, sendo estudado um volume tráfego, obtido em um período de amostragem (DNIT, 2006).

Conforme o DNIT (2006), para calcular o volume de tráfego, tem-se:

a) Por crescimento linear:

$$V_m = \frac{V_i \left[2 + (P - 1) \frac{t}{100}\right]}{2} \tag{9}$$

onde:

$V_i$ = volume médio diário de tráfego, em um sentido, no ano de abertura;
P = período de projeto em anos;
t = taxa de crescimento anual (%).

Da Expressão 9, multiplicando o período de projeto pela quantidade de dias por ano, o volume total de tráfego ($V_t$), será:

$$V_t = 365 \times P \times V_m \tag{10}$$

b) Por crescimento exponencial:

$$V_t = \frac{365 \times V_i \left[\left(1 + \frac{t}{100}\right)^P - 1\right]}{\frac{t}{100}} \tag{11}$$

4.1.2.2 Fatores de eixos, carga, veículo e climático regional

Conhecida a composição do tráfego, é possível calcular os fatores de eixos, carga e veículo. (DNIT, 2006).

Durante a contagem do tráfego, no período de amostragem, é feito a pesagem de todos os eixos para relacionar os tipos de eixos em operação com o eixo padrão (DNIT, 2006):

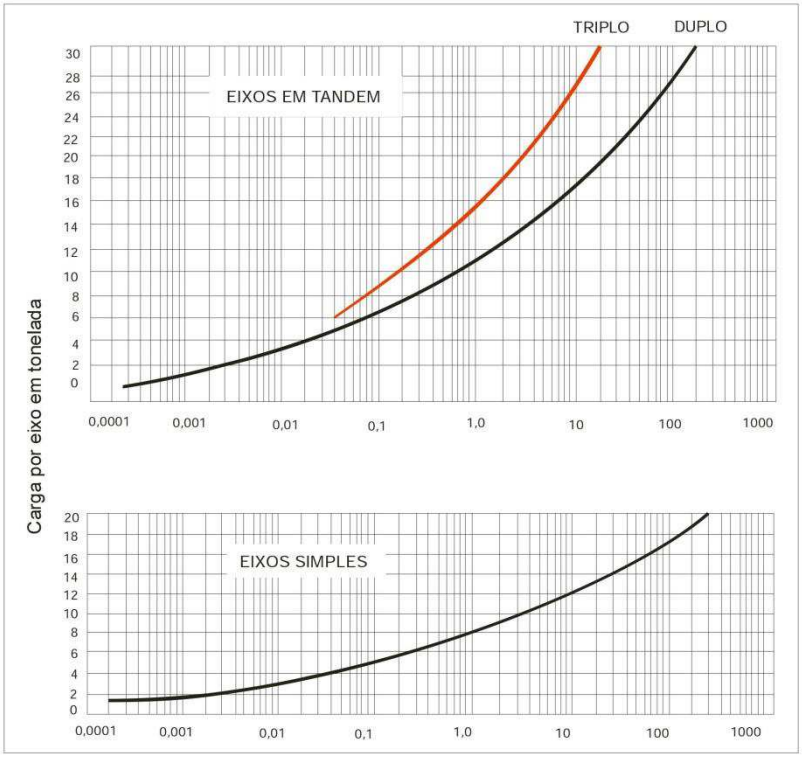
$$FE = \frac{n}{V_{ta}} \tag{12}$$

onde:

FE = fator de eixos, número que multiplica o número de veículos para encontrar o número de eixos em operação correspondentes;
n = número equivalente de operações por eixo durante o período de amostragem;
$V_{ta}$ = volume total de tráfego durante o período de amostragem.

A Figura 28 mostra a relação dos fatores de equivalência de operação por eixo (DNIT, 2006):

Figura 28 – Fatores de equivalência de operação




Fonte: DNIT (2006)

Organizando os dados da pesagem, os fatores de equivalência, obtidos na Figura 28, conforme os tipos de eixos por intervalos de carga, obtém-se os fatores de operações pelo produto da segunda coluna pela terceira, como mostra o Quadro 7: (DNIT, 2006):

Quadro 7 – Determinação do fator de operações

| Eixos | Porcentagem (%) | Fator de equivalência | Fator de operações |
|---|---|---|---|
| Eixo Simples (t) | | | |
| | | | |
| Eixo *tandem* (t) | | | |
| | | | |

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Fazendo-se o somatório da quarta coluna, tem-se:

$$FC = \frac{\sum \text{Fator de operações}}{100} \tag{13}$$

onde:

FC = fator de carga, número que multiplica o número de eixos operantes para encontrar o número de eixos equivalentes ao eixo padrão;

Com o produto do fator de eixos (FE) pelo fator de carga (FC) tem-se:

$$FV = FE \times FC \tag{14}$$

onde:

FV = fator de veículo, número que multiplica o número de veículos para encontrar o número de eixos correspondentes, equivalentes ao eixo padrão.

O fator de veículo (FV) também pode ser encontrado pelo fator de veículo individual ($FV_i$), calculado para cada categoria de veículo (DNIT, 2006):

$$FV = \frac{\sum(FV_i \times P_i)}{100} \tag{15}$$

O DNIT (2006) classifica os veículos nas seguintes categorias:

a) Automóveis;

b) Ônibus;

c) Caminhões leves, com eixos isolados, de rodas simples;

d) Caminhões médios, com eixo duplo, sendo o traseiro de rodas duplas;

e) Caminhões pesados, com eixo duplo, sendo o traseiro em *tandem*;

f) Reboques e semirreboques, condições de combinações de um ou mais veículos.

Para o DNIT (2006), o $FV_i$ para os veículos das categorias de automóveis e caminhões leves podem ser desprezados, enquanto os da categoria de caminhões médios, caminhões pesados e reboques e semirreboques são os que mais interessam.

Ao multiplicar os fatores pelo $V_t$, obtém-se:

$$N = V_t \times FV \times FR \tag{16}$$

onde:

N = número equivalente de operações do eixo padrão ao longo do período de projeto estabelecido;

FR = fator climático regional, leva em consideração, para o número equivalente (N), as variações de umidades dos materiais do pavimento durantes as diferentes estações do ano.

O fator climático regional é a média ponderada dos diferentes coeficientes sazonais, considerando-se a duração em que ocorrem. Geralmente adota-se o FR = 1,0, em razão dos resultados de pesquisas desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) (DNIT, 2006).

### 4.1.3 Coeficientes estruturais

São valores que representam a capacidade estrutural dos materiais constituintes do pavimento, em função da análise do tráfego, das condições das camadas e do subleito e das condições climáticas, em correspondência às espessuras das camadas. (SENÇO, 2007).

De acordo com o DNIT (2006), os valores do coeficiente de equivalência estrutural (K), para as camadas e seus materiais, estão representados no Quadro 8:

Quadro 8 – Coeficientes de equivalência estrutural

| Componentes do pavimento | Coeficiente K |
|---|---|
| Base ou revestimento de concreto betuminoso | 2,00 |
| Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa | 1,70 |
| Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa | 1,40 |
| Base ou revestimento betuminoso por penetração | 1,20 |
| Camadas granulares | 1,00 |
| Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm | 1,70 |
| Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm a 28 kg/cm | 1,40 |
| Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm a 21 kg/cm | 1,20 |

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Segundo o DNIT (2006), pesquisas futuras podem justificar modificações nos valores dos coeficientes. Cada camada tem seus coeficientes estruturais geralmente representados por:

- $K_R$, coeficiente estrutural do revestimento;
- $K_B$, coeficiente estrutural da base;
- $K_S$, coeficiente estrutural da sub-base;
- $K_{Ref}$, coeficiente estrutural do reforço.

### 4.1.4 Espessura do revestimento

Conforme o DNIT (2006):

> A fixação da espessura mínima a adotar para os revestimentos betuminosos é um dos pontos ainda em aberto na engenharia rodoviária, quer se trate de proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego, quer se trate de evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão.

No Quadro 9 estão as espessuras recomendadas pelo DNIT (2006), definidas através de observações realizadas, destinadas especialmente para bases de comportamento exclusivamente granular:

Quadro 9 – Espessuras mínimas para revestimentos betuminosos

| N | Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso |
|---|---|
| $N \leq 10^6$ | Tratamentos superficiais betuminosos |
| $10^6 < N \leq 5 \times 10^6$ | Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura |
| $5 \times 10^6 < N \leq 10^7$ | Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura |
| $10^7 < N \leq 5 \times 10^7$ | Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura |
| $N > 5 \times 10^7$ | Concreto betuminoso com 12,0 cm de espessura |

Fonte: DNIT (2006)

### 4.1.5 Espessuras das camadas

Para calcular as espessuras das camadas é necessário determinar a espessura total do pavimento, pelo ábaco representado na Figura 29, em função de N e do CBR dos materiais empregados. As espessuras obtidas no ábaco são em termos de material granular, ou seja, coeficiente estrutural K = 1,0, e são designadas como (DNIT, 2006):

- Espessura total do pavimento ($H_m$) – espessura necessária para proteger um subleito com determinado CBR;
- Espessura do pavimento sobre o reforço ($H_n$) – espessura necessária para proteger a camada de reforço com determinado CBR;
- Espessura do pavimento sobre a sub-base ($H_{20}$) – espessura necessária para proteger a camada de sub-base, admitindo-se que o CBR da sub-base possua valor igual a 20%, mesmo que o material empregado apresente CBR de valor superior.

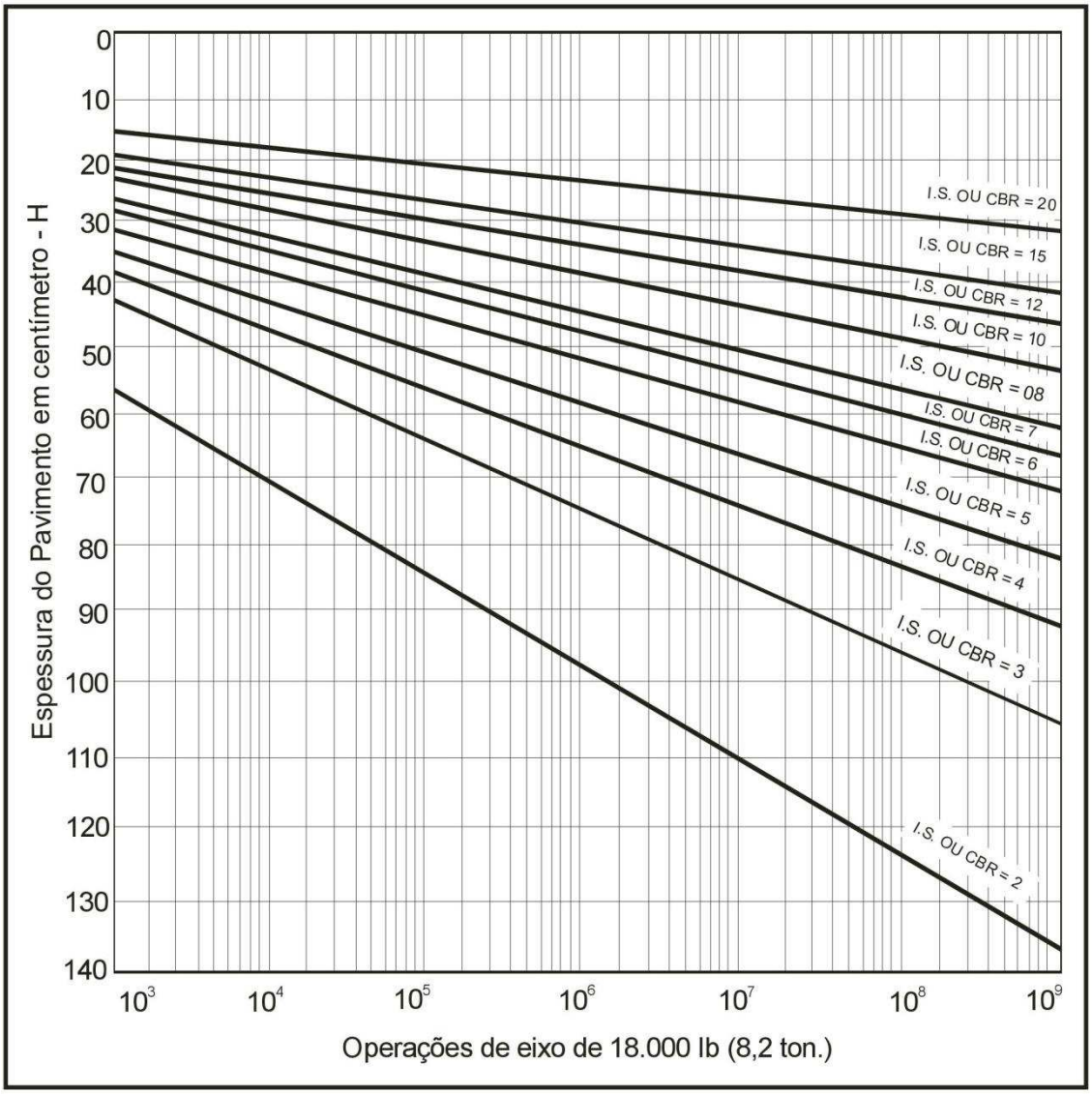
As curvas, apresentadas no ábaco da Figura 29, podem ser transformadas na seguinte expressão:

$$H_{eq} = 77{,}67 \times N^{0{,}0482} \times CBR^{-0{,}598} \quad (17)$$

onde:

$H_{eq}$ = espessura do pavimento sobre o subleito ou a camada em análise;
CBR = capacidade de suporte do subleito ou da camada em análise.

Figura 29 – Determinação de espessuras do pavimento




Fonte: DNIT (2006)

Com as espessuras do pavimento e conhecidos a espessura do revestimento (R) e os coeficientes estruturais (K), necessários para fazer equivalência das espessuras obtidas no

ábaco, consideradas como material granular, os quais podem não corresponder ao material empregado, é possível calcular a espessura de cada camada satisfazendo-se as seguintes inequações (DNIT,2006):

$$(R \times K_R) + (B \times K_B) \geq H_{20} \tag{18}$$

$$(R \times K_R) + (B \times K_B) + (h_{20} \times K_S) \geq H_n \tag{19}$$

$$(R \times K_R) + (B \times K_B) + (h_{20} \times K_S) + (h_n \times K_{Ref}) \geq H_m \tag{20}$$

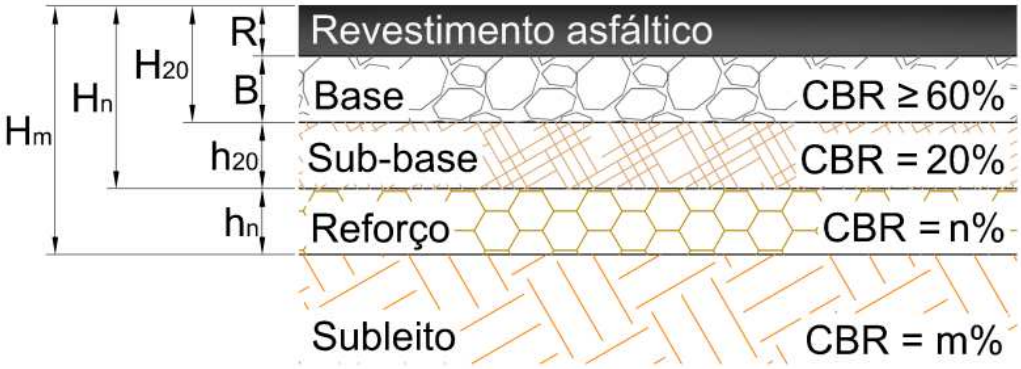
onde:

R = espessura da camada de revestimento;
B = espessura da camada de base;
$h_{20}$ = espessura da camada de sub-base;
$h_n$ = espessura da camada de reforço;

É importante observar que a espessura da sub-base ($h_{20}$) é calculada em razão da espessura $H_{20}$, a qual foi determinada com CBR = 20%.

A Figura 30 mostra a simbologia utilizada para as espessuras no dimensionamento do pavimento:

Figura 30 – Espessuras no dimensionamento do pavimento




Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Conforme o DNIT (2006), a espessura mínima construtiva para as camadas granulares é de 15 cm, sendo que quando houver necessidade de executar essas camadas com espessura construtiva superior a 20 cm, elas devem ser divididas em camadas parciais de compactação, com espessura mínima de 10 cm e máxima de 20 cm.

## 4.2 Roteiro de dimensionamento pelo método da AASHTO 1993

Conforme o Guia para o Projeto de Estruturas de Pavimentos (AASHTO, 1993), apresenta-se um resumo para o dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizando-se o método da AASHTO de 1993.

### 4.2.1 Restrições de tempo

A escolha do período de desempenho e análise do pavimento afeta ou restringe o dimensionamento dos pavimentos. Isso permite ao projetista estabelecer estratégias desde a fase inicial de construção até fases de reabilitação do pavimento (AASHTO, 1993, tradução nossa).

#### 4.2.1.1 Período de desempenho

Refere-se ao tempo que o pavimento deve durar antes de precisar ser reabilitado. Deve ser determinado um valor mínimo e máximo pelo projetista para o período de desempenho (AASHTO, 1993, tradução nossa).

O período mínimo de desempenho é o menor tempo que uma determinada fase do pavimento deve durar para precisar de uma grande reabilitação. Esse valor é determinado por fatores como a percepção pública de quanto um pavimento deve durar, os custos iniciais de construção, o custo do ciclo de vida do pavimento entre outras considerações de engenharia. Geralmente, o período mínimo de desempenho desejável para uma estrutura de pavimento é de 10 anos (AASHTO, 1993, tradução nossa).

O período máximo de desempenho é o maior tempo prático que o usuário espera de uma determinada fase do pavimento. Geralmente, um pavimento projetado para um período de 20 anos necessita de uma reabilitação no revestimento com 15 anos após a fase inicial de construção. A escolha de longos períodos pode resultar em dimensionamentos inviáveis. Entretanto, ter uma boa precisão no tempo de vida útil de um pavimento proporciona um melhor dimensionamento (AASHTO, 1993, tradução nossa).

#### 4.2.1.2 Período de análise

Refere-se ao período de tempo no qual é conduzida a análise para o dimensionamento. Também denominada como período de projeto, em geral, considera-se 20 anos para o período de análise, considerando-se que o pavimento apresenta sua fase inicial e uma reabilitação para atingir o tempo total. Todavia, o recomendado é que se admitam maiores períodos, possibilitando mais abordagens de dimensionamento. O Quadro 10 mostra as recomendações para o período de análise de acordo com as condições da rodovia (AASHTO, 1993, tradução nossa):

Quadro 10 – Período de análise para as condições da rodovia

| Condições da rodovia | Período de análise (anos) |
|---|---|
| Área urbana com alto tráfego | 30 – 50 |
| Área rural com alto tráfego | 20 – 50 |
| Pavimentado com baixo tráfego | 15 – 25 |
| Tratamento superficial com baixo tráfego | 10 – 20 |

Fonte: Adaptado de AASHTO (1993)

### 4.2.2 Tráfego

O dimensionamento para o pavimento de rodovias é baseado no tráfego equivalente às operações do eixo-padrão, acumulado em ambas as direções do trecho da rodovia em questão, durante o período de análise ($\widehat{w}_{18}$). O tráfego é representado pelo número de aplicações equivalentes do eixo-padrão ($w_{18}$). A Expressão 21 mostra como é calculado o tráfego (AASHTO, 1993, tradução nossa):

$$w_{18} = D_D \times D_L \times \widehat{w}_{18} \tag{21}$$

onde:

$D_D$ = fator de distribuição direcional, direção do tráfego na rodovia em porcentagem, por exemplo, norte-sul ou leste-oeste;

$D_L$ = fator de distribuição de faixa, expressa a porcentagem do tráfego em cada faixa, quando há duas ou mais de mesma direção.

Experiências tem mostrado que o fator $D_D$ pode variar de 30% até 70% dependendo da direção da faixa com maior tráfego. Entretanto, o fator $D_D$ é geralmente 50%

em cada direção. Já para o fator $D_L$ o Quadro 11 pode ser usado como guia (AASHTO, 1993, tradução nossa):

Quadro 11 – Distribuição do tráfego em porcentagem pelo número de faixas

| Número de faixas em cada direção | Tráfego em operações do eixo-padrão na faixa de projeto (%) |
|---|---|
| 1 | 100 |
| 2 | 80 – 100 |
| 3 | 60 – 80 |
| 4 | 50 – 75 |

Fonte: Adaptado de AASHTO (1993)

### 4.2.3 Confiabilidade

A confiabilidade (R) incorpora um grau de certeza no dimensionamento para assegurar que as alternativas de projeto considerem as variações nas condições do tráfego e no tráfego estipulado. O Quadro 12 sugere níveis de confiabilidade de acordo com a classificação funcional da via:

Quadro 12 – Níveis de confiança de projeto

| Classificação funcional | Nível de confiança recomendado para via (%): | |
|---|---|---|
| | Urbana | Rural |
| Interestaduais e autoestradas | 85 – 99,9 | 80 – 99,9 |
| Arteriais principais | 80 – 99 | 75 – 95 |
| Coletoras | 80 – 95 | 75 – 95 |
| Locais | 50 – 80 | 50 – 80 |

Fonte: Adaptado de AASHTO (1993)

Segundo a AASHTO (1993, tradução nossa), a aplicação do conceito de confiabilidade deve seguir os seguintes passos:

- Estabelecer a classificação funcional da via e se ela é urbana ou rural;
- Escolher um R dentro da extensão recomendada no Quadro 12. Sendo que, quanto maior for o R mais será exigido da estrutura do pavimento;
- Selecionar o desvio-padrão ($S_0$) para representar as condições locais. Foi associado um valor de 0,35 para o $S_0$ de pavimentos flexíveis e 0,45 para pavimentos rígidos, de acordo com resultados obtidos na Pista experimental da AASHO.

### 4.2.4 Serventia

A serventia é definida como a capacidade de um dado pavimento servir ao tipo de tráfego. A medida utilizada é o Índice Atual de Serviço ou *Present Serviceability Index* (PSI) e vária do valor 0 (impossível trafegar) até 5 (tráfego perfeito). Segundo resultados de experimentos na Pista Experimental da AASHO, foi definido que a serventia final ($p_t$) teria valores correspondentes ao tipo de tráfego da via, sendo que para projetos de rodovias principais o valor recomendado deve variar de 3,0 a 2,5 e para vias secundárias o valor recomendado é 2,0. Já para os valores de serventia inicial ($p_0$) foi estabelecido o valor de 4,2. Uma vez determinados os valores de $p_0$ e a $p_t$, calcula-se, através da Expressão 22, a variação de serventia ($\Delta$PSI) do pavimento durante o período de projeto (AASHTO, 1993, tradução nossa):

$$\Delta PSI = p_0 - p_t \tag{22}$$

### 4.2.5 Caracterização dos materiais

De acordo com a AASHTO (1993, tradução), o módulo de elasticidade é propriedade fundamental para os materiais de um pavimento. Entretanto, por esses materiais estarem submetidos a carregamentos e apresentarem significantes deformações permanentes, essa propriedade pode não refletir o comportamento desses materiais sobre carregamento. Já o módulo de resiliência ($M_R$) é uma propriedade que se refere ao comportamento de tensão-deformação dos materiais submetidos às condições normais de carregamento, sendo usada como principal propriedade na caracterização dos materiais.

O $M_R$ é obtido realizando ensaios nos materiais seguindo o método de ensaio AASHTO T 274 (AASHTO, 1993, tradução nossa).

Os módulos de resiliência de cada camada do pavimento são representados com as diferentes notações:

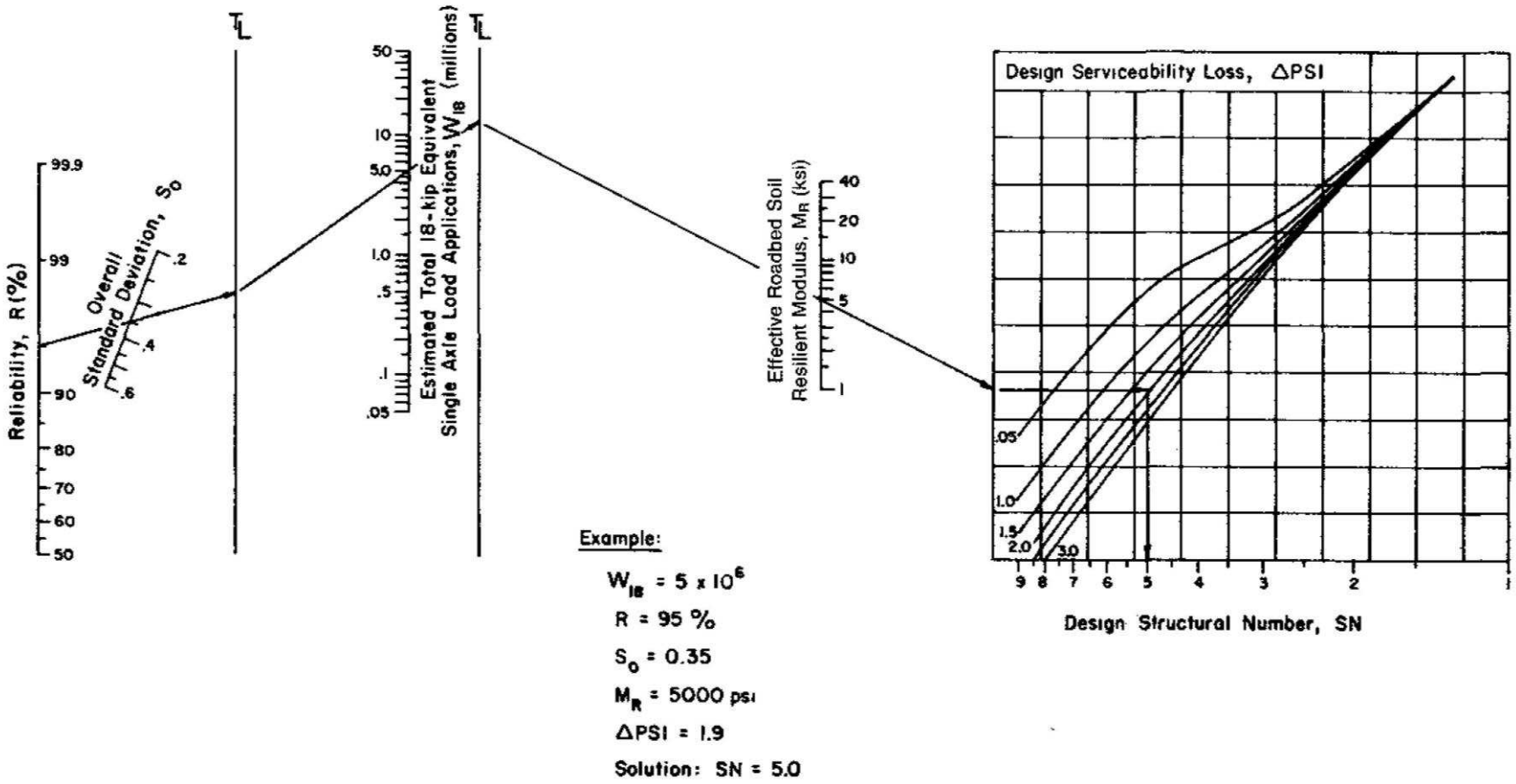
- $M_R$, módulo de resiliência do subleito;
- $E_{SB}$, módulo de resiliência da sub-base;
- $E_{BS}$, módulo de resiliência da base;
- $E_{AC}$, módulo de resiliência do revestimento flexível;

### 4.2.6 Número estrutural

Como já mencionado, o SN é um valor abstrato que representa a capacidade estrutural do pavimento. Tendo em mãos os módulos de resiliência ($M_R$) das camadas, a confiabilidade (R) e seu desvio padrão ($S_0$), o tráfego previsto ($w_{18}$) e a perda de serventia ($\Delta$PSI), o SN é determinado pela equação de desempenho (Expressão 8) ou pelo nomograma apresentado na Figura 31:

$$\log_{10} w_{18} = R \times S_0 + 9{,}36 \times \log_{10}(SN+1) - 0{,}20 + \frac{\log_{10} \frac{p_0 - p_t}{p_0 - 1{,}5}}{0{,}40 + \frac{1094}{(SN+1) \times 5{,}19}} + 2{,}32 \times \log_{10} M_R - 8{,}07 \qquad (8)$$

Figura 31 – Nomograma para dimensionamento de pavimento flexível utilizando-se valores médios




Fonte: Adaptado de AASHTO (1993)

### 4.2.7 Coeficientes de equivalência estrutural das camadas

Os coeficientes das camadas ($a_i$) são valores atribuídos aos materiais empregados nas camadas do pavimento a fim de converter a espessura necessária no número estrutural da camada. Pode-se obter os coeficientes por meio de correlações entre outras propriedades do material como CBR e módulo de resiliência como representado nos ANEXO A a ANEXO D (AASHTO, 1993 tradução nossa).

O Quadro 13 apresenta valores usuais dos coeficientes para determinados tipos de materiais:

Quadro 13 – Valores para coeficiente de equivalência estrutural

| Material | Parâmetro de Controle | Coeficiente ($a_i$) |
|---|---|---|
| Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e Pré-misturado a Quente (PMQ) a 20ºC | $M_R$ = 3160 MPa | 0,44 |
| | $M_R$ = 2110 MPa | 0,37 |
| | $M_R$ = 1406 MPa | 0,30 |
| Bases Granulares | CBR = 100% | 0,14 |
| | CBR = 33% | 0,10 |
| Sub-bases Granulares | CBR = 100% | 0,14 |
| | CBR = 23% | 0,10 |

Fonte: Adaptado de AASHTO (1993 apud BALBO, 2007)

### 4.2.8 Coeficiente de drenagem

Modifica o coeficiente de equivalência estrutural em função da drenagem que os materiais empregados nas camadas granulares do pavimento. O coeficiente de drenagem ($m_i$) é obtido de acordo com a qualidade de drenagem, ou seja, em função do tempo que leva para a água ser removida do pavimento (BALBO, 2007).

O Quadro 14 apresenta a classificação da drenagem em função do tempo e o Quadro 15 traz valores para o coeficiente de drenagem:

Quadro 14 – Classificação da drenagem em função do tempo

| Qualidade da drenagem | Remoção da água em |
|---|---|
| Excelente | 2 horas |
| Boa | 1 dia |
| Regular | 1 semana |
| Pobre | 1 mês |
| Muito pobre | A água não é drenada |

Fonte: AASHTO (1993, tradução nossa)

Quadro 15 – Coeficientes de drenagens

| Qualidade da Drenagem | Porcentagem de tempo que o pavimento estará sujeito a condições de umidade próximas da saturação | | | |
|---|---|---|---|---|
| | < 1% | 1% a 5% | 5% a 25% | > 25% |
| Excelente | 1,40 – 1,35 | 1,35 – 1,30 | 1,30 – 1,20 | 1,20 |
| Bom | 1,35 – 1,25 | 1,25 – 1,15 | 1,15 – 1,00 | 1,00 |
| Regular | 1,25 – 1,15 | 1,15 – 1,05 | 1,00 – 0,80 | 0,80 |
| Pobre | 1,15 – 1,05 | 1,05 – 0,80 | 0,80 – 0,60 | 0,60 |
| Muito pobre | 1,05 – 0,95 | 0,95 – 0,75 | 0,75 – 0,40 | 0,40 |

Fonte: Balbo (2007)

### 4.2.9 Espessura das camadas

A espessura da camada ($D_i$), do revestimento, base ou sub-base, é definida através da relação empírica entre o número estrutural (SN) com o coeficiente da camada ($a_i$) e o coeficiente de drenagem ($m_i$) (Expressão 23) (AASHTO, 1993, tradução nossa):

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 + a_3 \times m_3 \times D_3 \qquad (23)$$

onde:

$a_1$ = coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;
$a_2$ = coeficiente de equivalência estrutural da base;
$a_3$ = coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;
$m_2$ = coeficiente de drenagem da base;
$m_3$ = coeficiente de drenagem da sub-base;
$D_1$ = espessura do revestimento, em polegadas;
$D_2$ = espessura da base, em polegadas;
$D_3$ = espessura da sub-base, em polegadas;

Existem diversas combinações de espessura que servem de solução para a Expressão 23, já que ela não possui uma única solução, é necessário que o projetista analise a viabilidade técnica e econômica da estrutura do pavimento. O Quadro 16 contém as espessuras mínimas para as camadas de acordo com o tráfego representado pelo número de aplicações equivalentes ao eixo-padrão que garantem a viabilidade técnica e econômica (AASHTO, 1993, tradução nossa):

Quadro 16 – Espessuras mímimas para as camadas

| Espessura mínima | | |
|---|---|---|
| Tráfego ($w_{18}$) | Revestimento flexível | Base granular |
| $w_{18} \leq 5 \times 10^4$ | 1,0 pol ou tratamento superficial (TS) | 4,0 pol |
| $5 \times 10^4 < w_{18} \leq 1{,}5 \times 10^5$ | 2,0 pol | 4,0 pol |
| $1{,}5 \times 10^5 < w_{18} \leq 5 \times 10^5$ | 2,5 pol | 4,0 pol |
| $5 \times 10^5 < w_{18} \leq 2 \times 10^6$ | 3,0 pol | 6,0 pol |
| $2 \times 10^6 < w_{18} \leq 7 \times 10^6$ | 3,5 pol | 6,0 pol |
| $w_{18} > 7 \times 10^6$ | 4,0 pol | 6,0 pol |

Fonte: Adaptado de AASHTO (1993)

Pode-se adotar as espessuras mínimas para determinar os números estruturais necessários sobre o subleito ($SN_3$), sobre a sub-base ($SN_2$) e sobre a base ($SN_1$) e então encontrar-se as soluções para as seguintes expressões (AASHTO, 1993, tradução nossa):

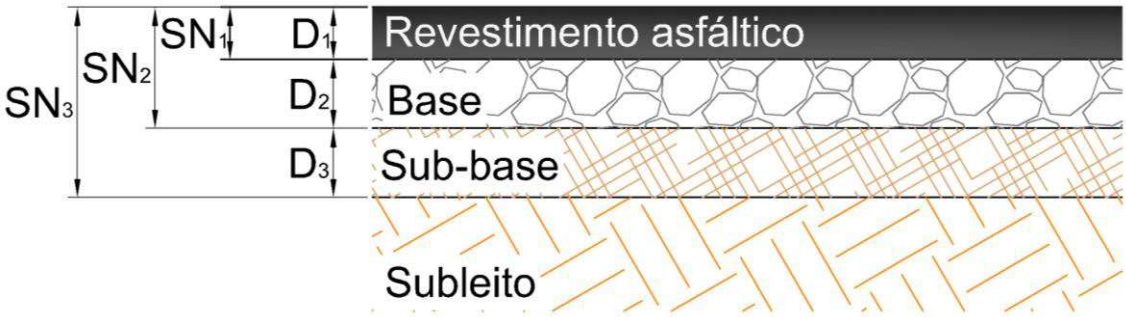
$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \tag{24}$$

$$D_2 \geq \frac{SN_1 - SN_2}{a_2 \times m_2} \tag{25}$$

$$D_3 \geq \frac{SN_3 - SN_2}{a_3 \times m_3} \tag{26}$$

A Figura 32 esquematiza as espessuras do pavimento com os números estruturais:

Figura 32 – Esquema das espessuras do pavimento




Fonte: Adaptado de AASHTO (1993)

## 4.3 Roteiro da utilização do ELSYM5 para análise de dimensionamento

A seguir apresenta-se um roteiro resumido para a aplicação de uma análise mecanicista utilizando o ELSYM5 na versão modificada pela *SRA Technologies, Inc*. Essa versão do programa está disponível para baixar no site: <http://sites.poli.usp.br/ptr/lmp//sofdown.htm>.

### 4.3.1 Execução do programa ELSYM5

Uma vez baixado o ELSYM5, extraia e salve em uma pasta de sua preferência, vamos usar como exemplo a pasta *C:\ELSYM5*, os seguintes arquivos, com seus respectivos formatos:

- ANSI.COM
- ELSYM.BAT
- ELSYM.EXE
- ELSYM.INS

Feito isso, o programa pode ser executado de duas maneiras:

a) Acessando-se a tela do DOS, caso o sistema operacional do Windows seja uma das versões 95/98 ou anteriores;

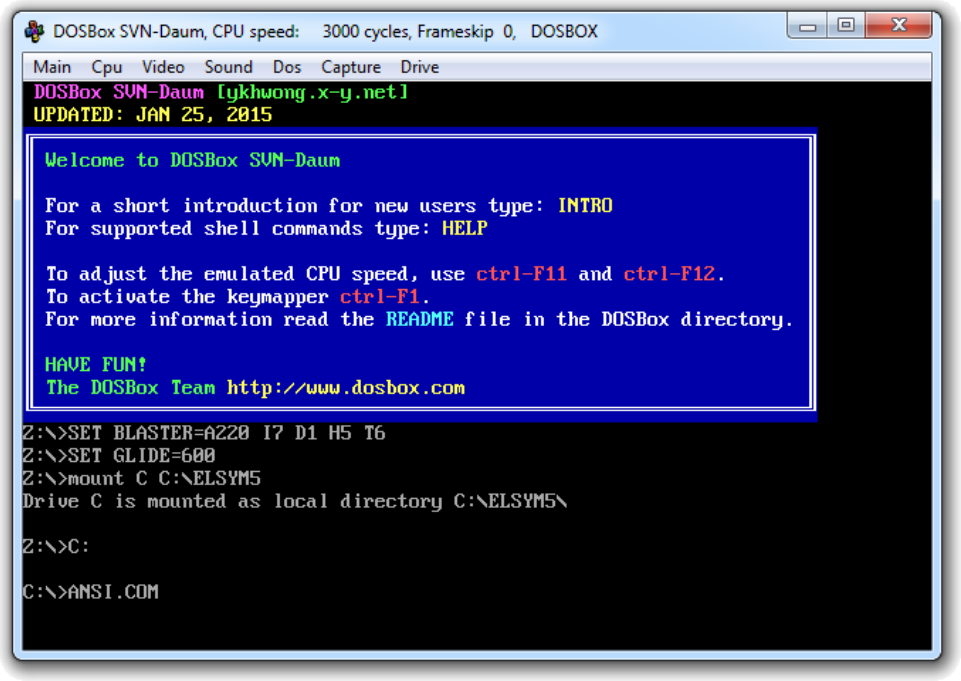
b) Utilizando-se um emulador de DOS, como o DOSBox, que permite instalar ou executar o programa sem problemas de compatibilidade com a versão do Windows. O programa encontra-se disponível para baixar no site <https://www.dosbox.com>.

Para ambas as maneiras deve-se acessar a pasta do ELSYM5 pela tela do DOS ou do emulador e executar o programa com os seguintes comandos:

- Tela do DOS Windows:
  - *CD\ELSYM5* e confirmar com a tecla *<Enter>*
  - *ANSI <Enter>*
- DOSBox:
  - *Z:\mount C C:\ELSYM5 <Enter>*
  - *Z:\>C: <Enter>*
  - *C:\>ANSI.COM <Enter>*

A Figura 33 exemplifica o processo descrito utilizando-se o emulador DOSBox:

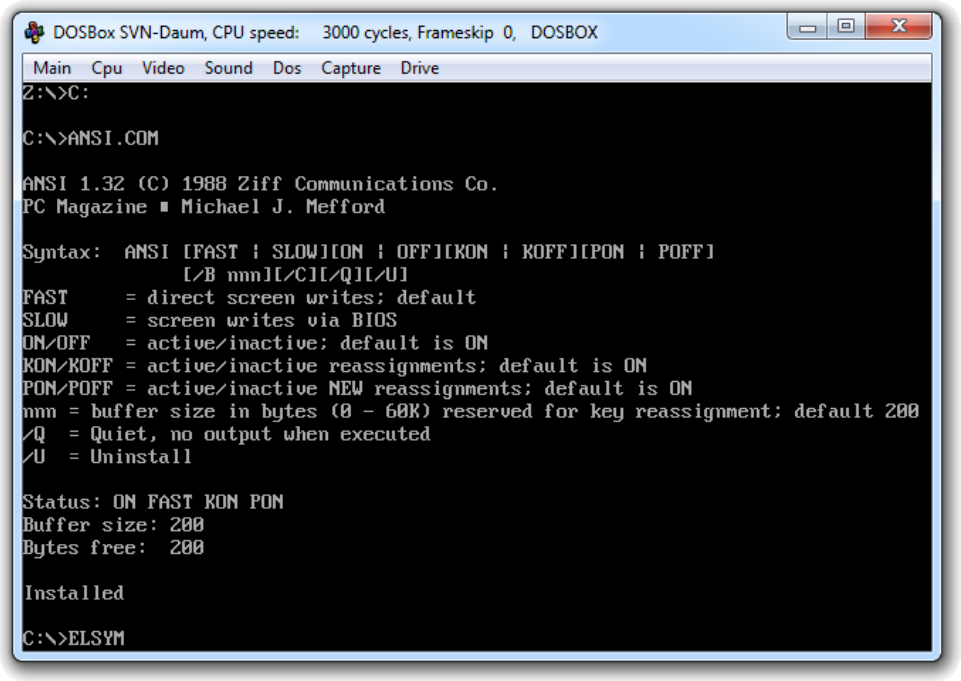
Figura 33 – Tela inicial do DOSBox




Fonte: O autor (2017)

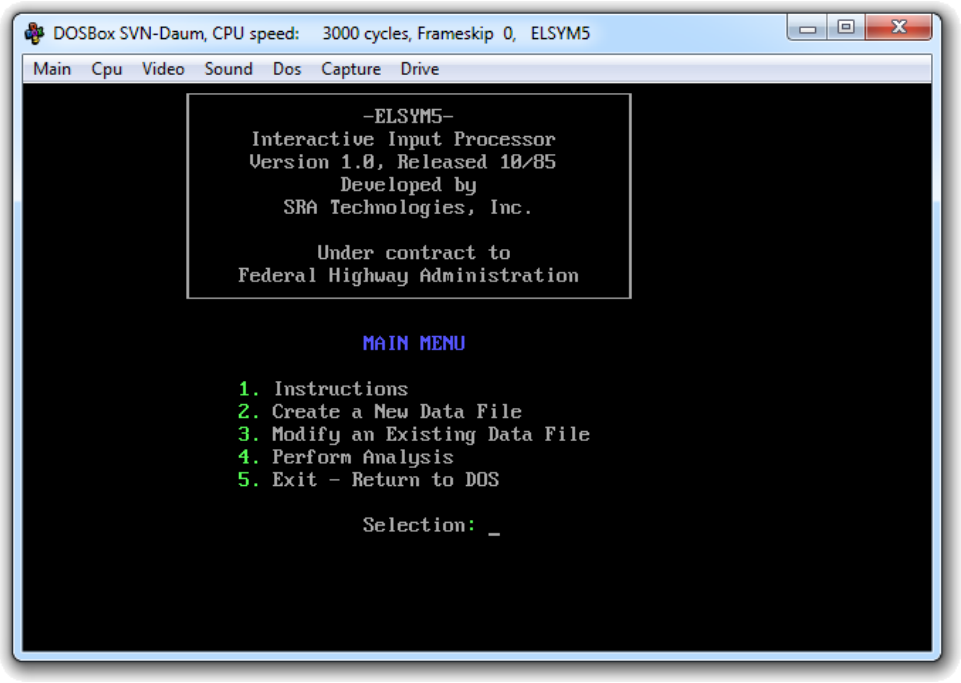
A seguinte tela irá aparecer (Figura 34), depois de confirmado o comando *ANSI*.COM, então se digita o comando *ELSYM* e pressiona-se a tecla <*Enter*> para prosseguir para tela do menu principal do ELSYM5 (Figura 35):

Figura 34 – Tela de instalação do ELSYM5




Fonte: O autor (2017)

Figura 35 – Tela do menu principal do ELSYM5

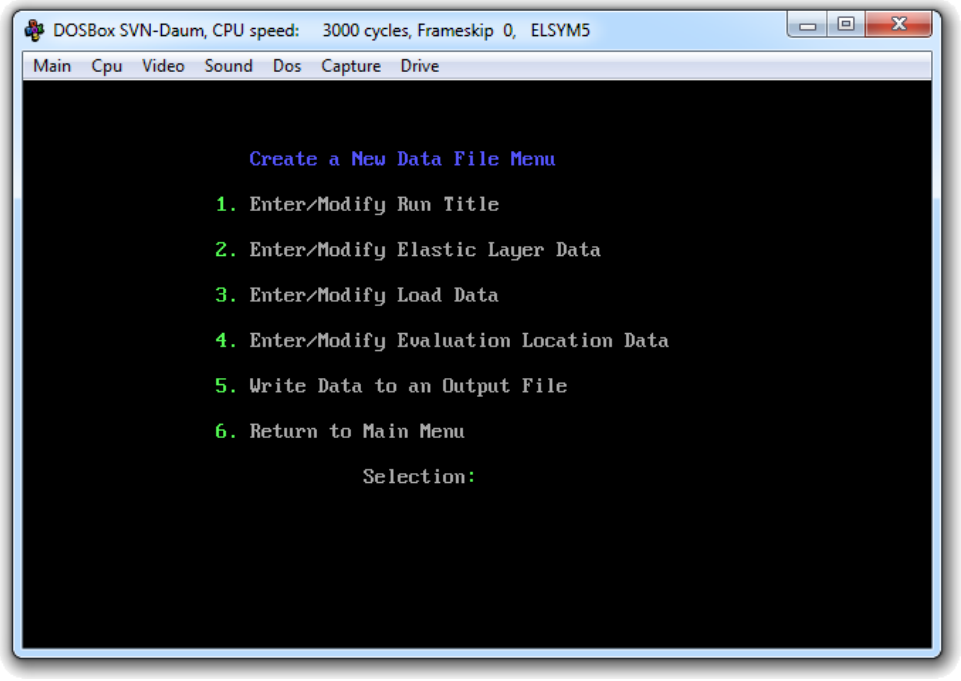



Fonte: O autor (2017)

### 4.3.2 Entrada de dados

Na tela do menu principal, ao digitar 2, seleciona-se a opção <*2. Create a New Data File*> que prosseguirá para o submenu de entrada de dados (Figura 36):

Figura 36 – Submenu de entrada de dados




Fonte: O autor (2017)

Da Figura 36, tem-se as seguinte opções:

- 1. Entrar / Modificar o título da operação;
- 2. Entrar / Modificar dados das camadas elásticas;
- 3. Entrar / Modificar dados do carregamento;
- 4. Entrar / Modificar dados dos pontos de análise;
- 5. Exportar um arquivo com os dados inseridos;
- 6. Retornar ao menu principal.

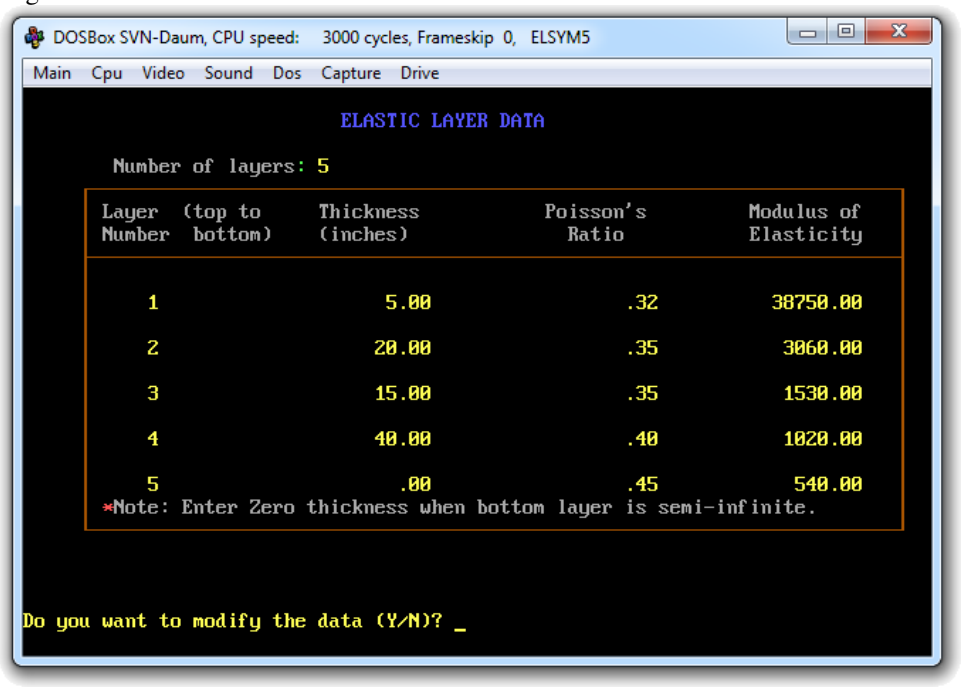
#### 4.3.2.1 Título da operação

A primeira opção do submenu de entrada de dados permite inserir ou modificar um nome para identificar a operação que será realizada.

#### 4.3.2.2 Dados das camadas elásticas

A segunda opção do submenu de entrada de dados leva a uma tela de entrada de dados onde se insere ou modifica os dados relacionados às camadas do pavimento, sendo eles o número de camadas, as espessuras das camadas em polegadas, o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade, como mostra a Figura 37:

Figura 37 – Tela de dados das camadas




Fonte: O autor (2017)

O programa considera 0,0 de espessura como sendo uma camada semi-infinita, ou seja, como o subleito na TSCE.

Para os coeficientes de Poisson adota-se um valor dentro das faixas, fornecidas no Quadro 17, para cada tipo de material.

Quadro 17 – Valores típicos de coeficientes de Poisson

| Material | Faixa de variação |
|---|---|
| Concretos asfálticos | 0,32 – 0,38 |
| Concreto de cimento Portland | 0,15 – 0,20 |
| BGS, Macadame Hidráulico, Bica corrida | 0,35 – 0,40 |
| Concreto compactado com rolo, BGTC | 0,15 – 0,20 |
| Solo-cimento, Solo melhorado com cimento | 0,20 – 0,30 |
| Solo cal | 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)

Para os módulos de elasticidade adota-se a definição de módulo de resiliência e utiliza-se a estimativa sugerida pela Prefeitura do Município de São Paulo (Quadro 18) para estimar os valores de acordo com o material.

Quadro 18 – Estimativa de módulo de resiliência para diversos materiais

| Camada | Material | Valores sugeridos para estudos e projetos (MPa) |
|---|---|---|
| Subleitos | Laterítico | $M_R = 22 \times CBR^{0,8}$ |
| | Não laterítico | $M_R = 18 \times CBR^{0,64}$ |
| | Arenoso pouco ou não coesivo | $M_R = 14 \times CBR^{0,7}$ |
| Reforço | Laterítico | $M_R = 22 \times CBR^{0,8}$ |
| | Não laterítico | $M_R = 18 \times (CBR_{Ref})^{0,64} \times \sqrt[3]{\frac{3 \times CBR_{Sl}}{CBR_{Ref}}}$ |
| Sub-bases | Granular | $M_R = 18 \times (CBR_{Ref})^{0,64} \times \sqrt[3]{\frac{3 \times CBR_{Sl}}{CBR_{Ref}}}$ |
| Base | Granular | $100 \leq M_R \leq 500$ |
| | Asfáltica | $800 \leq M_R \leq 1000$ |
| | Cimentada – BGTC | $5000 \leq M_R \leq 15000$ |
| Revestimentos asfálticos | Concreto asfáltico | $3000 \leq M_R \leq 5000$ |
| | PMQ | $2000 \leq M_R \leq 2500$ |
| | *Binder* | $1400 \leq M_R \leq 1800$ |
| | PMF ou macadame betuminoso selado | $1000 \leq M_R \leq 1400$ |

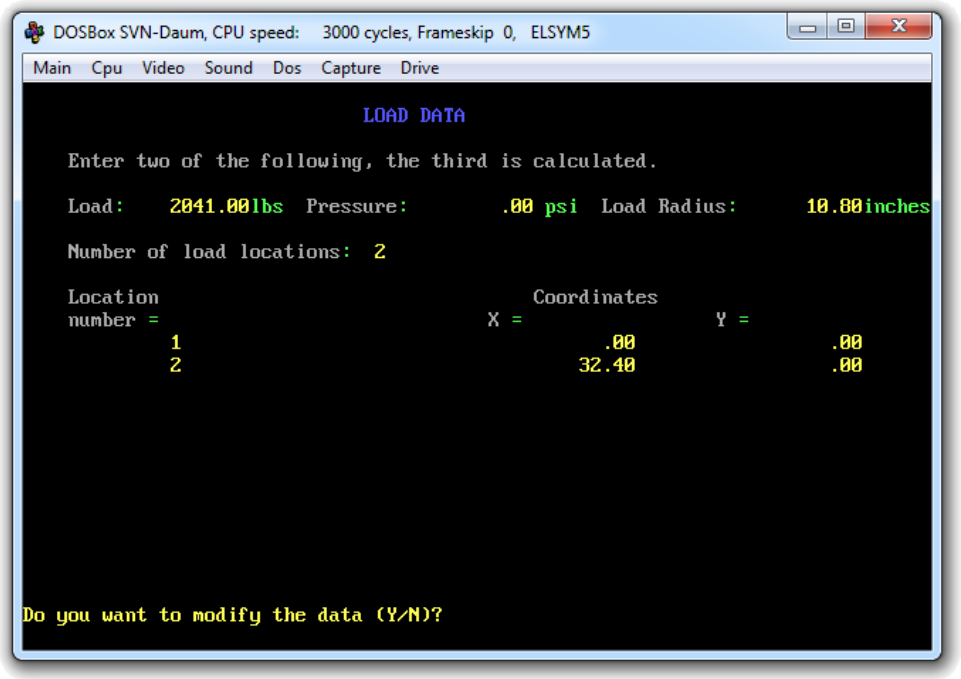
Fonte: PMSP (2004 apud BALBO, 2007)

Ao término do preenchimento dos dados e a confirmação de que eles estão corretos a o programa retornará para o submenu de entradas de dados.

4.3.2.3 Dados do carregamento

A terceira opção do submenu de entrada de dados prossegue para uma tela onde se pede para inserir ou modificar o valor da carga da roda, a pressão da carga e o raio da área de contato. O programa só precisa ser informado de dois desses dados, caso um deles fique em branco, ele será preenchido pelo programa. Nessa mesma tela informa-se a quantidade de cargas idênticas atuantes e suas respectivas posições no sistema de coordenadas XYZ em polegadas (Figura 38).

Figura 38 – Tela de dados do carregamento




Fonte: O autor (2017)

Para os dados de carregamento deste roteiro será considerado o tráfego equivalente ao eixo-padrão. Sendo assim, o número de carregamentos será dois, devido ao eixo-padrão ser um eixo de simples de duas rodas em cada lado e suas as configurações, serão (MARQUES, 2014):

- Carga por eixo: 18000 lbf ou 8165 Kgf;
- Carga por roda: 4500 lbf ou 2041 Kgf;
- Pressão de contato Pneu-Pavimento: 80lbs/pol2 ou 5,6 Kgf/cm2;

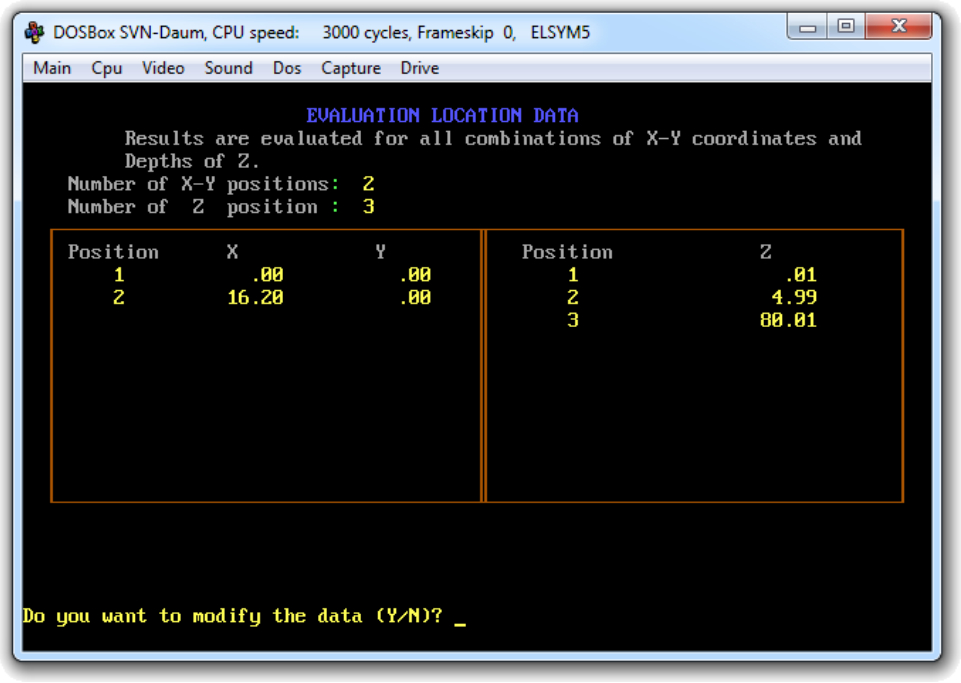
- Raio da área de contato: 4,25 pol ou 10,8 cm;
- Afastamento entre rodas: 12,75 pol ou 32,4 cm.

Ao fim da entrada de dados o programa retornará para a tela do submenu de entrada de dados.

#### 4.3.2.4 Dados dos pontos de análise

A quarta opção do submenu de entrada de dados prossegue para uma tela onde o usuário informar a quantidade e as coordenadas das posições dos pontos de análise na estrutura do pavimento (Figura 39).

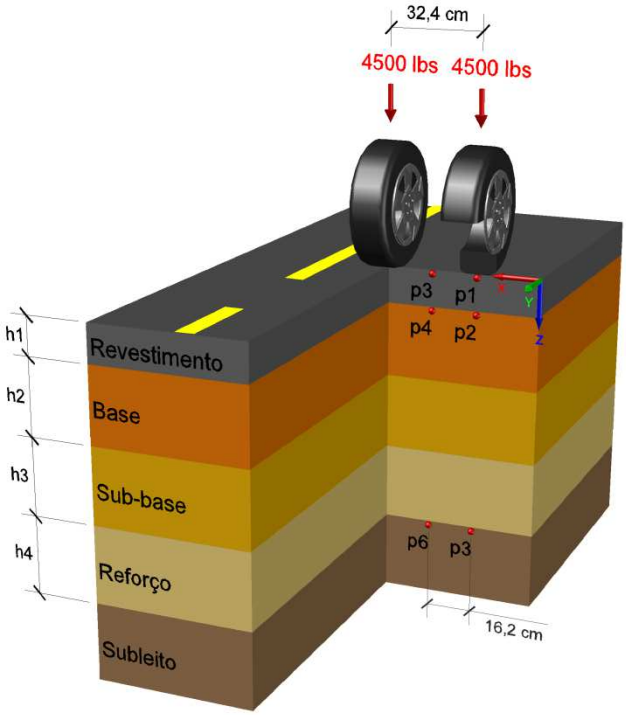
Figura 39 – Tela dos dados dos pontos de análise




Fonte: O autor (2017)

Neste roteiro utilizam-se duas coordenadas no plano XY em três profundidades Z (Figura 40). Os pontos p1, p2 e p3 estão localizados abaixo de uma das rodas e os pontos p4, p5 e p6 encontram-se no centro da distância entre as duas rodas, sendo p1 e p4 na superfície do revestimento, p2 e p5 no final da espessura da camada de revestimento e p3 e p6 no topo do subleito. A escolha desses pontos de análise tem como base as correlações entre as tensões-deformações e o tráfego.

Figura 40 – Pontos de análise na estrutura do pavimento



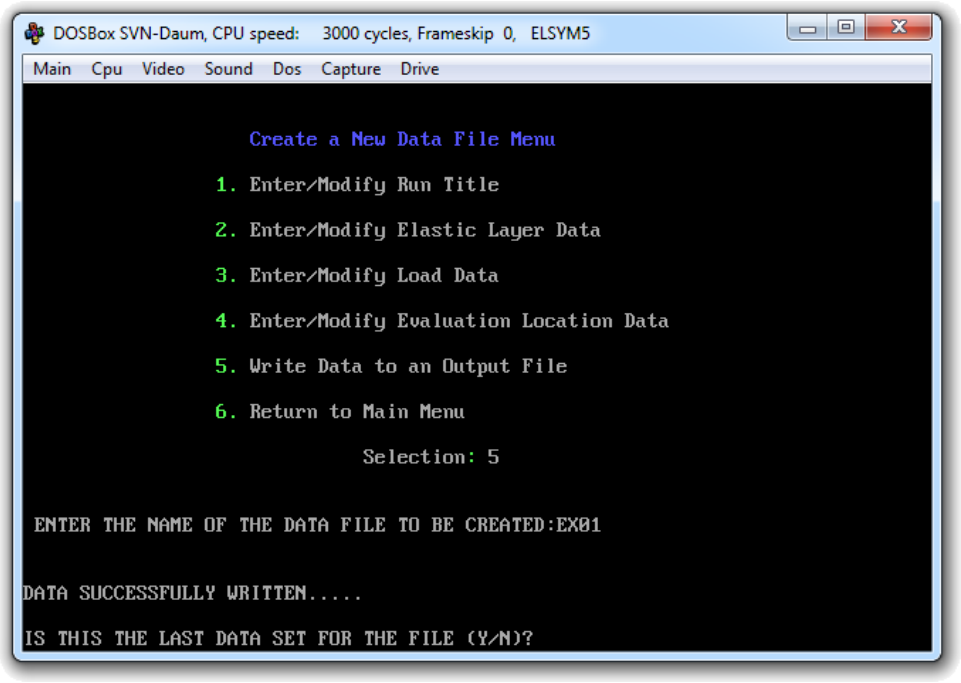

Fonte: O autor (2017)

Inseridas os dados dos pontos de análise o programa retornará para a tela do submenu de entrada de dados.

4.3.2.5 Exportar um arquivo com dados

A quinta opção do submenu de entrada de dados possibilita ao usuário exportar um arquivo com os dados de entrada das etapas anteriores. Quando selecionada essa opção, na mesma tela do submenu de entrada de dados, no final da tela, aparecerá uma solicitação para inserir o nome do arquivo e então se pressiona a tecla <*Enter*> e, logo após, pressiona-se as teclas <*Ctrl*> + <*Enter*> para confirmar a seleção do nome do arquivo e ele ser salvo (Figura 41).

Figura 41 – Tela da opção de exportar arquivo




Fonte: O autor (2017)

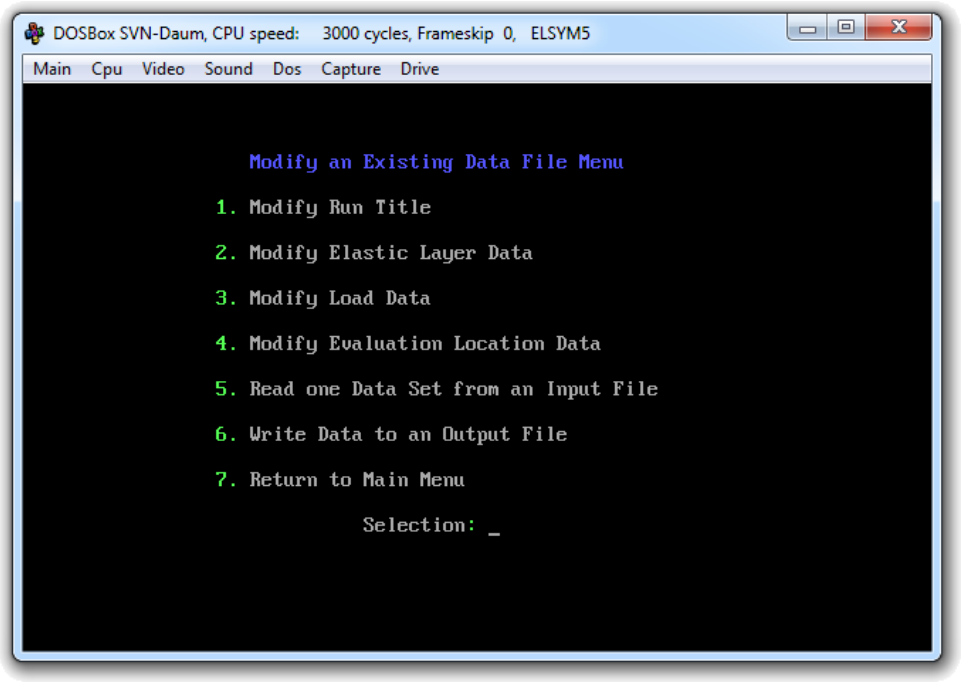
Após a operação de exportação do arquivo o programa irá perguntar se haverá mais arquivos a serem exportados. Caso necessário, digita-se a letra Y e a operação irá se repetir, caso não haja mais arquivos a serem exportados, digita-se a letra N e o programa retornará para a tela do submenu de entrada de dados.

Os arquivos exportados podem ser abertos e editados por meio de um editor de texto, o que possibilita ao usuário fazer modificações nos dados de entrada. O APÊNDICE A traz um exemplo de arquivo de dados de entrada.

### 4.3.3 Alteração dos dados de entrada

Na tela do menu principal, a terceira opção <*3. Modify na Existing Data File*> leva a uma tela com um submenu de alteração de dados (Figura 42). Nessa tela as opções de 1 a 4 são as mesmas do submenu de entrada de dados que possibilita alteração dos dados já informados.

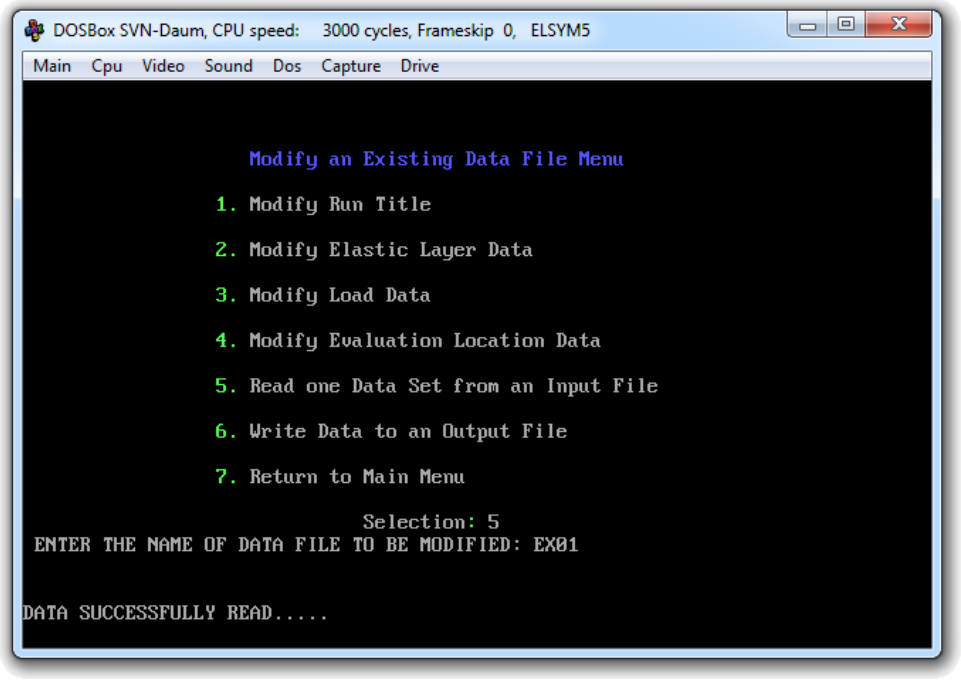
Figura 42 – Tela do submenu de alteração dos dados de entrada




Fonte: O autor (2017)

A quinta opção dessa tela possibilita a importação de um arquivo de dados de entrada para ser modificado utilizando as opções anteriores ou para ser realizada a análise. Ao digitar 5 e selecionar essa opção, insere-se o nome do arquivo e pressiona-se a tecla <*Enter*> e em seguida pressionam-se as teclas <*Ctrl*> + <*Enter*> para confirmar (Figura 43).

Figura 43 – Tela da opção de importação de arquvio



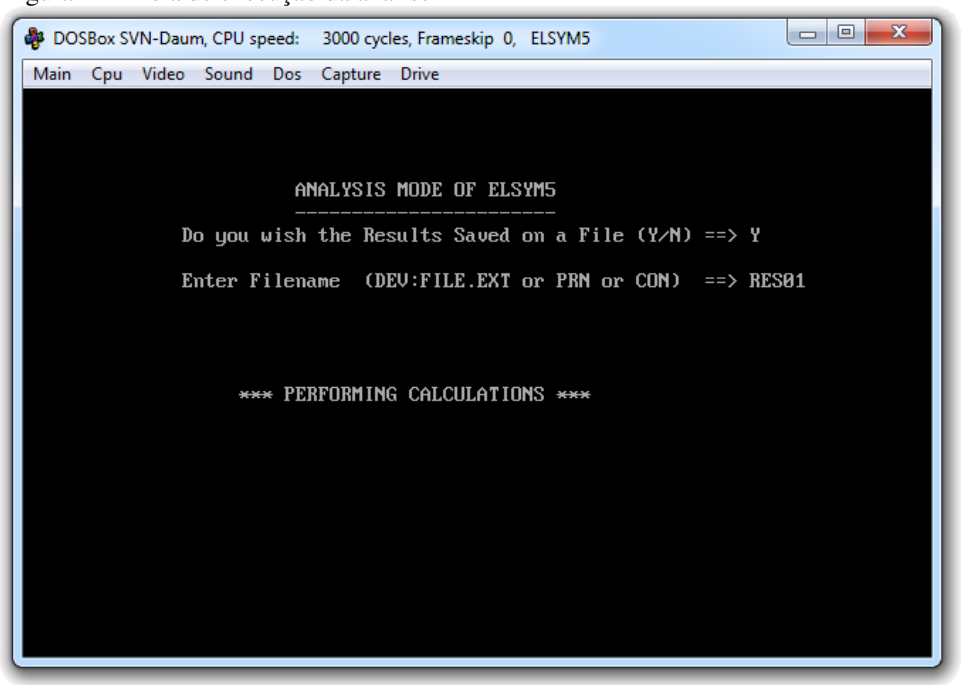

Fonte: O autor (2017)

A sexta opção funciona da mesma forma que a quinta opção do submenu de entrada de dados, onde é possível exportar um arquivo, e a sétima opção retornará para a tela do menu principal.

### 4.3.4 Executar análise

A quarta opção <*4. Perform Analysis*> da tela do menu principal, quando selecionada, irá processar os dados inseridos nos passos anteriores ou, caso nenhuma dado tenha sido inserido, o programa irá solicitar o nome do arquivo de dados a ser importado para análise. A tela de execução de análise irá perguntar se o usuário deseja salvar os resultados da análise em um arquivo de dado, para salvar será necessário digitar a letra Y e logo após digita-se o nome do arquivo de saída e então aperta-se a tecla <*Enter*> seguida de <*Ctrl*> + <*Enter*> para confirmação (Figura 44).

Figura 44 – Tela de execução da análise

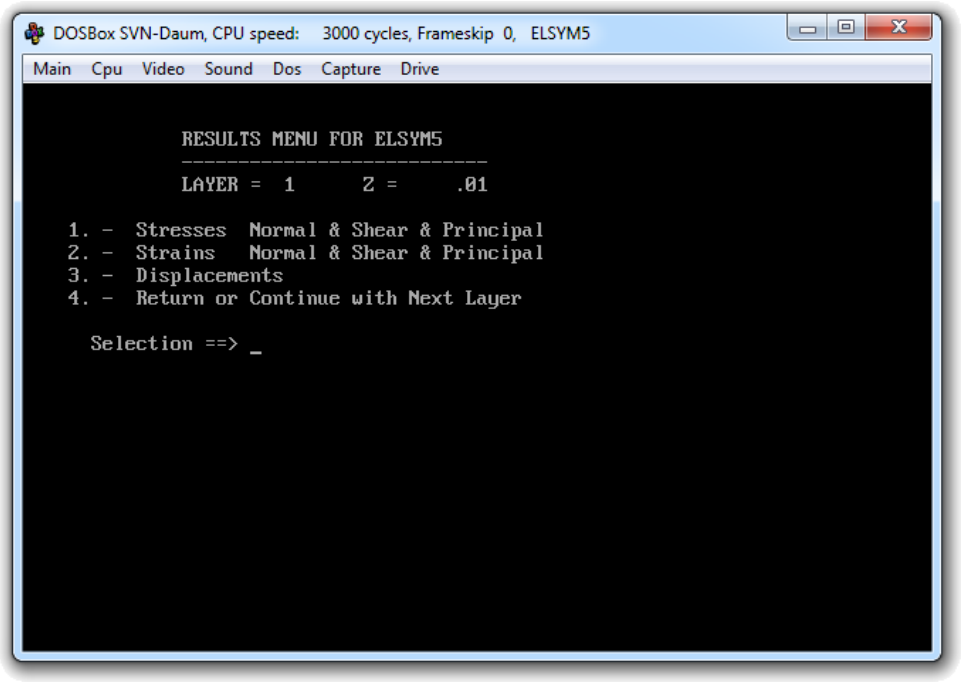



Fonte: O autor (2017)

Finalizada a análise, o ELSYM5 irá exibir a tela de resultados por ordem das camadas, de cima para baixo, seguindo as coordenadas dos pontos de análise escolhidos (Figura 45). A tela de resultados terá quatro opções onde a primeira exibe o resultado das tensões, a segunda das deformações, a terceira dos deslocamentos e a quarta exibe a tela de

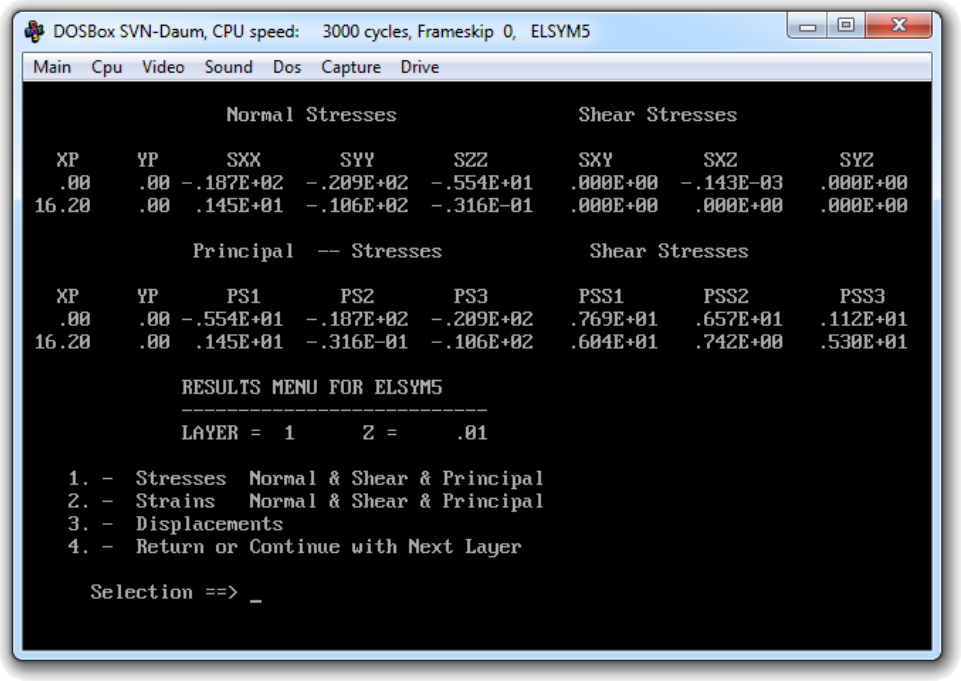
resultados do próximo ponto analisado ou, caso seja o último ou o único, retornará para o menu principal (Figura 46).

Figura 45 – Tela dos resultados da análise




Fonte: O autor (2017)

Figura 46 – Resultado das tensões na superfície do revestimento




Fonte: O autor (2017)

O APÊNDICE B possui um exemplo de arquivo de dados de saída exportados pelo ELSYM5.

## 4.4 Roteiro de dimensionamento utilizando o programa SisPav

As versões atualizadas do SisPav, disponibilizadas no site <https://sites.google.com/site/sispav/home> estão indisponíveis até que seja lançada a versão oficial, a qual deverá ocorrer no ano de 2018 (informação verbal). [1]

A seguir apresenta-se um roteiro resumido utilizando-se o SisPav versão 1.0, lançada em 10 de setembro de 2007. A instalação dessa versão vem acompanhada dos seus demais componentes como o programa de elementos finitos (EFin3D), o programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) e o programa de Retroanálise. Entretanto o foco deste roteiro será na utilização apenas do SisPav.

### 4.4.1 Execução do SisPav

O primeiro passo é instalar o programa executando-se o arquivo *Instalar_SisPav_2007.exe*, o qual irá instalar o SisPav e seus outros componentes. Após a instalação o SisPav estará pronto para ser executado. (FRANCO, 2007).

A interface do programa é simples e, em grande parte, pode ser acessada tanto pelo mouse como por teclas de atalhos. Ela possui cinco abas principais, responsáveis pela entrada, modificação e saída de dados, sendo elas: <*Estrutura*>, <*Tráfego*>, <*Clima*>, <*Modelos*> e <*Resultados*> (Figura 47).

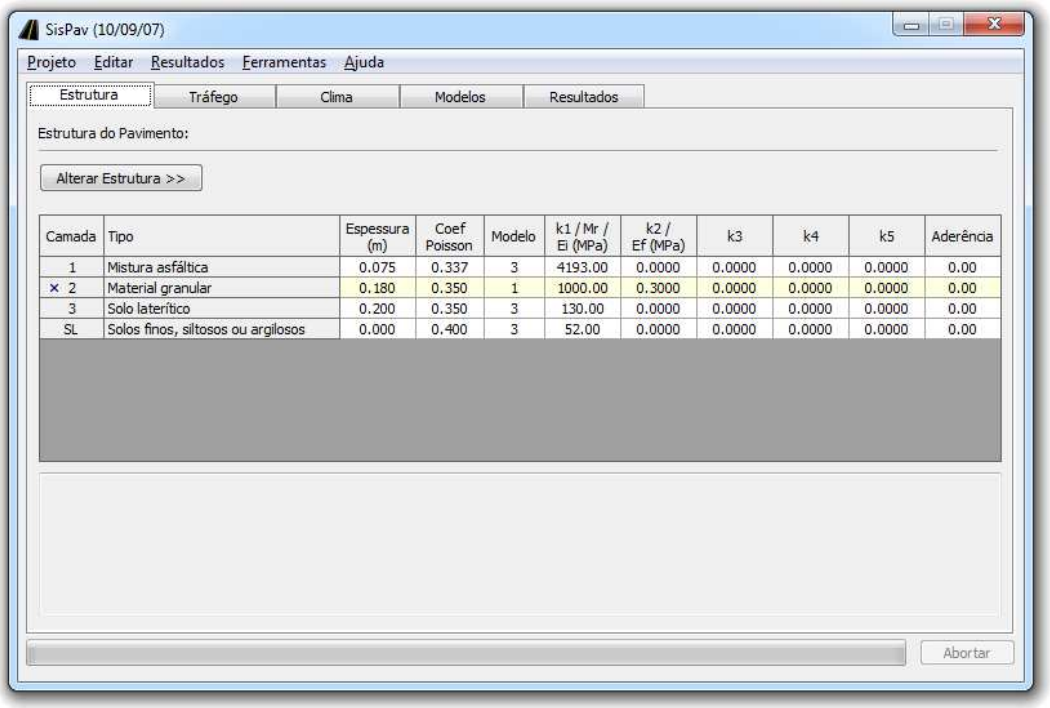
Há também o menu principal, que se divide nas seguintes abas: <*Projeto*>, <*Editar*>, <Resutlados>, <*Ferramentas*> e <*Ajuda*> (Figura 47).

A aba <*Projeto*>, no menu principal, apresenta as seguintes opções:

- *Novo*: cria um projeto novo com os dados iniciais de exemplo do programa. Tecla de atalho: <*Ctrl*> + <*N*>;
- *Abrir*: abre um arquivo de projeto (extensão *.pvt*) salvo no disco. Tecla de atalho: <*Ctrl*> + <*A*>;
- *Salvar*: salva os dados do projeto em um arquivo (de extensão .pvt) no disco. Tecla de atalho: <Ctrl> + <B>;
- *Salvar como*: salva os dados do projeto em um arquivo (de extensão .pvt), com nome diferente, no disco;
- *Sair*: finaliza o programa. Tecla de atalho: <*Alt*> + <*F4*>.

[1] Informação fornecida pela Prof. Dra. Laura Motta da UFRJ/COPPE na palestra Dimensionamento Mecanístico de Pavimentos no III Simpósio Maranhense de Engenharia Civil – IFMA em maio de 2017.

Figura 47 – Interface do SisPav 1.0




Fonte: O autor (2017)

No menu principal, pela aba <*Editar*>, é possível navegar pelas abas principais de <*Estrutura*>, <*Tráfego*>, <*Clima*>, <*Modelos*> e <*Resultados*>.

Pela aba <*Resultados*>, do menu principal, é possível acessar as seguintes opções:

- *Dimensionar*: realiza o dimensionamento para a camada selecionada. Tecla de atalho: <*F2*>;
- *Vida de Projeto*: realiza a análise para todo o pavimento. Tecla de atalho: <F3>;
- *Relatórios*: gera e salva um relatório com os dados do dimensionamento ou da análise realizada em um arquivo (de extensão *.doc*) no disco. Tecla de atalho: <Ctrl> + <R>;
- *Gráfico e Planilhas*: navega para a aba principal <Resultados> onde se terá acesso aos gráficos e planilhas gerados pelo dimensionamento e análise. Tecla de atalho: <*Ctrl*> + <*G*>.

A aba <*Ferramentas*>, do menu principal, permite o acesso aos demais componentes, sendo eles os programas EFin3D, AEMC e Retroanálise. Nessa mesma aba, também se pode acessar o item <*Opções*> onde é possível alterar as configurações das opções do SisPav.

Pela aba <*Ajuda*>, do menu principal, é possível acessar o Manual de utilização do SisPav pela opção <*Conteúdo*> ou pela tecla de atalho <*F1*>, também é possível obter

informações resumidas do programa selecionando a opção <*Sobre*> ou pela tecla de atalho <*Alt*> + <*F1*>.

### 4.4.2 Estrutura do pavimento

A tela inicial do SisPav mostra a interface da aba <*Estrutura*>, a qual traz como padrão dados de uma estrutura inicial com quatro camadas (Figura 47). O programa permite que seja alterado tanto os dados, como a quantidade de camadas da estrutura, sendo o limite mínimo três camadas e o máximo oito camadas.

A tabela exibida na interface da aba <*Estrutura*> separa as camadas e as enumera, de cima para baixo, de forma crescente começando do número 1, sendo a última camada o subleito, representado pela sigla SL (Figura 48). A tabela também apresenta, de forma resumida, os dados de cada camada, como o material, a espessura, o módulo, o coeficiente de Poisson, condição de aderência e o modelo utilizado para a análise da camada com seus coeficientes.

Figura 48 – Detalhe da tabela exibida na interface da aba Estrutura

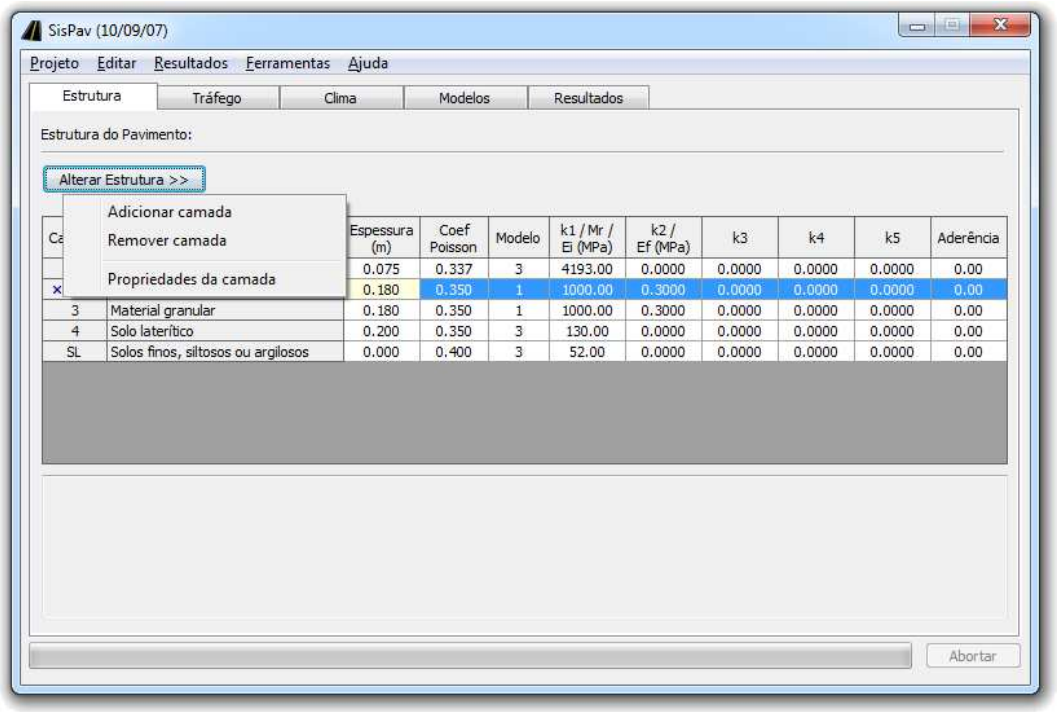
| Camada | Tipo | Espessura (m) | Coef Poisson | Modelo | k1 / Mr / Ei (MPa) | k2 / Ef (MPa) | k3 | k4 | k5 | Aderência |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Mistura asfáltica | 0.075 | 0.337 | 3 | 4193.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 |
| × 2 | Material granular | 0.180 | 0.350 | 1 | 1000.00 | 0.3000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 |
| 3 | Solo laterítico | 0.200 | 0.350 | 3 | 130.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 |
| SL | Solos finos, siltosos ou argilosos | 0.000 | 0.400 | 3 | 52.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 |

Fonte: O autor (2017)

Para alterar a estrutura padrão que já vem no programa, pode-se selecionar com o mouse uma camada, clicando-se no seu número ou sigla, de forma que todas as células da linha da camada fiquem destacadas e então clica-se no botão <*Alterar Estrutura*> onde terá as seguintes opções (Figura 49):

- *Adicionar camada*: adiciona uma nova camada abaixo da camada selecionada e com dados idênticos;
- *Remover camada*: remove a camada selecionada;
- *Propriedades da camada*: abre uma interface onde é possível alterar todas as propriedades e parâmetros da camada selecionada.

Figura 49 – Detalhe das opções do botão Alterar Estrutura



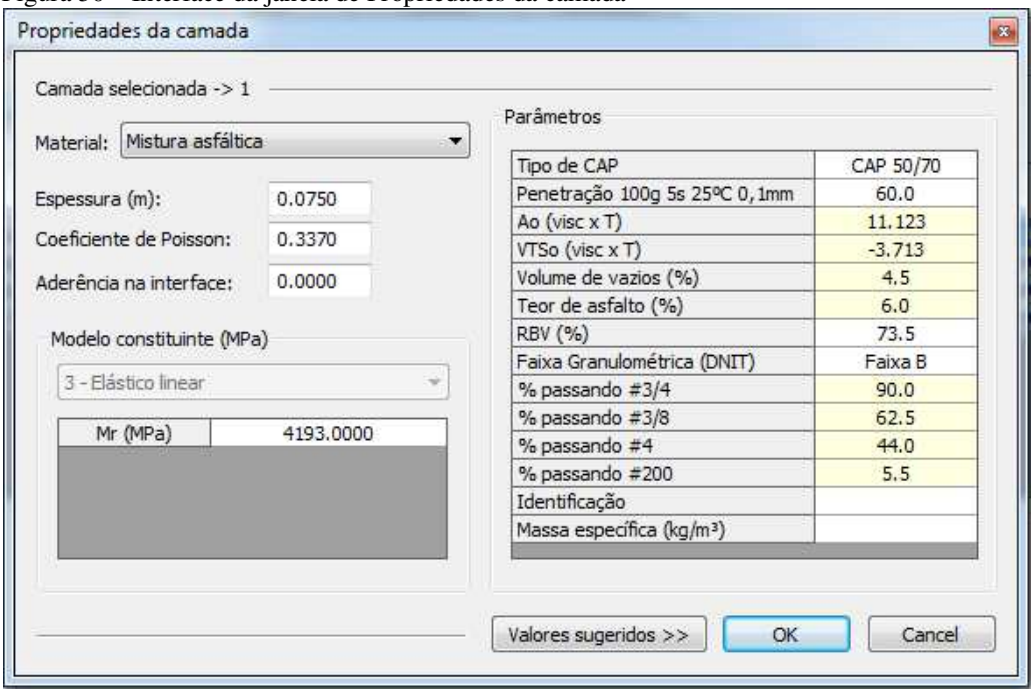

Fonte: O autor (2017)

Ao adicionar uma camada nova ou quando necessária inserção ou alteração dos dados de alguma camada deve-se selecionar a camada em questão e acessar a interface de <*Propriedades da camada*> (Figura 50), onde é permitido alterar propriedades da camada, como o tipo do material que a constitui, a sua espessura, o coeficiente de Poisson, o modelo constitutivo do comportamento resiliente e parâmetros relativos ao tipo de material selecionado. Alguns desses parâmetros são indispensáveis para a execução do programa e já vêm preenchidos automaticamente com valores sugeridos e possuem suas células coloridas enquanto os parâmetros opcionais não são preenchidos e ficam a critério do usuário.

Ainda na interface de <*Propriedades da camada*> o programa sugere alguns valores para os parâmetros, de determinados tipos de materiais, através do botão <*Valores sugeridos*>, onde também é possível estimar o módulo de resiliência do material escolhido ao selecionar a opção <*Estimativa de MR*>.

É possível fazer alterações rápidas de algumas das propriedades e parâmetros das camadas pela tabela, exibida na Figura 48, ao dar dois cliques com o botão esquerdo do mouse na célula com o dado a ser alterado.

Figura 50 – Interface da janela de Propriedades da camada




Fonte: O autor (2017)

### 4.4.3 Tráfego

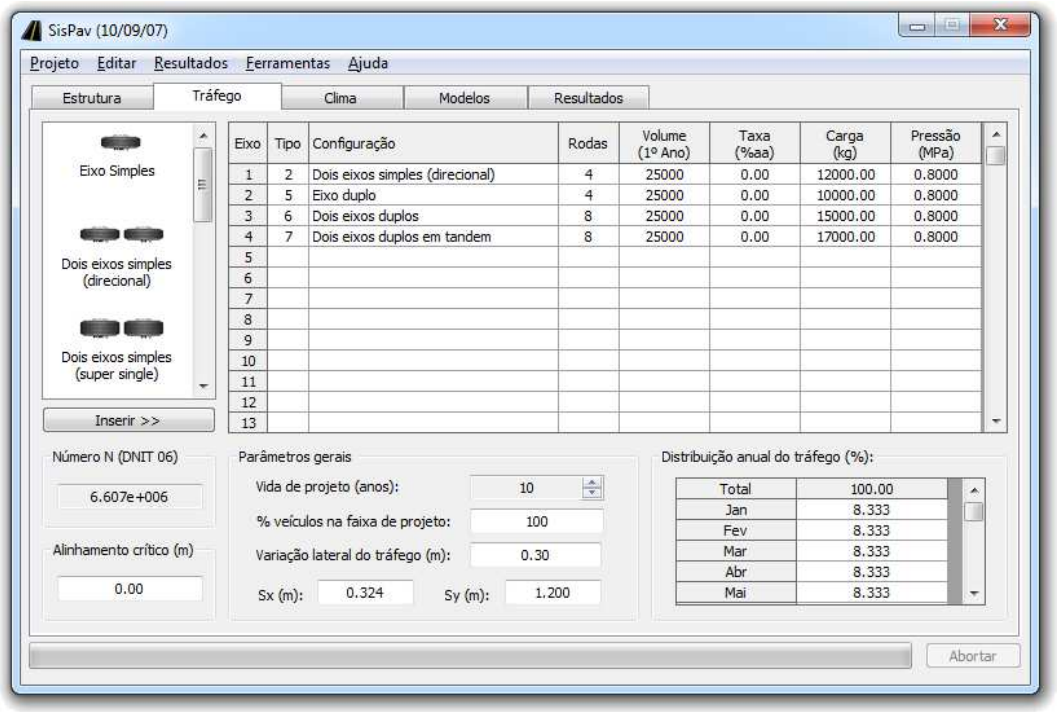
A versão 1.0 do SisPav avalia cada configuração de eixo que for de forma isolada para calcular o número equivalente de repetições do eixo padrão conforme o DNIT.

Pela aba <*Tráfego*>, segunda aba principal da interface do SisPav (Figura 51), o usuário deve inserir os dados de cada eixo previsto para o tráfego de projeto. A interface irá exibir, do lado esquerdo, as configurações de eixos permitidos pelo programa. Para compor a tabela de tráfego é necessário selecionar os tipos de eixos a serem inseridos e apertar o botão <*Inserir*> ou dar dois cliques com o mouse no eixo escolhido. O SisPav permite a inserção de até 50 configurações de eixo e repetir a inserção do mesmo tipo com dados variados.

Os dados de volume, a taxa de crescimento, a carga e a pressão de cada configuração de eixo podem ser alterados na tabela ao clicar duas vezes sobre a célula do dado desejado. Para remover um eixo já inserido é necessário selecionar a linha do eixo e pressionar a tecla <*Del*> no teclado. É importante destacar que não deve haver linhas em branco entre eixos inseridos.

O número equivalente de repetições de carga do eixo padrão (N), informado pelo programa, é atualizado a cada nova informação de configuração de eixo inserido. Todavia, o valor de N informado pelo programa não é utilizado no cálculo, é apenas para que o usuário realize alguma comparação.

Figura 51 – Interface da aba principal Tráfego




Fonte: O autor (2017)

Os dados exibidos, na parte inferior da interface de <*Tráfego*> (Figura 51), são parâmetros que valem para todas as configurações de eixos. O usuário pode alterar as medidas das dimensões entre eixos (Sy), entre rodas (Sx) e a variação lateral do tráfego, as quais já vêm fixadas pelo programa. Também é permitido a alteração da vida de projeto, em anos, para qual o SisPav realizará o dimensionamento e o percentual de veículos na faixa de projeto, quando for o caso de mais de uma faixa.

Nessa mesma interface, pode-se determinar o alinhamento crítico para o dimensionamento, o qual se refere à distância do ponto de análise, no plano horizontal, para o eixo de carregamento. Geralmente, os alinhamentos críticos são a origem ou metade da distância entre rodas (Sx) (FRANCO, 2007).

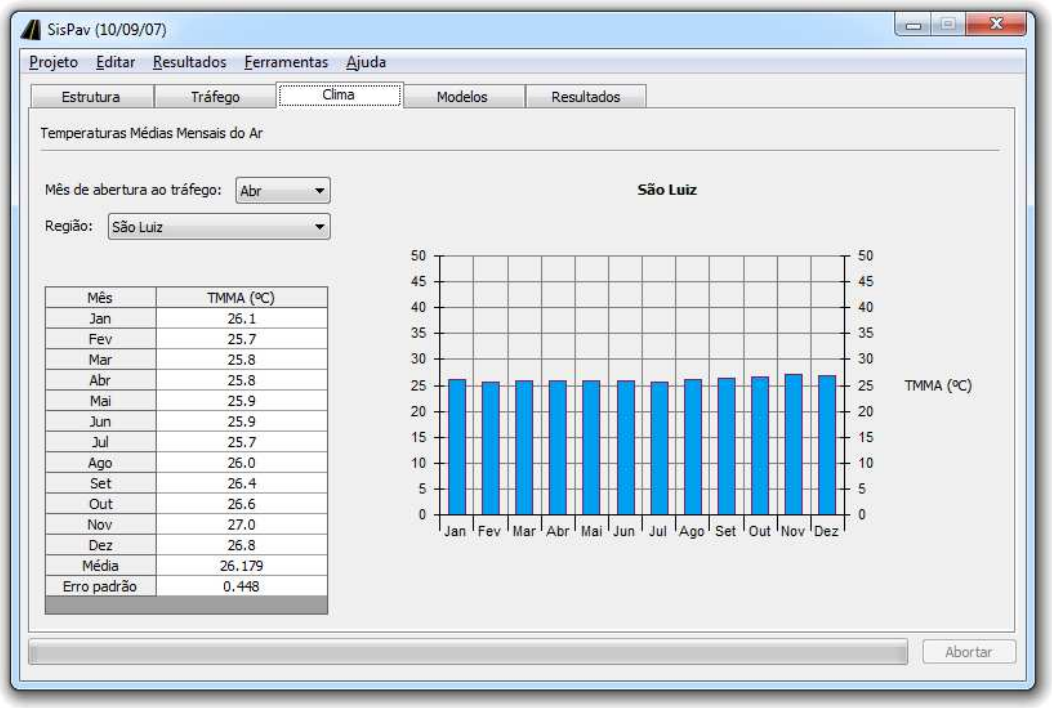
Ainda na interface de <*Tráfego*>, é possível inserir dados sobre a variação anual do tráfego, onde pode-se alterar as porcentagens para cada mês do ano. Por padrão, o programa considera o percentual igual para cada mês.

### 4.4.4 Clima

A interface da aba principal <*Clima*>, apresentada na Figura 52, permite a escolha do local do pavimento existente ou a ser construído. Ao selecionar o local, serão exibidas as temperaturas médias do ar em cada mês do ano. Em caso do programa não possuir

informações sobre o local do projeto, pode-se incluir valores manualmente ao selecionar a opção *Outros* na lista de <*Região*> e informar, na tabela, as temperaturas para cada mês, sendo as duas últimas células, a *Média* e o *Erro padrão*, são calculadas automaticamente pelo programa. Também é importante informar o mês de abertura do tráfego, para sinalizar ao SisPav em qual mês vai ser considerado para iniciar a análise.

Figura 52 – Interface da aba principal Clima




Fonte: O autor (2017)

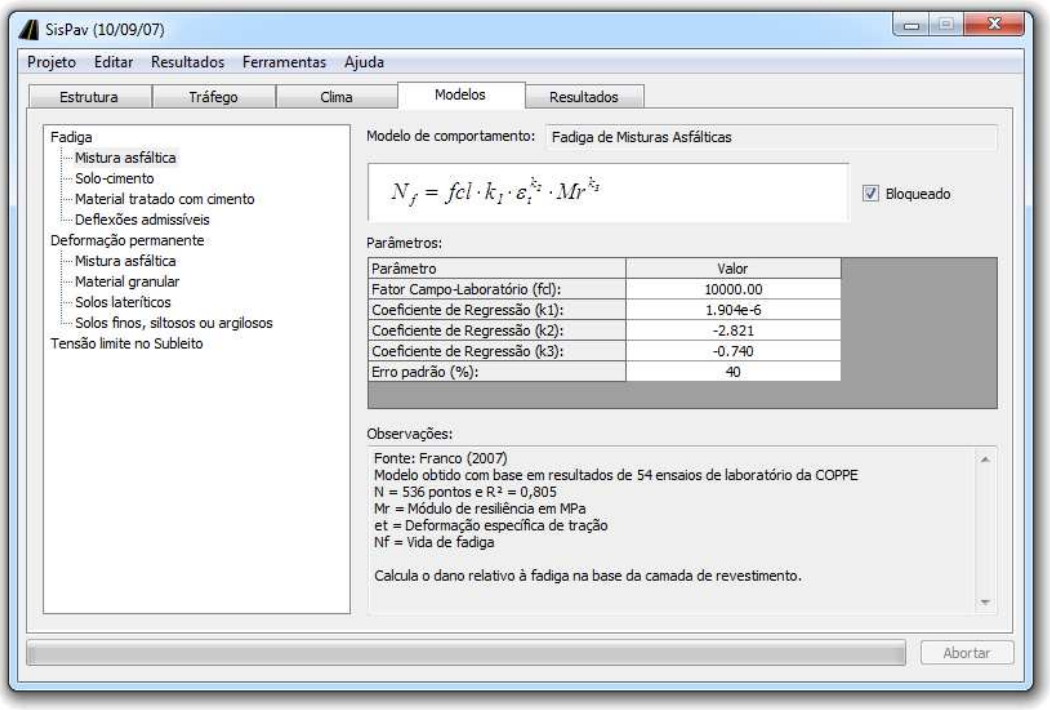
O banco de dados interno do SisPav, contendo as temperaturas médias mensais do ar, foi obtido das Normais Climatológicas (BRASIL, 1992 apud FRANCO, 2007).

O programa avalia o envelhecimento do ligante asfáltico da camada de revestimento conforme a variação das temperaturas médias do ar ao longo da vida de projeto do pavimento. Contudo, o SisPav não avalia os efeitos da variação de umidade dos materiais do pavimento (FRANCO, 2007).

### 4.4.5 Modelos de previsão

A quarta aba principal <*Modelos*>, apresentada na Figura 53, exibe os modelos de previsão inseridos no SisPav para realizar o dimensionamento.

Figura 53 – Interface da aba principal Modelos




Fonte: O autor (2017)

O SisPav dispõe de nove modelos de previsão do comportamento resiliente dos materiais utilizado no pavimento. Os modelos são divididos em relação ao critério de geração de dano no pavimento, os quais são apresentados a seguir (Quadro 19):

Quadro 19 – Modelos de previsão de comportamento do SisPav

| Critério de ruptura | Modelo |
|---|---|
| Fadiga | Mistura asfáltica |
| | Solo-cimento |
| | Material tratado com cimento |
| | Deflexões admissíveis |
| Deformação permanente | Mistura asfáltica |
| | Material granular |
| | Solos lateríticos |
| | Solos finos, siltosos ou argilosos |
| Tensão limite | No subleito |

Fonte: O autor (2017)

Na interface da aba <*Modelos*> pode-se selecionar o modelo desejado para o programa exibir seu nome, a expressão de regressão matemática, seus parâmetros, fatores e outras informações como a fonte de referência do modelo e de seus parâmetros. O SisPav permite ao usuário a edição dos parâmetros dos modelos ao clicar na caixa de verificação <*Bloqueado*>, a qual será desmarcada e renomeada para <*Restaurar*>. No caso de retornar

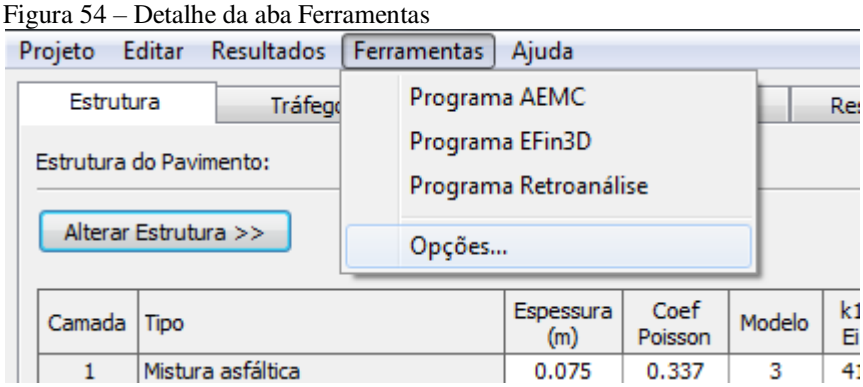
para os valores fornecidos pelo programa, basta clicar novamente marcando-se a caixa de verificação, a qual retornará a se chamar <*Bloqueado*>.

O programa irá informar quando a análise for feita com os parâmetros alterados ou quando for usado os valores inseridos no SisPav.

### 4.4.6 Opções do SisPav

O programa permite alterar parâmetros para otimizar os cálculos no dimensionamento do pavimento. Para isso, é necessário acessar no menu principal a aba <*Ferramentas*> e depois selecionar <*Opções*> (Figura 54).

Figura 54 – Detalhe da aba Ferramentas

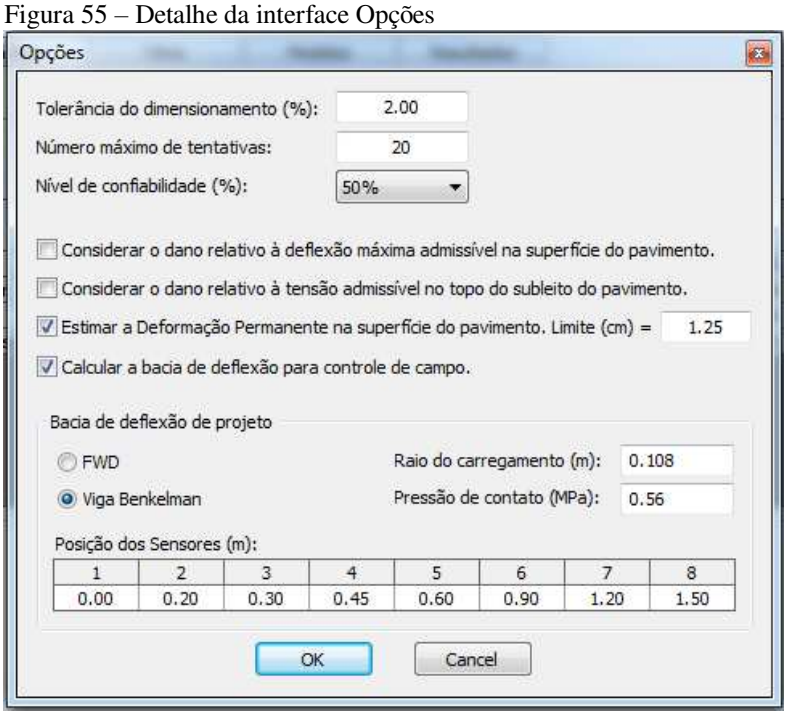



Fonte: O autor (2017)

A interface de <*Opções*>, apresentada na Figura 55, permite a alteração da tolerância do dimensionamento, que corresponde ao dano crítico total calculado pelos modelos de previsões e acúmulos, segundo a lei de Miner. Por padrão o programa considera o valor de 2%. Além da tolerância, é possível alterar-se o número máximo de tentativas na realização do dimensionamento pelo SisPav, o qual, por padrão, utiliza 20 tentativas, visto que, em geral, o programa converge para a espessura ótima ou para a espessura limite antes de atingir 20 tentativas (FRANCO, 2007).

O nível de confiabilidade é outro parâmetro que pode ser alterado. Pode-se selecionar entre os valores 50%, 75%, 85%, 90% e 95%, definidos no programa. O valor de 50% já vem como padrão e recomenda-se utiliza-lo, visto que, o nível de confiabilidade depende do parâmetro *Erro padrão* dos modelos de danos e nesta versão do SisPav não foram estabelecidos os valores de calibração para determinar esse parâmetro (FRANCO, 2007).

Figura 55 – Detalhe da interface Opções




Fonte: O autor (2017)

É permitido pelo programa optar por utilizar considerações, no dimensionamento ou na análise de vida de projeto, do dano relativo tanto à deflexão máxima admissível na superfície do pavimento como à tensão admissível no topo do subleito do pavimento. O SisPav vem com essas considerações desligadas somente para tornar otimizar a análise. Caso mantenham-se desligadas as considerações, o programa irá dimensionar o pavimento apenas considerando a fadiga do revestimento asfáltico ou das camadas cimentadas (FRANCO, 2007).

O SisPav, ao final do dimensionamento ou análise de vida de projeto, calcula uma estimativa de afundamento de trilha de roda com base em modelos de deformação permanente. O cálculo foi feito de forma simplificada, onde se considera um acúmulo linear de deformação para os diferentes eixos e posições horizontais (FRANCO, 2007). Por padrão, o SisPav vem com a opção de estimar a deformação permanente na superfície do pavimento ativada e com um valor limite de 1,25 cm, o qual pode ser alterado a critério do usuário. Desativando-se essa opção, as análises se tornam mais rápidas, principalmente para estruturas complexas com grande variedade de carregamentos.

Ainda na interface de <*Opções*> é possível optar por gerar, no relatório de projeto, a bacia de deflexões para o controle de campo. O programa dá duas opções de métodos de controle, sendo eles a Viga Benkelman e o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), com 8 sensores localizados de acordo com os dados inseridos na tabela. O SisPav considera o

carregamento de duas rodas para a Viga Benkelman e uma roda para o FWD, onde, por padrão, o raio de carregamento e a pressão de contato são referentes ao eixo padrão rodoviário mas podem ser alterados.

### 4.4.7 Dimensionamento e análise da estrutura

Após a inserção dos dados necessários nas abas <*Estrutura*>, <*Tráfego*> e <*Clima*> e as alterações opcionais nos <*Modelos*> e nas <*Opções*>, pode-se iniciar o dimensionamento ou análise de vida de projeto da estrutura inserida.

Para o dimensionamento ou análise, antes, é necessário acessar a aba <*Estrutura*>, selecionar a camada a ser dimensionada e pressionar a tecla <*F5*> ou clicar com o botão direito do mouse sobre ela para exibir o menu de opções e selecionar a opção <*Marcar*>. A camada marcada ficará simbolizada por um "x" e o fundo das células ficara colorido, conforme pode-se observar na Figura 47. Apenas o subleito não pode ser marcado para o dimensionamento.

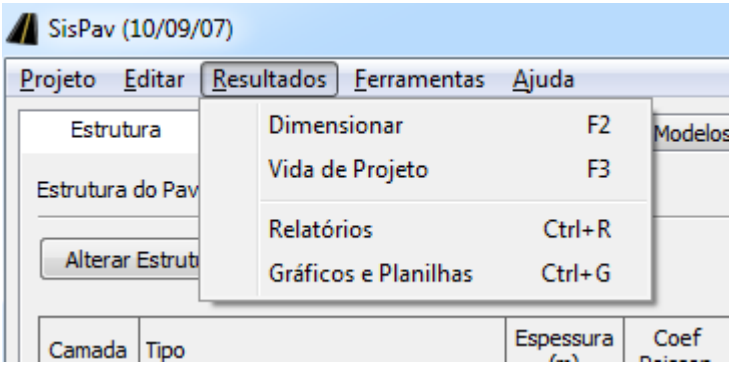
O limite das espessuras estabelecido no dimensionamento do programa é:

- Revestimento: 5 a 20 cm;
- Outras camadas: 10 a 60 cm.

No caso do dimensionamento resultar no limite inferior suportado pelo programa, significa que a estrutura suporta as condições impostas sobre o pavimento e no caso do resultado atingir o limite superior, significa que a estrutura não está adequada para suportar as condições de projeto. Em ambos os casos, recomenda-se que seja revisado a estrutura manualmente, como a mudança de material das camadas, suas propriedades e a quantidade de camadas de forma a adequar a estrutura do pavimento às condições de projeto (FRANCO, 2007).

Selecionada a camada, pressiona-se a tecla <*F2*> ou acessa-se, pelo menu principal, a aba <*Resultados*> e então seleciona-se a opção <*Dimensionar*> para realizar o dimensionamento. Para o caso de análise de vida de projeto, pressiona-se a tecla <F3> ou seleciona-se, na mesma aba <*Resultados*>, a opção <Vida de Projeto> (Figura 56).

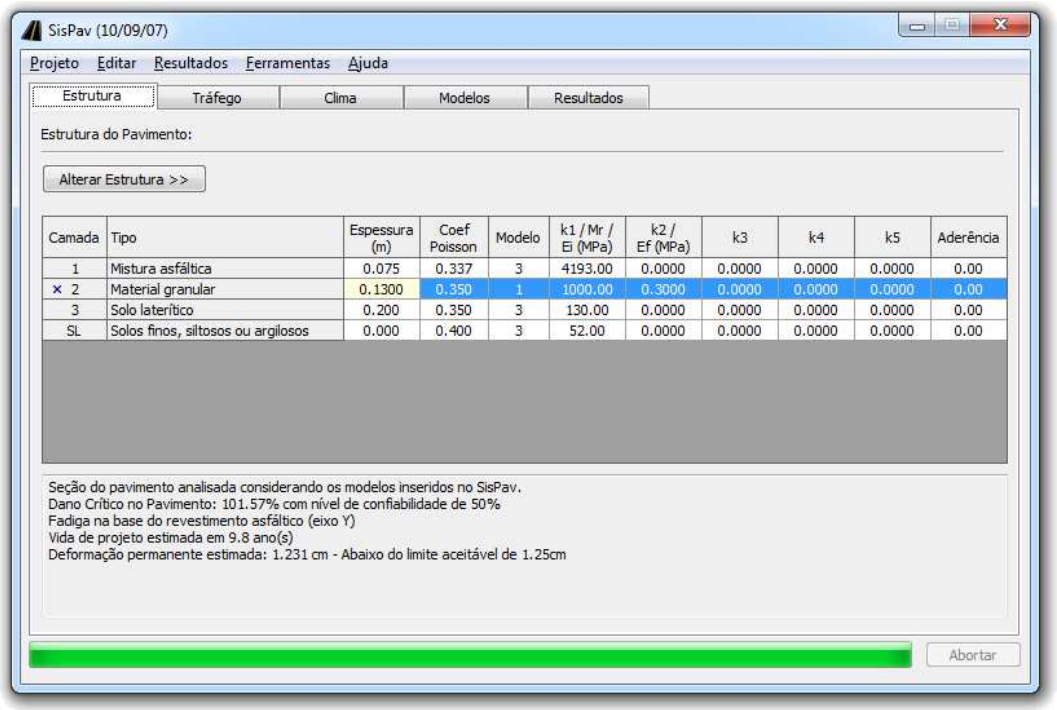
Figura 56 – Detalhe da aba Resultados no menu principal




Fonte: O autor (2017)

Ao final do dimensionamento, o programa irá exibir na interface da aba *<Estrutura>* as informações resumidas sobre o resultado dos cálculos do dimensionamento, conforme a Figura 57:

Figura 57 – Mensagem de resultado do dimensionamento




Fonte: O autor (2017)

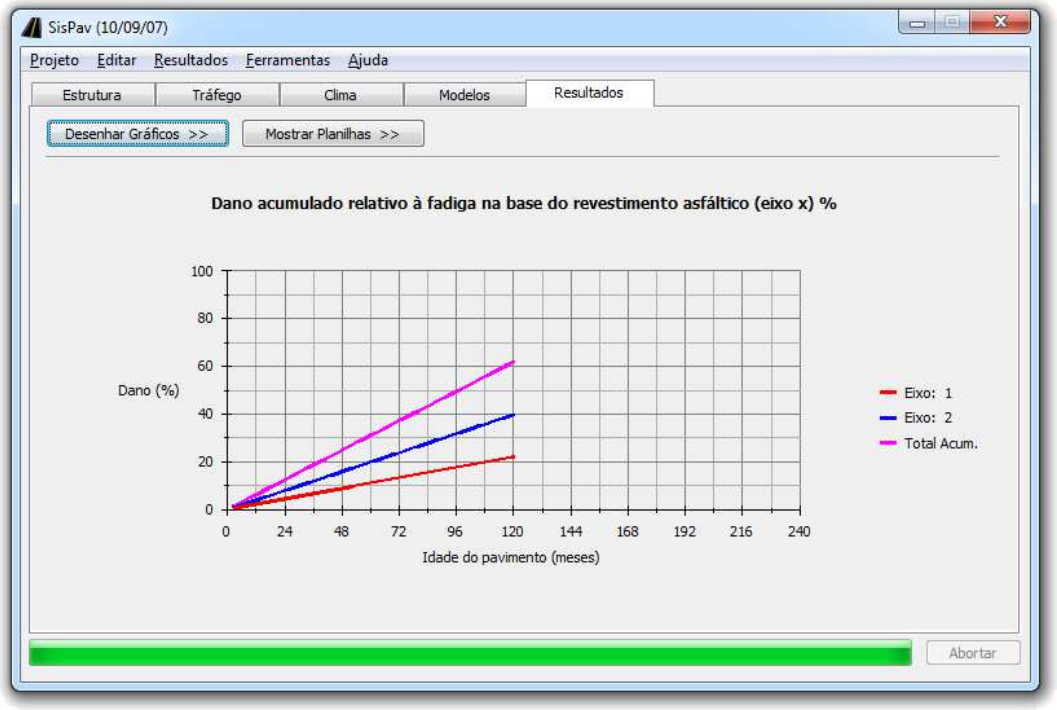
Na primeira linha o programa informa sobre o modelo de previsão utilizado. A segunda e terceira linha informa o dano crítico mais impactante junto ao nível de confiabilidade e seu tipo, de acordo com os que foram considerados para o dimensionamento. A quarta linha informa a vida de projeto estimada, que no caso do dimensionamento, será aproximadamente igual à vida de projeto selecionada, devido à tolerância de projeto

considerada. A última informação é referente à consideração da deformação permanente estimada, ou seja, o afundamento de trilha de roda.

A análise de vida de projeto não irá alterar nenhum dado da estrutura do pavimento, apenas irá verificar a vida de projeto do pavimento inserido. Já no dimensionamento, durante o processo, o programa irá realizar tentativas, alterando a espessura da camada selecionada, para alcançar um valor ótimo. Em caso de o programa não atingir uma espessura adequada, surgirá um aviso informando o problema e solicitando ajustes na estrutura do pavimento.

Pela aba principal <*Resultados*>, é possível acessar os resultados do dano acumulado, referentes aos modelos de previsão de dano considerados ao longo do tempo, em meses, e por tipo de configuração de eixo, em forma de planilhas e gráficos. A Figura 58 e a Figura 59 exibem exemplos dos resultados gerados na análise:

Figura 58 – Resultados em forma de gráfico

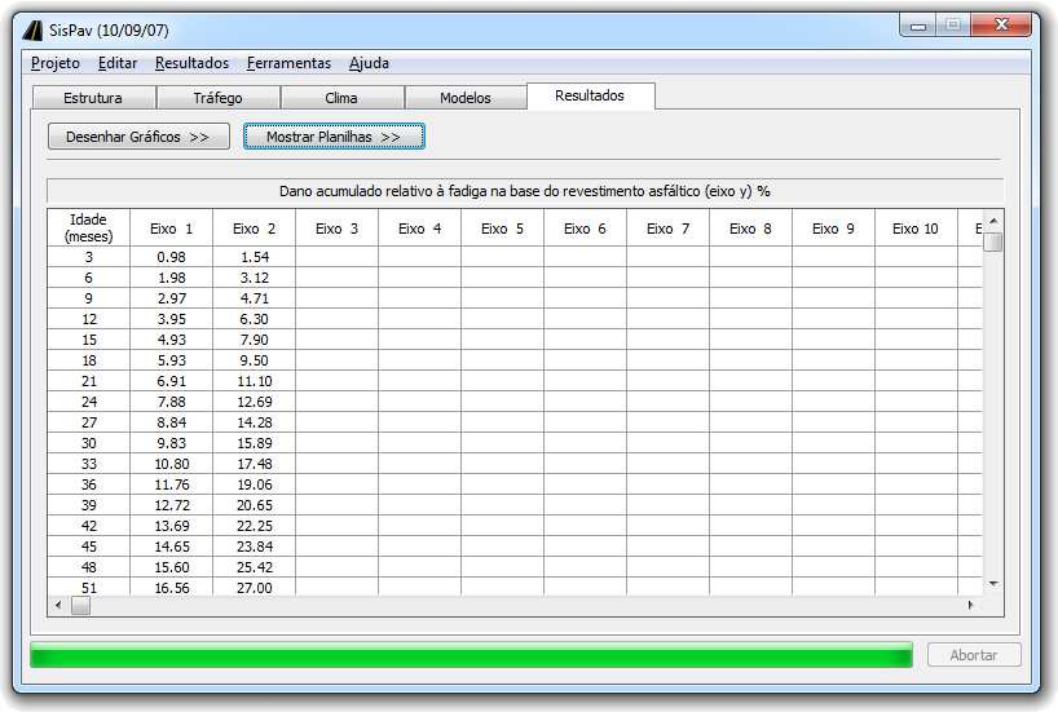



Fonte: O autor (2017)

Ao final do dimensionamento e das análises realizadas, é possível gerar um relatório detalhado, acessando-se a aba <*Resultados*>, do menu principal, e selecionando-se a opção <*Relatórios*>. Para salvar as análises e resultados, basta-se acessar, no menu principal, a aba <*Projeto*> e selecionar a opção <*Salvar*> ou <*Salvar como*>. Ao final de uma análise realizada pelo programa, qualquer alteração feita nos dados do projeto resultará o cancelamento da análise realizada anteriormente, destacando-se a importância de sempre

gerar o relatório e salvar o projeto em casos onde deseja-se realizar novas análises mesmo obtendo-se resultados satisfatórios.

Figura 59 – Resultados em forma de planilha




| Idade (meses) | Eixo 1 | Eixo 2 | Eixo 3 | Eixo 4 | Eixo 5 | Eixo 6 | Eixo 7 | Eixo 8 | Eixo 9 | Eixo 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 0.98 | 1.54 | | | | | | | | |
| 6 | 1.98 | 3.12 | | | | | | | | |
| 9 | 2.97 | 4.71 | | | | | | | | |
| 12 | 3.95 | 6.30 | | | | | | | | |
| 15 | 4.93 | 7.90 | | | | | | | | |
| 18 | 5.93 | 9.50 | | | | | | | | |
| 21 | 6.91 | 11.10 | | | | | | | | |
| 24 | 7.88 | 12.69 | | | | | | | | |
| 27 | 8.84 | 14.28 | | | | | | | | |
| 30 | 9.83 | 15.89 | | | | | | | | |
| 33 | 10.80 | 17.48 | | | | | | | | |
| 36 | 11.76 | 19.06 | | | | | | | | |
| 39 | 12.72 | 20.65 | | | | | | | | |
| 42 | 13.69 | 22.25 | | | | | | | | |
| 45 | 14.65 | 23.84 | | | | | | | | |
| 48 | 15.60 | 25.42 | | | | | | | | |
| 51 | 16.56 | 27.00 | | | | | | | | |

Fonte: O autor (2017)

O APÊNDICE C traz um exemplo de relatório gerado pelo SisPav.

# 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS DIMENSIONAMENTOS DE PAVIMENTO

A seguir apresenta-se uma comparação entre simulações de dimensionamento utilizando-se os roteiros dos métodos empíricos e análises mecanicistas, descritos nos capítulos anteriores, a fim de destacar suas principais características. Foram realizadas simulações com 4 situações de tráfego para 3 estruturas de pavimento considerando-se correlações de equivalência entre parâmetros dos métodos em prol das comparações.

## 5.1 Método do DNIT

Para o método do DNIT foram dimensionadas 3 estruturas para cada uma das 4 situações de tráfego. Os valores do $N_{DNIT}$, definidos para representar as 4 situações de tráfego, foram: $2 \times 10^6$, $7 \times 10^6$, $2 \times 10^7$ e $7 \times 10^7$.

Foram definidas as estruturas do pavimento, conforme o roteiro do DNIT no capítulo 4.1, fixando-se os materiais de cada camada e os valores de CBR para o subleito e camadas. As estruturas possuem o CBR do subleito igual a 3%, 8% e 12%. Para as camadas de base foi estabelecido material granular com CBR = 80%, para as camadas de sub-base foi estabelecido material granular com CBR = 20%. Para camada de reforço, das estruturas que possuem o CBR do subleito igual a 3% e 8%, foi definido material granular com CBR = 12%, já a estrutura com o CBR do subleito igual a 12% não possui camada de reforço.

No total foram realizadas 12 simulações de dimensionamento, conforme mostra o Quadro 20.

Quadro 20 – Simulações de dimensionamento do método do DNIT

| Tráfego ($N_{DNIT}$) | CBR (%) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Base | Sub-base | Reforço | Subleito |
| $2 \times 10^6$ | 80 | 20 | 12 | 3 |
| | 80 | 20 | 12 | 8 |
| | 80 | 20 | - | 12 |
| $7 \times 10^6$ | 80 | 20 | 12 | 3 |
| | 80 | 20 | 12 | 8 |
| | 80 | 20 | - | 12 |
| $2 \times 10^7$ | 80 | 20 | 12 | 3 |
| | 80 | 20 | 12 | 8 |
| | 80 | 20 | - | 12 |
| $7 \times 10^7$ | 80 | 20 | 12 | 3 |
| | 80 | 20 | 12 | 8 |
| | 80 | 20 | - | 12 |

Fonte: O autor (2017)

O Quadro 21 mostra os resultados obtidos nas simulações.

Quadro 21 – Resultados dos simulações pelo método do DNIT

| DNIT | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tráfego (N) | CBR do Subleito | Espessura das camadas (cm) | | | | Espessura total do pavimento (cm) |
| | | Revestimento | Base | Sub-base | Reforço | |
| $2 \times 10^6$ | 3% | 5 | 20 | 15 | 40 | 80 |
| | 8% | 5 | 20 | 15 | - | 40 |
| | 12% | 5 | 20 | 15 | - | 40 |
| $7 \times 10^6$ | 3% | 7,5 | 15 | 15 | 45 | 82,5 |
| | 8% | 7,5 | 15 | 20 | - | 42,5 |
| | 12% | 7,5 | 15 | 20 | - | 42,5 |
| $2 \times 10^7$ | 3% | 10 | 15 | 15 | 45 | 85 |
| | 8% | 10 | 15 | 15 | - | 40 |
| | 12% | 10 | 15 | 15 | - | 40 |
| $7 \times 10^7$ | 3% | 12 | 15 | 15 | 45 | 87 |
| | 8% | 12 | 15 | 15 | - | 42 |
| | 12% | 12 | 15 | 15 | - | 42 |

Fonte: O autor (2017)

Os resultados foram obtidos levando-se em conta os seguintes parâmetros e considerações:

- Para todas as simulações foi utilizado CBUQ nas camadas de revestimento com coeficiente estrutural $K_R = 2,0$;
- Para todas as camadas granulares foi utilizado o coeficiente estrutural K = 1,0;
- As espessuras das camadas de revestimentos foram estabelecidas segundo as dimensões mínimas, em relação ao N, propostas pelo método;
- Considerou-se a dimensão mínima de 15 cm, estabelecido pelo método para camadas granulares, para as camadas de base e sub-base.

Em face aos resultados obtidos, pode-se destacar as seguintes características do método:

a) A camada de revestimento está ligada diretamente ao tráfego, onde quanto maior for o N, maior será a espessura mínima admissível para a camada. Já o material do revestimento não influencia em nada na espessura;

b) Em geral, o método leva a grandes espessuras totais do pavimento com grandes espessuras de material granular;

c) A capacidade de suporte do subleito, traduzida no método pelo CBR, tem influência direta na espessura das outras camadas, onde valores baixos do CBR

do subleito exigem espessuras maiores das camadas acima, com exceção do revestimento;

d) As espessuras das camadas de base e sub-base tem pouca variação devido à espessura mínima determinada pelo método ou pela presença da camada de reforço, presente quando necessárias espessuras maiores acima do subleito.

## 5.2 Método da AASHTO

O estudo de tráfego para obter o número N do método da AASHTO utiliza os fatores de equivalência obtidos na Pista Experimental da AASHO e tem resultados consideravelmente inferiores ao N do DNIT, que utiliza os fatores de equivalência de cargas derivados da USACE (CASTRO, 2003). Assim, de forma a realizar a comparação entre métodos, realizou-se uma equivalência das situações de tráfego do $N_{DNIT}$ para o $N_{AASHTO}$, através da seguinte expressão proposta por Castro:

$$N_{AASHTO} = 0{,}25 \times N_{DNIT} \tag{27}$$

Os valores obtidos dos $N_{AASHTO}$ foram: $5 \times 10^5$, $1{,}75 \times 10^6$, $5 \times 10^6$ e $1{,}75 \times 10^7$.

Em relação as camadas de revestimento, base, sub-base e reforço, das 3 estruturas simuladas, utilizou-se os valores apresentados no Quadro 13, no capítulo 4.2, para determinar os coeficientes estruturais dos materiais utilizados em cada camada. Já para determinar o módulo de resiliência do subleito das estruturas, utilizou-se a expressão proposta por Heukelom e Klomp (CASTRO, 2003), que expressa relações entre valores do CBR e módulos de resiliência:

$$M_R = 1500 \times CBR \tag{28}$$

onde:

$M_R$ = Módulo de resiliência em psi;
CBR = Valor do CBR em porcentagem.

Diante as considerações realizadas, necessárias para a comparação, realizou-se as 12 simulações, conforme o Quadro 22:

Quadro 22 – Simulações de dimensionamento do método da AASHTO

| Tráfego ($N_{AASHTO}$) | Coeficiente estrutural ($a_i$) | | | | $M_R$ (psi) |
|---|---|---|---|---|---|
| | Revestimento | Base | Sub-base | Reforço | Subleito |
| $5 \times 10^5$ | 0,44 | 0,13 | 0,09 | 0,09 | 4500 |
| | 0,44 | 0,13 | 0,09 | 0,09 | 12000 |
| | 0,44 | 0,13 | 0,09 | - | 18000 |
| $1,75 \times 10^6$ | 0,44 | 0,13 | 0,09 | 0,09 | 4500 |
| | 0,44 | 0,13 | 0,09 | 0,09 | 12000 |
| | 0,44 | 0,13 | 0,09 | - | 18000 |
| $5 \times 10^6$ | 0,44 | 0,13 | 0,09 | 0,09 | 4500 |
| | 0,44 | 0,13 | 0,09 | 0,09 | 12000 |
| | 0,44 | 0,13 | 0,09 | - | 18000 |
| $1,75 \times 10^7$ | 0,44 | 0,13 | 0,09 | 0,09 | 4500 |
| | 0,44 | 0,13 | 0,09 | 0,09 | 12000 |
| | 0,44 | 0,13 | 0,09 | - | 18000 |

Fonte: O autor (2017)

A seguir, apresenta-se os resultados das simulações (Quadro 23):

Quadro 23 – Resultados das simulações pelo método da AASHTO

| AASHTO | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tráfego (N) | MR do Subleito (psi) | Espessura das camadas (cm) | | | | Espessura total do pavimento (cm) |
| | | Revestimento | Base | Sub-base | Reforço | |
| $5 \times 10^5$ | 4500 | 6 | 10 | 15 | 40 | 71 |
| | 12000 | 6 | 10 | 10 | 13 | 39 |
| | 18000 | 6 | 10 | 13 | - | 29 |
| $1,75 \times 10^6$ | 4500 | 7,5 | 15 | 20 | 43 | 85,5 |
| | 12000 | 7,5 | 15 | 25 | - | 47,5 |
| | 18000 | 7,5 | 15 | 15 | - | 37,5 |
| $5 \times 10^6$ | 4500 | 9 | 20 | 25 | 43 | 97 |
| | 12000 | 9 | 15 | 15 | 20 | 59 |
| | 18000 | 9 | 15 | 20 | - | 44 |
| $1,75 \times 10^7$ | 4500 | 10 | 25 | 35 | 46 | 116 |
| | 12000 | 10 | 15 | 15 | 35 | 75 |
| | 18000 | 10 | 15 | 15 | 20 | 60 |

Fonte: O autor (2017)

Os resultados obtidos levaram em conta os seguintes parâmetros e considerações:

- Adotou-se para as simulações os valores de serventia $p_0 = 2,5$ e $p_t = 4,2$;
- Considerou-se um nível de confiança de 90% para todas as situações de tráfego, de acordo com o N, e adotou-se o valor 0,35 para o desvio padrão;
- Desconsiderou-se as variações sazonais, que tem influência sobre as propriedades dos materiais;

- Considerou-se para as simulações um estado bom de drenagem e adotou-se o valor de 1,0 para os coeficientes de drenagem das camadas granulares.
- Adotou-se uma camada de reforço, com a = 0,09, para a última estrutura, devido à necessidade de uma espessura muito elevada na sub-base;

De acordo com os resultados, destacou- se as seguintes características do método:

a) O método gira em torno do número estrutural, obtido com os dados do tráfego, capacidade de suporte do subleito e parâmetros, obtidos na Pista Experimental da AASHO, relacionados às condições do projeto;

b) Tanto o aumento do N como da capacidade de suporte do subleito, caracterizada no método pelo módulo de resiliência do subleito, impactam grande variação nas espessuras totais e das camadas do pavimento;

c) Na maioria dos casos apresentou espessuras totais do pavimento maiores que as dimensionadas pelo método do DNIT;

d) Apresenta grandes espessuras nas camadas granulares.

## 5.3 Análise mecanicista pelo ELSYM5

Realizou-se a análise mecanicista utilizando-se o ELSYM5 para os resultados das simulações de dimensionamentos pelo método do DNIT e da AASHTO. No total, analisou-se as 24 estruturas apresentadas no Quadro 24:

Quadro 24 – Estruturas analisadas pelo ELSYM5

| Nº | Propriedades | Estrutura do pavimento | | | | | Espessura total (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Revestimento | Base | Sub-base | Reforço | Subleito | |
| | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,35 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | |
| | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 5060 | 3060 | 1630 | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | |
| 1 | Espessuras (cm) | 5 | 20 | 15 | 40 | 540 | 80 |
| 2 | | 5 | 20 | 15 | - | 1180 | 40 |
| 3 | | 5 | 20 | 15 | - | 1630 | 40 |
| 4 | | 7,5 | 15 | 15 | 45 | 540 | 82,5 |
| 5 | | 7,5 | 15 | 20 | - | 1180 | 42,5 |
| 6 | | 7,5 | 15 | 20 | - | 1630 | 42,5 |
| 7 | | 10 | 15 | 15 | 45 | 540 | 85 |
| 8 | | 10 | 15 | 15 | - | 1180 | 40 |
| 9 | | 10 | 15 | 15 | - | 1630 | 40 |
| 10 | | 12 | 15 | 15 | 45 | 540 | 87 |
| 11 | | 12 | 15 | 15 | - | 1180 | 42 |
| 12 | | 12 | 15 | 15 | - | 1630 | 42 |

(Continua)

| Nº | Propriedades | Estrutura do pavimento | | | | | Espessura total (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Revestimento | Base | Sub-base | Reforço | Subleito | |
| | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,35 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | |
| | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 5060 | 3060 | 1630 | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | |
| 13 | Espessura (cm) | 6 | 10 | 15 | 40 | 540 | 71 |
| 14 | | 6 | 10 | 10 | 13 | 1180 | 39 |
| 15 | | 6 | 10 | 13 | - | 1630 | 29 |
| 16 | | 7,5 | 15 | 20 | 43 | 540 | 85,5 |
| 17 | | 7,5 | 15 | 25 | - | 1180 | 47,5 |
| 18 | | 7,5 | 15 | 15 | - | 1630 | 37,5 |
| 19 | | 9 | 20 | 25 | 43 | 540 | 97 |
| 20 | | 9 | 15 | 15 | 20 | 1180 | 59 |
| 21 | | 9 | 15 | 20 | - | 1630 | 44 |
| 22 | | 10 | 25 | 35 | 46 | 540 | 116 |
| 23 | | 10 | 15 | 15 | 35 | 1180 | 75 |
| 24 | | 10 | 15 | 15 | 20 | 1630 | 60 |

Fonte: O autor (2017)
(Conclusão)

Apresenta-se, no Quadro 25, os resultados das análises realizadas pelo ELSYM5:

Quadro 25 – Resultado das análises realizadas com o ELSYM5

| Método | Tráfego | Nº | $D_0$ ($10^{-2}$ mm) | $\varepsilon_t$ | $\varepsilon_v$ | Tráfego suportado | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | $N_0$ | $N_t$ | $N_v$ |
| DNIT | $2 \times 10^6$ | 1 | 46,90 | $1,50 \times 10^{-4}$ | $2,07 \times 10^{-4}$ | $7,16 \times 10^7$ | $1,06 \times 10^5$ | $4,25 \times 10^7$ |
| | | 2 | 36,50 | $1,55 \times 10^{-4}$ | $3,55 \times 10^{-4}$ | $2,72 \times 10^8$ | $9,65 \times 10^4$ | $3,80 \times 10^6$ |
| | | 3 | 31,30 | $1,57 \times 10^{-4}$ | $2,93 \times 10^{-4}$ | $6,16 \times 10^8$ | $9,29 \times 10^4$ | $8,97 \times 10^6$ |
| | $7 \times 10^6$ | 4 | 44,40 | $1,61 \times 10^{-4}$ | $1,97 \times 10^{-4}$ | $9,59 \times 10^7$ | $8,63 \times 10^4$ | $5,31 \times 10^7$ |
| | | 5 | 33,50 | $1,64 \times 10^{-4}$ | $3,18 \times 10^{-4}$ | $4,29 \times 10^8$ | $8,18 \times 10^4$ | $6,22 \times 10^6$ |
| | | 6 | 28,50 | $1,64 \times 10^{-4}$ | $2,63 \times 10^{-4}$ | $1,01 \times 10^9$ | $8,18 \times 10^4$ | $1,46 \times 10^7$ |
| | $2 \times 10^7$ | 7 | 40,90 | $1,46 \times 10^{-4}$ | $1,79 \times 10^{-4}$ | $1,45 \times 10^7$ | $1,15 \times 10^5$ | $8,15 \times 10^7$ |
| | | 8 | 31,30 | $1,50 \times 10^{-4}$ | $3,18 \times 10^{-4}$ | $4,14 \times 10^7$ | $1,06 \times 10^5$ | $6,22 \times 10^6$ |
| | | 9 | 26,30 | $1,49 \times 10^{-4}$ | $2,63 \times 10^{-4}$ | $8,19 \times 10^7$ | $1,08 \times 10^5$ | $1,46 \times 10^7$ |
| | $7 \times 10^7$ | 10 | 38,60 | $1,32 \times 10^{-4}$ | $1,65 \times 10^{-4}$ | $1,82 \times 10^7$ | $1,54 \times 10^5$ | $1,17 \times 10^8$ |
| | | 11 | 29,10 | $1,35 \times 10^{-4}$ | $2,82 \times 10^{-4}$ | $5,51 \times 10^7$ | $1,45 \times 10^5$ | $1,07 \times 10^7$ |
| | | 12 | 24,40 | $1,33 \times 10^{-4}$ | $2,34 \times 10^{-4}$ | $1,10 \times 10^8$ | $1,51 \times 10^5$ | $2,46 \times 10^7$ |
| AASHTO | $5 \times 10^5$ | 13 | 50,00 | $1,72 \times 10^{-4}$ | $2,68 \times 10^{-4}$ | $5,10 \times 10^7$ | $7,11 \times 10^4$ | $1,34 \times 10^7$ |
| | | 14 | 40,00 | $1,80 \times 10^{-4}$ | $3,96 \times 10^{-4}$ | $1,67 \times 10^8$ | $6,23 \times 10^4$ | $2,33 \times 10^6$ |
| | | 15 | 34,00 | $1,79 \times 10^{-4}$ | $4,15 \times 10^{-4}$ | $3,96 \times 10^8$ | $6,33 \times 10^4$ | $1,89 \times 10^6$ |
| | $1,75 \times 10^6$ | 16 | 43,20 | $1,60 \times 10^{-4}$ | $1,38 \times 10^{-4}$ | $1,11 \times 10^8$ | $8,79 \times 10^4$ | $2,61 \times 10^8$ |
| | | 17 | 32,50 | $1,62 \times 10^{-4}$ | $2,00 \times 10^{-4}$ | $5,04 \times 10^8$ | $8,48 \times 10^4$ | $4,96 \times 10^7$ |
| | | 18 | 29,20 | $1,65 \times 10^{-4}$ | $2,51 \times 10^{-4}$ | $8,91 \times 10^8$ | $8,03 \times 10^4$ | $1,79 \times 10^7$ |
| | $5 \times 10^6$ | 19 | 38,00 | $1,46 \times 10^{-4}$ | $1,39 \times 10^{-4}$ | $2,19 \times 10^8$ | $1,15 \times 10^5$ | $2,53 \times 10^8$ |
| | | 20 | 31,40 | $1,55 \times 10^{-4}$ | $2,07 \times 10^{-4}$ | $6,05 \times 10^8$ | $9,65 \times 10^4$ | $4,25 \times 10^7$ |
| | | 21 | 26,70 | $1,55 \times 10^{-4}$ | $1,80 \times 10^{-4}$ | $1,43 \times 10^9$ | $9,65 \times 10^4$ | $7,95 \times 10^7$ |
| | $1,75 \times 10^7$ | 22 | 33,40 | $1,37 \times 10^{-4}$ | $1,01 \times 10^{-4}$ | $3,21 \times 10^7$ | $1,39 \times 10^5$ | $1,06 \times 10^9$ |

(Continua)

| Método | Tráfego | Nº | $D_0$ ($10^{-2}$ mm) | $\varepsilon_t$ | $\varepsilon_v$ | Tráfego suportado | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | $N_0$ | $N_t$ | $N_v$ |
| AASHTO | $1,75 \times 10^7$ | 23 | 29,70 | $1,48 \times 10^{-4}$ | $1,44 \times 10^{-4}$ | $5,08 \times 10^7$ | $1,10 \times 10^5$ | $2,16 \times 10^8$ |
| | | 24 | 26,30 | $1,48 \times 10^{-4}$ | $1,61 \times 10^{-4}$ | $8,19 \times 10^7$ | $1,10 \times 10^5$ | $1,31 \times 10^8$ |

Fonte: O autor (2017)
Nota: $D_0$ – Deflexão na superfície do revestimento;
$\varepsilon_t$ – Deformação específica de tração;
$\varepsilon_v$ – Deformação vertical de compressão no topo do subleito.
(Conclusão)

As análises realizadas tiveram as seguintes considerações e parâmetros:

- Os coeficientes de Poisson para as camadas e o subleito foram adotados conforme o Quadro 17, apresentado no capítulo 4.3.2;
- Considerou-se os módulos de elasticidade dos materiais como módulos de resiliência;
- Os valores de módulo de resiliência para os materiais foram estimados conforme o Quadro 18;
- Conforme os resultados, gerados pelo ELSYM5, de deflexão na superfície do pavimento, deformação específica de tração e deformação vertical de compressão no topo do subleito, utilizou-se as funções de transferências a seguir, já apresentadas no capítulo 3.2, adotando-se as constantes do Instituto do Asfalto para a Expressão 7, apresentadas no Quadro 4;

$$N = 6,64 \times 10^{-7} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,93} \quad (4)$$

$$N = 5,548 \times 10^{16} \times D_0^{-5,319} \quad (5)$$

$$N = 3,036 \times 10^{13} \times D_0^{-3,922} \quad (6)$$

$$N = 1,365 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^{4,477} \quad (7)$$

As células hachuradas no Quadro 25 indicam os tráfegos suportados que foram inferiores ao tráfego de projeto previsto. Observou-se que apenas as estruturas número 7, 10 e 11 indicaram o tráfego suportado sendo inferior ao tráfego de projeto em relação à geração de defeito por fadiga devido a deflexão na superfície do revestimento. Já quanto ao tráfego

suportado, em relação à geração de defeito por fadiga devido à deformação específica de tração, nenhuma estrutura analisada atingiu o tráfego de projeto previsto. E para a análise de tráfego suportado considerando-se a geração de defeito devido à deformação máxima no topo do subleito, constatou-se que as estruturas de número 5, 8, 9, 11 e 12 também não alcançaram o tráfego de projeto previsto.

Além das análises das estruturas, realizou-se simulações, modificando-se os materiais e as espessuras das camadas, células hachuradas (Quadro 26), nas 12 estruturas dimensionadas pelo método do DNIT, com o objetivo de obter estruturas capazes de satisfazer o tráfego de projeto previsto, utilizando-se as mesmas funções de transferências das análises anteriores. O Quadro 26 apresenta as estruturas obtidas nessas simulações:

Quadro 26 – Resultados das simulações utilizando-se o ELSYM5

| Nº | Tráfego | Propriedades | Estrutura do pavimento | | | | | Espessura total (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Revestimento | Base | Sub-base | Reforço | Subleito | |
| 1 | $2 \times 10^6$ | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 11000 | 3060 | 1630 | 540 | - |
| | | Espessuras (cm) | 5 | 20 | 15 | 40 | - | 80 |
| 2 | | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,30 | 0,35 | - | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 11000 | 3060 | - | 1180 | - |
| | | Espessuras (cm) | 5 | 20 | 15 | - | - | 40 |
| 3 | | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,30 | 0,35 | - | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 11000 | 3060 | - | 1630 | - |
| | | Espessuras (cm) | 5 | 20 | 15 | - | - | 40 |
| 4 | $7 \times 10^6$ | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 20000 | 3060 | 1630 | 540 | - |
| | | Espessuras (cm) | 7,5 | 15 | 15 | 45 | - | 82,5 |
| 5 | | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,30 | 0,35 | - | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 20000 | 3060 | - | 1180 | - |
| | | Espessuras (cm) | 7,5 | 15 | 15 | - | - | 37,5 |
| 6 | | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,30 | 0,35 | - | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 20000 | 3060 | - | 1630 | - |
| | | Espessuras (cm) | 7,5 | 15 | 15 | - | - | 37,5 |
| 7 | $2 \times 10^7$ | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,25 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 28000 | 3060 | 1630 | 540 | - |
| | | Espessuras (cm) | 10 | 15 | 15 | 45 | - | 85 |
| 8 | | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,25 | 0,35 | - | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 28000 | 3060 | - | 1180 | - |
| | | Espessuras (cm) | 10 | 15 | 15 | - | - | 40 |
| 9 | | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,25 | 0,35 | - | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 28000 | 3060 | - | 1630 | - |
| | | Espessuras (cm) | 10 | 15 | 15 | - | - | 40 |

(Continua)

| Nº | Tráfego | Propriedades | Estrutura do pavimento | | | | | Espessura total (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Revestimento | Base | Sub-base | Reforço | Subleito | |
| 10 | $7 \times 10^7$ | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,25 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 38000 | 3060 | 1630 | 540 | - |
| | | Espessuras (cm) | 14 | 20 | 15 | 45 | - | 94 |
| 11 | | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,25 | 0,35 | - | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 38000 | 3060 | - | 1180 | - |
| | | Espessuras (cm) | 12 | 20 | 15 | - | - | 47 |
| 12 | | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,25 | 0,35 | - | 0,45 | - |
| | | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 11000 | 3060 | - | 1630 | - |
| | | Espessuras (cm) | 12 | 20 | 15 | - | - | 47 |

Fonte: O autor (2017)
(Conclusão)

Em face os resultados das análises e simulações, destacam-se as seguintes características do ELSYM5:

a) Possibilita a análise do comportamento da estrutura e a aplicação de funções de transferência, à escolha do projetista, para realizar análise com diferentes critérios;

b) Dentre as 24 estruturas dimensionadas pelo método do DNIT e da AASHTO, e de acordo com as funções escolhidas pelo autor, todas elas apresentaram tráfego suportado inferior ao tráfego de projeto previsto por apresentar fadiga devido à deformação específica de tração, entretanto se o rompimento de fadiga for verificado pela função de transferência que considera a deflexão máxima na superfície do revestimento, apenas 3 estruturas apresentam tráfego inferior ao de projeto;

c) Nas simulações feitas modificando-se as estruturas analisadas, verificou-se que alterando apenas as espessuras das camadas, mantendo-se os mesmo $M_R$ dos materiais, tem pouca influência no aumento do tráfego suportado, analisado quanto a fadiga devido à deformação específica de tração, como pode-se observar no Quadro 27. Sendo assim, as espessuras totais das estruturas e das camadas, obtidas nas simulações, apresentaram pouca variação, em contra partida, constatou-se a necessidade de um material na camada de base com um $M_R$ mais elevado conforme o aumento do N.

Quadro 27 – Simulações na estrutura de número 1

| Tráfego | Propriedades | Revestimento | Base | Sub-base | Reforço | Subleito | Total | Tráfego suportado | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | $N_0$ | $N_t$ | $N_v$ |
| $2 \times 10^6$ | Coef. de Poisson | 0,32 | 0,35 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | | | | |
| | $M_R$ (Kgf/cm$^2$) | 38750 | 5060 | 3060 | 1630 | 540 | | | | |
| | Espessuras (cm) | 5 | 20 | 40 | 40 | - | 94 | $1,45 \times 10^8$ | $1,02 \times 10^5$ | $3,92 \times 10^8$ |
| | | 5 | 40 | 15 | 40 | - | 47 | $1,74 \times 10^8$ | $1,08 \times 10^5$ | $3,66 \times 10^8$ |
| | | 10 | 20 | 15 | 40 | - | 47 | $1,66 \times 10^7$ | $1,27 \times 10^5$ | $9,74 \times 10^7$ |

Fonte: O autor (2017)

## 5.4 Análise mecanicista pelo SisPav

Com as estruturas dimensionadas pelos métodos anteriores, realizou-se simulações utilizando o SisPav. De acordo com o roteiro apresentado no capítulo 4.4, foi feita a análise de vida de projeto para as estruturas dimensionadas pelo método do DNIT e pelo método da AASHTO, totalizando 24 estruturas analisadas, utilizando-se os mesmos coeficientes de Poisson e $M_R$ em MPa.

O Quadro 28 apresenta os resultados das análises:

Quadro 28 – Resultados das análises de vida de projeto pelo SisPav

| Camadas | | Nº | Revestimento | Base | Sub-base | Reforço | Subleito | Espessura Total (cm) | Dano Crítico (%) | Vida de Projeto (anos) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $M_R$ (MPa) | | | 3800 | 500 | 300 | 160 | - | | | |
| Coef. de Poisson | | | 0,32 | 0,35 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | | | |
| Método | Tráfego (N) | | Espessuras (cm) | | | | $M_R$ (MPa) | | | |
| DNIT | $2 \times 10^6$ | 1 | 5 | 20 | 15 | 40 | 53 | 80 | 302,92 | 3,3 |
| | | 2 | 5 | 20 | 15 | - | 106 | 40 | 319,13 | 3,1 |
| | | 3 | 5 | 20 | 15 | - | 160 | 40 | 313,53 | 3,2 |
| | $7 \times 10^6$ | 4 | 7,5 | 15 | 15 | 45 | 53 | 82,5 | 647,21 | 1,5 |
| | | 5 | 7,5 | 15 | 20 | - | 106 | 42,5 | 593,18 | 1,7 |
| | | 6 | 7,5 | 15 | 20 | - | 160 | 42,5 | 575,76 | 1,7 |
| | $2 \times 10^7$ | 7 | 10 | 15 | 15 | 45 | 53 | 85 | 1162,69 | 0,9 |
| | | 8 | 10 | 15 | 15 | - | 106 | 40 | 829,09 | 1,2 |
| | | 9 | 10 | 15 | 15 | - | 160 | 40 | 784,97 | 1,3 |
| | $7 \times 10^7$ | 10 | 12 | 15 | 15 | 45 | 53 | 87 | 3200,46 | PMB |
| | | 11 | 12 | 15 | 15 | - | 106 | 42 | 1702,54 | 0,6 |
| | | 12 | 12 | 15 | 15 | - | 160 | 42 | 1604,81 | 0,6 |
| AASHTO | $2 \times 10^6$ | 13 | 6 | 10 | 15 | 40 | 53 | 71 | 215,28 | 4,6 |
| | | 14 | 6 | 10 | 10 | 13 | 106 | 39 | 224,04 | 4,5 |
| | | 15 | 6 | 10 | 13 | - | 160 | 29 | 228,90 | 4,4 |
| | $7 \times 10^6$ | 16 | 7,5 | 15 | 20 | 43 | 53 | 85,5 | 514,51 | 1,9 |
| | | 17 | 7,5 | 15 | 25 | - | 106 | 47,5 | 554,44 | 1,8 |
| | | 18 | 7,5 | 15 | 15 | - | 160 | 37,5 | 536,49 | 1,9 |

(Continua)

| Camadas | | Nº | Revestimento | Base | Sub-base | Reforço | Subleito | Espessura Total (cm) | Dano Crítico (%) | Vida de Projeto (anos) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MR (MPa) | | | 3800 | 500 | 300 | 160 | - | | | |
| Coef. de Poisson | | | 0,32 | 0,35 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | | | |
| Método | Tráfego (N) | | Espessuras (cm) | | | | $M_R$ (MPa) | | | |
| AASHTO | $2 \times 10^7$ | 19 | 9 | 20 | 25 | 43 | 53 | 97 | 946,35 | 1,1 |
| | | 20 | 9 | 15 | 15 | 20 | 106 | 59 | 1009,67 | 1,0 |
| | | 21 | 9 | 15 | 20 | - | 160 | 44 | 1030,85 | 1,0 |
| | $7 \times 10^7$ | 22 | 10 | 25 | 35 | 46 | 53 | 116 | 3345,72 | PMB |
| | | 23 | 10 | 15 | 15 | 35 | 106 | 75 | 2668,96 | PMB |
| | | 24 | 10 | 15 | 15 | 20 | 160 | 60 | 2677,18 | PMB |

Fonte: O autor (2017)
Nota: PMB – Provavelmente muito baixa.
(Conclusão)

As análises foram realizadas considerando-se os seguintes parâmetros:

- Os conjuntos de configurações de eixos que compõe o tráfego foram simulados de forma que o SisPav retornasse os valores de N conforme os utilizados nas simulações empíricas. Entretanto, o N fornecido pelo SisPav é calculado conforme os fatores equivalentes do método do DNIT e serve apenas como comparação, não tornando necessário fazer equivalência para um $N_{AASHTO}$, visto que o programa não utiliza essa informação nos cálculos;
- Utilizou-se os modelos de previsão de comportamento padrões inseridos no SisPav;
- Adotou-se o valor padrão de 50% para o nível de confiabilidade como recomendado no roteiro;
- Utilizou-se as opções padrões do SisPav, com exceção de que considerou-se o dano relativo a deflexão máxima admissível na superfície do pavimento e o dano relativo a tensão admissível no topo do subleito;
- Para o período de projeto, foi utilizado o valor padrão de 10 anos e para os parâmetros gerais do tráfego e a distribuição anual, utilizou-se os valores padrões do programa;
- Os módulos de resiliência e coeficientes de Poisson foram os mesmos adotados e utilizados nas simulações realizadas pelo ELSYM5, conforme o Quadro 24, no capítulo anterior;

- Os materiais constituintes do revestimento, da base, da sub-base, do reforço e do subleito das estruturas, foram, respectivamente, mistura asfáltica, material granular, material granular, solo laterítico e solos finos, siltosos ou argilosos.

Dentre todas as 24 estruturas, apresentadas no Quadro 28, apenas as estruturas número 7, 10 e 22 apontaram a deflexão máxima na superfície do pavimento como causa do dano crítico no período de vida de projeto de 10 anos, enquanto todas as outras indicaram como sendo a fadiga da base do revestimento asfáltico a causa do dano crítico (Quadro 29).

Quadro 29 – Defeito responsável pelo dano crítico nas estruturas

| Nº | Dano crítico (%) | Defeito |
|---|---|---|
| 1 | 302,92 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 2 | 319,13 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 3 | 313,53 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 4 | 647,21 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 5 | 593,18 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 6 | 575,76 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 7 | 1162,69 | Deflexão máxima na superfície do pavimento |
| 8 | 829,09 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 9 | 784,97 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 10 | 3200,46 | Deflexão máxima na superfície do pavimento |
| 11 | 1702,54 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 12 | 1604,81 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 13 | 215,28 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 14 | 224,04 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 15 | 228,90 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 16 | 514,51 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 17 | 554,44 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 18 | 536,49 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 19 | 946,35 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 20 | 1009,67 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 21 | 1030,85 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 22 | 3343,72 | Deflexão máxima na superfície do pavimento |
| 23 | 2668,96 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |
| 24 | 2677,18 | Fadiga na base do revestimento asfáltico |

Fonte: O autor (2017)

Verificou-se, também, que para algumas estruturas, as de número 10, 22, 23 e 24, o programa estimou sua vida de projeto como provavelmente muito baixa (PMB) (Quadro 28). Diante os resultados, constatou-se que nenhuma das estruturas dimensionadas, tanto pelo método do DNIT como pelo da AASHTO, atendeu o período de vida de projeto de 10 anos.

Para a análise de dimensionamento pelo SisPav, foram selecionadas as 12 estruturas do método do DNIT. Executou-se várias simulações de forma a encontrar estruturas

capazes de satisfazerem o tempo de projeto de vida de 10 anos. Para as simulações, fixou-se os valores mínimos do revestimento asfáltico e, conforme necessário, alterou-se os materiais das camadas, os módulos resilientes, os coeficientes de Poisson e a remoção ou a adição de camadas.

A seguir, o Quadro 30, apresenta as estruturas obtidas nas análises de dimensionamento das simulações realizadas:

Quadro 30 – Estruturas obtidas das análises de dimensionamento pelo SisPav

| Tráfego (N) | Nº | Camadas | | | | | | Espessura Total (cm) | Dano Crítico (%) | Vida de Projeto (anos) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Revestimento | *Binder* | Base | Sub-base | Reforço | Subleito | | | |
| | | $M_R$ (MPa) / Espessura (cm) | | | | | | | | |
| $2 \times 10^6$ | 1 | 3800 | - | 950 | 300 | 160 | 53 | 80 | 98,65 | 10,1 |
| | | 5 | - | 20 | 15 | 40 | - | | | |
| | 2 | 3800 | - | 1000 | 300 | - | 106 | 40 | 100,04 | 10,0 |
| | | 5 | - | 20 | 15 | - | - | | | |
| | 3 | 3800 | - | 1000 | 300 | - | 160 | 38 | 99,02 | 10,1 |
| | | 5 | - | 18 | 15 | - | - | | | |
| $7 \times 10^6$ | 4 | 3800 | - | 1500 | 300 | 160 | 53 | 82,5 | 99,97 | 10,0 |
| | | 7,5 | - | 15 | 15 | 45 | - | | | |
| | 5 | 3800 | - | 1500 | 300 | - | 106 | 48 | 100,68 | 9,9 |
| | | 7,5 | - | 20,5 | 20 | - | - | | | |
| | 6 | 3800 | - | 1500 | 300 | - | 160 | 42,5 | 99,10 | 10,1 |
| | | 7,5 | - | 15 | 20 | - | - | | | |
| $2 \times 10^7$ | 7 | 4800 | 3500 | 3000 | 300 | - | 53 | 78 | 100,52 | 9,9 |
| | | 10 | 5 | 48 | 15 | - | - | | | |
| | 8 | 3800 | - | 3000 | 300 | - | 106 | 53 | 100,79 | 9,9 |
| | | 10 | - | 28 | 15 | - | - | | | |
| | 9 | 3800 | - | 3000 | 300 | - | 160 | 51 | 100,55 | 9,9 |
| | | 10 | - | 26 | 15 | - | - | | | |
| $7 \times 10^7$ | 10 | 4800 | 3800 | 5000 | 1500 | - | 53 | 116 | 99,00 | 10,1 |
| | | 15 | 5 | 50 | 46 | - | - | | | |
| | 11 | 4800 | 3800 | 5000 | - | - | 106 | 44 | 99,30 | 10,1 |
| | | 12 | 5 | 27 | - | - | - | | | |
| | 12 | 4800 | - | 5000 | - | - | 160 | 25 | 100,45 | 10,0 |
| | | 12 | - | 13 | - | - | - | | | |

Fonte: O autor (2017)

As simulações de análises de dimensionamento pelo SisPav seguiram os seguintes parâmetros:

- Para as camadas de bases e sub-bases utilizou-se materiais granulares, solos melhorado com cimento, solo-cimento e BGTC;
- Quando adicionada a camada de *Binder*, considerou-se camada de material asfáltico na estrutura inserida dentro do SisPav com espessura fixa de 5 cm;
- As mesmas considerações das análises de período de via de projeto, referentes aos parâmetros e configurações padrões do SisPav, composição do tráfego e

materiais constituintes das camadas, foram adotadas para as análises de dimensionamento;

- Utilizou-se os mesmos $M_R$ e os coeficiente de Poisson da análise de período de vida de projeto e, para os novos tipos de materiais inseridos na estrutura, adotou-se valores dentro da faixa sugerida pelo SisPav, conforme mostra o Quadro 31.

Quadro 31 – Materiais e seus parâmetros utilizados nas simulações

| Material | Coeficiente de Poisson | $M_R$ (MPa) |
|---|---|---|
| Solo melhorado com cimento | 0,30 | 950 - 1500 |
| Solo cimento | 0,25 | 3000 |
| BGTC | 0,25 | 5000 |
| *Binder* | 0,32 | 3500 - 3800 |
| Concreto asfáltico | 0,32 | 3800 - 4800 |

Fonte: SisPav (2007)

Constatou-se que, das estruturas analisadas apresentadas no Quadro 28 Quadro 28, as que apresentaram dano crítico em função de fadiga na base do revestimento asfáltico, necessitaram, na análise de dimensionamento, de uma base com material de $M_R$ maior, enquanto as estruturas onde o dano crítico foi causado pela deflexão máxima na superfície do pavimento requereram um revestimento asfáltico com maior $M_R$ e/ou adição de uma camada de *binder* junto a camadas de base ou sub-bases com $M_R$ mais elevados. Conforme o aumento do N, verificou-se a necessidade do aumento do $M_R$ para a camada de base e, para os casos onde foi utilizado BGTC como material da camada de base, não foi necessário camadas de sub-base. Já a camada de reforço tornou-se dispensável em todas as estruturas analisadas que possuíam o $M_R$ do subleito maiores que 53 MPa.

As estruturas dimensionadas nas simulações que possuem o $N = 2 \times 10^6$ e $N = 7 \times 10^6$ apresentaram pouca variação nas espessuras, entretanto com a necessidade de uma base com $M_R$ superior ao do material granular utilizado, tendo em vista que, se mantido o material granular, as estruturas exigiam espessuras muito elevadas, em geral 50 cm para base e sub-base, podendo vir a comprometer a viabilidade econômica do pavimento.

Já as estruturas de $N = 2 \times 10^7$ e $N = 7 \times 10^7$ apresentaram variações significantes nas espessuras, mesmo com a substituição do material granular nas camadas de base por solo melhorado com cimento, solo-cimento ou BGTC. As estruturas de 7 a 11 necessitaram de maiores espessuras das camadas de base e/ou o aumento da espessura de mistura asfáltica, sendo na capa de rolamento e/ou adição de uma camada de *binder* com espessuras de 5 cm. A estrutura de número 12 também apresentou uma variação notável na espessura total do

pavimento, porém de forma positiva, aparentemente, do ponto de vista econômico, visto que constatou-se a necessidade apenas da presença da camada de revestimento com espessura mínima e a da camada de base, de BGTC, com espessura de 13 cm. Dentre as simulações, apenas as estruturas 7 e 10 apresentaram elevadas espessuras de base e/ou sub-base cimentadas, o que pode vir a comprometer a viabilidade econômica da estrutura.

Diante dos resultados das análises de período de vida de projeto e das análises de dimensionamento, destacou-se algumas características do SisPav:

a) O SisPav permite analisar as estruturas já dimensionadas pelos métodos empíricos e analisá-las utilizando novos critérios;
b) Possibilita a simulação de diversas estruturas para a mesma situação, providenciando ao projetista analisar soluções variadas;
c) Em comparação ao ELSYM5, dispõe de maior potencial de modelagem em relação às simulações para análises, considerando-se os parâmetros e configurações apresentadas no roteiro que, diferente do ELSYM5 que so fornece os esforços, o SisPav já inclui em seu processamento as funções de transferência;
d) Todas as simulações exigiram estruturas com a camada de base de materiais com $M_R$ maiores que os de material granular;
e) Para $N \geq 2 \times 10^7$, a camada de *binder* junto às camadas de base e sub-base cimentadas com espessuras elevadas tornaram-se necessárias para as estruturas com o subleito de $M_R = 53$ MPa.

## 5.5 Análise de uma situação real de projeto de pavimentação

Além das comparações realizadas com estruturas simuladas, também executou-se comparações com um projeto real de pavimentação, realizado por um órgão público. Não serão mencionadas neste trabalho quaisquer informações a respeito do órgão ou identificação do trecho.

O projeto de pavimentação fornecido consiste em um pavimento do tipo flexível dimensionado pelo método do DNIT para uma rodovia do estado do Maranhão. Segundo o projeto fornecido pelo órgão, utilizou-se elementos obtidos nos estudos de tráfego e dos estudos geotécnicos de subleito e ocorrências de materiais.

A seguir apresenta-se algumas características do projeto:

- Extensão: 65,40 km;

- Período de Projeto: 10 anos;
- Tráfego: $N_{USACE} = 5{,}2 \times 10^6$, $N_{AASHTO} = 1{,}3 \times 10^6$;
- O subleito apresenta uma homogeneidade considerável com CBR = 8%;
- Revestimento de concreto betuminoso usinado a quente;
- Materiais para base e sub-base conforme recomendado nos estudos geotécnicos.

O dimensionamento pelo DNIT, realizado no projeto, exigiu uma estrutura com as seguintes espessuras:

a) Revestimento ≥ 7,5 cm;

b) Base ≥ 11,3 cm;

c) Sub-base ≥ 15,7 cm.

O Quadro 32 traz a estrutura adotada no projeto:

Quadro 32 – Estrutura de projeto adotada de acordo com o dimensionamento

| Camada | Espessura Real |
|---|---|
| Revestimento capa de rolamento | 4,0 cm |
| Revestimento *Binder* | 4,0 cm |
| Base de solo-areia (90/10%) | 15,0 cm |
| Sub-base de solo estabilizada granulometricamente | 20,0 cm |
| Espessura total | 43,0 cm |

Fonte: Projeto de pavimentação fornecido pelo órgão público

Diante a estrutura proposta no projeto, efetuou-se as análises de dimensionamento utilizando-se os roteiros dos métodos, com exceção do método do DNIT, por ter apresentado o mesmo resultado de dimensionamento do projeto. As estruturas resultantes são mostradas a seguir:

a) AASHTO:

O Quadro 33 contém as espessuras obtidas no dimensionamento pelo método da AASHTO:

Quadro 33 – Estrutura da AASHTO

| Camada | Espessura |
|---|---|
| Revestimento | 8,0 cm |
| Base de solo-areia (90/10%) | 18,0 cm |
| Sub-base de solo estabilizada granulometricamente | 21,0 cm |
| Espessura total | 47,0 cm |

Fonte: O autor (2017)

O dimensionamento foi realizado assumindo as seguintes considerações e parâmetros:

- Nível de confiança de 95% e $S_0 = 0,35$;
- Valores de serventia: $p_0 = 4,2$ e $p_t = 2,5$;
- Coeficientes de drenagem para camadas de base e sub-base igual a 1,0;
- Manteve-se os mesmo materiais sugeridos na estrutura do projeto;
- O valor de $M_R$ do subleito igual a 12000 psi, calculado pela expressão 28.

b) ELSYM5:

Para a análise da estrutura adotada no projeto pelo ELSYM5, considerou-se:

- Os valores do $M_R$, para as camadas de revestimento, base, sub-base e para o subleito, iguais a 3800 MPa, 500 MPa, 300 MPa e 106 MPa, respectivamente (Quadro 34), adotados conforme o Quadro 18, no capítulo 4.3.2;

Quadro 34 – Estrutura analisada pelo ELSYM5

| Camada | $M_R$ (MPa) |
|---|---|
| Revestimento | 3800 |
| Base de solo-areia (90/10%) | 500 |
| Sub-base de solo estabilizada granulometricamente | 300 |
| Subleito | 106 |

Fonte: O autor (2017)

- O valor dos coeficientes de Poisson obtidos conforme a faixa de valores apresentada no Quadro 17, apresentado no capítulo 4.3.2;
- As mesmas funções de transferências usadas nas análises das simulações anteriores pelo ELSYM5, apresentadas no capítulo 5.3;

O resultado da análise constatou que a estrutura de projeto não resistirá ao dano causado pelos defeitos gerados por fadiga em função da deformação específica de tração na base do revestimento. Por conta disso, realizou-se algumas simulações modificando a estrutura de forma a atender as análises do ELSYM5.

O Quadro 35 traz a estrutura obtida no dimensionamento pelo ELSYM5 e funções de transferência:

Quadro 35 – Estrutura obtida no ELSYM5

| Camada | $M_R$ (MPa) | Espessura |
|---|---|---|
| Revestimento | 3800 | 8,0 cm |
| Base solo melhorado com cimento | 1950 | 15,0 cm |
| Sub-base granular | 300 | 20,0 cm |
| Subleito | 106 | - |
| Espessura total | 43,0 cm | |

Fonte: O autor (2017)

c) SisPav:

Analisando-se a estrutura de projeto pelo SisPav (Quadro 36), levou-se em conta as mesmas considerações em relação aos parâmetros e configurações utilizados nas simulações anteriores.

Quadro 36 – Estrutura analisada pelo SisPav

| Camada | $M_R$ (MPa) | Espessura |
|---|---|---|
| Revestimento | 3800 | 8,0 cm |
| Base granular | 500 | 15,0 cm |
| Sub-base granular | 300 | 20,0 cm |
| Subleito | 106 | - |
| Espessura total | 43,0 cm | |
| Dano Crítico | 466,16 % | |
| Vida de projeto (anos) | 2,1 | |

Fonte: O autor (2017)

Segundo a análise de período de projeto, a estrutura apresentou uma vida de serviço estimada de 2,1 anos com dano crítico de 466,16% relativo a fadiga na base do revestimento asfáltico. De forma a encontrar uma solução que atinja o período de vida de projeto de 10 anos, realizou-se algumas simulações e obteve-se a seguinte estrutura (Quadro 37):

Quadro 37 – Estrutura obtida no SisPav

| Camada | $M_R$ (MPa) | Espessura |
|---|---|---|
| Revestimento | 3800 | 8,0 cm |
| Base granular | 1500 | 16,0 cm |
| Sub-base granular | 300 | 20,0 cm |
| Subleito | 106 | - |
| Espessura total | 44,0 cm | |

Fonte: O autor (2017)

## 5.6 Discussão dos resultados

Conforme observados nas análises realizadas com as simulações, verificou-se que as estruturas dimensionadas pelos métodos empíricos e posteriormente analisadas pelo ELSYM5 com funções de transferência e pelo SisPav apresentaram o dano crítico em decorrência a geração de defeitos na estrutura e não alcançaram o período de vida de projeto estabelecido ou o tráfego suportado previsto. Em geral, detectou-se dano crítico causado por fadiga na base do revestimento asfáltico como o principal defeito das estruturas dimensionadas pelos métodos empíricos.

Foi necessário modificar as estruturas dimensionadas pelos métodos empíricos a fim de satisfazer as análises mecanicistas realizadas pelo ELSYM5 e SisPav. As estruturas obtidas, em geral, apresentaram a necessidade de utilizar-se um material com módulo de resiliência mais elevado nas camadas de base e com pouca variação nas espessuras das camadas, visto que apenas a variação das espessuras das camadas não solucionava o problema de fadiga no revestimento asfáltico.

Para as análises feitas com a situação real de um projeto de pavimentação, constatou-se a mesma necessidade de substituir o material da camada de base por um material que apresente um módulo de resiliência mais elevado, devido ao resultado das análises mecanicistas constatarem que as estruturas apresentaram dano crítico em relação a fadiga no revestimento asfáltico. Também verificou-se que apenas modificar as espessuras das camadas não solucionava o problema da fadiga, tendo como resultado a pouca variação nas espessuras.

O Quadro 38 apresenta a comparação das estruturas obtidas nas análises do projeto de pavimentação:

Quadro 38 – Comparação das estruturas obtidas

| Método | Revestimento | *Binder* | Base | Sub-base | Subleito | Espessura total (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CBR ou $M_R$ (MPa) / Espessuras (cm) | | | | | |
| DNIT | - | - | 80% | 20% | 8% | 43 |
| | 4 | 4 | 15 | 20 | - | |
| AASHTO | 3800 | - | 500 | 300 | 106 | 47 |
| | 8 | - | 18 | 21 | - | |
| ELSYM5 | 3800 | - | 1950 | 300 | 106 | 43 |
| | 8 | - | 15 | 20 | - | |
| SisPav | 3800 | - | 1500 | 300 | 106 | 44 |
| | 8 | - | 16 | 20 | - | |

Fonte: O autor (2017)

# 6 CONCLUSÃO

As conclusões obtidas neste trabalho abordam tanto a fundamentação teórica, a respeito dos métodos empíricos e das análises mecanicistas, como os resultados obtidos nas comparações e simulações analisadas.

O método do DNIT demonstrou-se ultrapassado quanto aos critérios utilizados no dimensionamento da estrutura do pavimento. A metodologia CBR, utilizada como critério, mostrou-se débil quanto à previsão de comportamento dos materiais e aos danos gerados no pavimento. O método prevê apenas a capacidade de suporte do subleito, através do ensaio CBR, este que, não relaciona outras propriedades dos materiais, importantes para estabelecer critérios relacionados à geração de defeitos na estrutura do pavimento.

Já no método da AASHTO, os critérios utilizados tem base os diversos resultados obtidos nos experimentos realizados na Pista Experimental da AASHO. Dessa forma, o método quantifica, através dos parâmetros serventia e desempenho, a condição de ruptura do pavimento em determinado tempo. Entretanto, por se tratar de um método com base profundamente empírica, ele se torna restrito, quanto a sua aplicação, devido à necessidade de se ter condições semelhantes às dos experimentos realizados. Pode-se citar, como exemplo, a condição climática dos EUA, local onde foram realizados os experimentos, ser diferente da brasileira, a diferença nos fatores de equivalência de carga, devido a diferença entre os veículos dos experimentos e os veículos que circulam no Brasil, e por fim, as propriedades dos solos e materiais utilizados.

O programa ELSYM5 permite uma modelagem da estrutura para calcular as reações, impostas pelo tráfego, em forma de tensão-deformação e deflexão. Embora limitado, permitindo um máximo de 5 camadas, o ELSYM5 utiliza da TSCE para analisar o comportamento dos materiais na estrutura do pavimento. É possível aplicar funções de transferência para relacionar os resultados obtidos no ELSYM5 com a geração de defeitos no pavimento, permitindo assim, uma análise mais criteriosa, ou seja, a análise mecanicista. Todavia, existe uma variedade de funções de transferências desenvolvidas, o que gera diversos resultados para uma mesma análise.

Quanto ao programa SisPav, nota-se uma modelagem mais complexa da estrutura do pavimento, principalmente em relação as propriedades dos materiais. O SisPav também permite uma melhor análise das condições em que a estrutura estará submetida, como as informações do tráfego, período de projeto e clima. E, diferente do ELSYM5, o SisPav já incorpora funções de transferência utilizadas nos cálculos como modelos de previsão de

comportamento dos materiais, com a possibilidade do projetista alterar fatores e parâmetros conforme necessário. Reforça-se que as equações internas do SisPav já são, segundo o autor do programa, as mais adequadas às condições do Brasil. Dessa forma, o SisPav consegue gerar análises e dimensionamentos que compreendem mais critérios e condições em relação aos métodos empíricos.

Já em relação às comparações realizadas com as simulações e com o projeto de pavimentação, conclui-se que as estruturas dimensionadas pelos métodos empíricos e depois analisadas pelo ELSYM5 e pelo SisPav, em geral, não são capazes de resistir ao dano causado pela fadiga no revestimento asfáltico para o tráfego previsto, e, dessa forma, comprometem o tempo de vida do pavimento.

Percebe-se então, que os métodos empíricos possuem limitações que deram espaço para o desenvolvimento de análises mais complexas do dimensionamento da estrutura do pavimento capaz de uma melhor representação de seu comportamento em condições mais específicas.

É importante destacar que, apesar das análises mecanicistas desenvolverem resultados que representam melhor os comportamentos e condições da estrutura do pavimento, é necessário, para estas análises, a confirmação ou calibração por meio de dados obtidos empiricamente. Isso ocorre pela incapacidade dos modelos estruturais e das funções de transferências de incorporar todos os parâmetros, tornando necessário o uso de fatores para reproduzir dados baseados empiricamente, os chamados fatores campo-laboratório, além das funções de transferências estarem fundamentadas em teorias empiricamente validadas.

Por fim, conclui-se que tanto os métodos empíricos como as análises mecanicistas são de significativa importância quando utilizados em conjunto para obter projetos de pavimentação bem dimensionados.

# REFERÊNCIAS


AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guide for Design of Pavement Structures.** Washigton, D.C.: AASHTO, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Piso intertravado de concreto. Disponível em: <http://abnt.org.br/paginampe/noticias/202-piso-intertravado> Acesso em: 11 de abr. 2017.

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

BERNUCCI, Liedi Bariani, et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2008.

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

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf> Acesso em: 29 de nov. 2016.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Infraestrutura Rodoviária. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias. **Quadro de fabricantes de veículos.** 2012. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/download/rodovias/operacoes-rodoviarias/pesagem/qfv-2012-abril.pdf> Acesso em: 5 de abr. 2017.

CASTRO, Bruno Almeida Cunha de. **Construção de estradas e vias urbanas.** 2003. Notas de aula. Disponível em: <http://files.labtopope.webnode.com/200000687-4058b41567/APOSTILA_Projetos%20Rodoviarios_Escola_Engenharia_UFMG.pdf> Acesso em: 20 de mai. 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Serviço Social do Transporte. Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2016: relatório gerencial**. 20. ed. Brasília: CNT; SEST; SENAT, 2016. Disponível em: < http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20LOW.pdf> Acesso em: 29 de nov. 2016.

DAROUS, João. **Estudo comparativo entre sistemas de cálculo de tensões e deformações utilizados em dimensionamento de pavimentos asfálticos novos.** 2003. 290f. Tese (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. U.S. Department of Transportation. Highway History. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/highwayhistory/history_misc.cfm> Acesso em: 2 de abr. 2017.

FRANCO, Filipe A. Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav.** 2007. 294f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FREITAS, Thiago José de Oliveira. **Análise comparativa entre métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis: método do DNIT e método mecanístico-empírico do software SisPavBR.** 2016. 112f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2016.

GONÇALVES, Fernando Pugliero. **O Desempenho dos Pavimentos Flexíveis.** 1999. Disponível em: < http://usuarios.upf.br/~pugliero/arquivos/09.pdf> Acesso em: 11 de abr. 2017.

LACERDA, Úrsula. Pavimentação em Pedra Tosca e Paralelepípedo. Disponível em: <https://blogdaengenhariacivil.wordpress.com/2014/12/08/pavimentacao-em-pedra-tosca-e-paralelepipedo/> Acesso em: 11 de abr. 2017.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Pavimentação –** TRN 032. 2014. Disponível em: <http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2014/05/Aulas-1%C2%B0-TVC.pdf> Acesso em: 20 de abr. 2017.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2005.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação.** 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SEVERI, Andréa Arantes, et al. **Verificação à Fadiga de Revestimentos Asfálticos e Bases Cimentadas** – Programa Pavimentos Asfálticos v. 1.0. São Paulo: DER/SP, 1998.

SRA Techonologies, Inc. **ELSYM5: Interactive Input Processor Version 1.0**. FHWA, 1985. Programa em DOS. Disponível em: <sites.poli.usp.br/ptr/lmp//sofdown.htm> Acesso em: 15 de abr. 2017.

THE AASHO Road Test. Disponível em: <http://www.camineros.com/docs/cam003.pdf> Acesso em: 2 de abr. 2017.

PINTO, Salomão. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos.** 1991. 478f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE, Rio de Janeiro, 1991.

# APÊNDICES

## APÊNDICE A – EXEMPLO DE ARQUIVO DE DADOS DE ENTRADA DO ELSYM5

```
DIMENSIONAMENTO
  5  2  2  3
       5.000        .320   38750.000
      20.000        .350    5060.000
      15.000        .350    3060.000
      40.000        .400    1630.000
        .000        .450     540.000
    2041.000        .000      10.800
        .000        .000
      32.400        .000
        .000        .000
      16.200        .000
        .010
       4.990
      80.010
```

# APÊNDICE B – EXEMPLO DE ARQUIVO DE DADOS DE SAÍDA DO ELSYM5

```
ELASTIC SYSTEM - DIMENSIONAMENTO

          ELASTIC   POISSONS
LAYER     MODULUS   RATIO      THICKNESS
  1        38750.     .320        5.000 IN
  2         5060.     .350       20.000 IN
  3         3060.     .350       15.000 IN
  4         1630.     .400       40.000 IN
  5          540.     .450     SEMI-INFINITE

  TWO LOAD(S), EACH LOAD AS FOLLOWS

TOTAL LOAD.....    2041.00 LBS
LOAD STRESS....       5.57 PSI
LOAD RADIUS....      10.80 IN

       LOCATED AT
LOAD    X        Y
  1     .000     .000
  2   32.400     .000

RESULTS REQUESTED FOR SYSTEM LOCATION(S)

DEPTH(S)
Z=    .01   4.99  80.01
X-Y POINT(S)
  X         Y
    .00        .00
  16.20        .00



  Z=    .01 LAYER NO,  1

  X          Y
    .00      .00
  16.20      .00



NORMAL STRESSES
SXX   -.1462E+02  .1541E+01
SYY   -.1606E+02 -.7403E+01
SZZ   -.5542E+01 -.3164E-01
```

SHEAR STRESSES

| | | |
|---|---|---|
| SXY | .0000E+00 | .0000E+00 |
| SXZ | -.1343E-03 | .0000E+00 |
| SYZ | .0000E+00 | .0000E+00 |

PRINCIPAL STRESSES

| | | |
|---|---|---|
| PS 1 | -.5542E+01 | .1541E+01 |
| PS 2 | -.1462E+02 | -.3164E-01 |
| PS 3 | -.1606E+02 | -.7403E+01 |

PRINCIPAL SHEAR STRESSES

| | | |
|---|---|---|
| PSS 1 | .5261E+01 | .4472E+01 |
| PSS 2 | .4538E+01 | .7865E+00 |
| PSS 3 | .7230E+00 | .3686E+01 |

DISPLACEMENTS

| | | |
|---|---|---|
| UX | .1089E-02 | .0000E+00 |
| UY | .0000E+00 | .0000E+00 |
| UZ | .4693E-01 | .4351E-01 |

NORMAL STRAINS

| | | |
|---|---|---|
| EXX | -.1988E-03 | .1012E-03 |
| EYY | -.2481E-03 | -.2035E-03 |
| EZZ | .1104E-03 | .4759E-04 |

SHEAR STRAINS

| | | |
|---|---|---|
| EXY | .0000E+00 | .0000E+00 |
| EXZ | -.9150E-08 | .0000E+00 |
| EYZ | .0000E+00 | .0000E+00 |

PRINCIPAL STRAINS

| | | |
|---|---|---|
| PE 1 | .1104E-03 | .1012E-03 |
| PE 2 | -.1988E-03 | .4759E-04 |
| PE 3 | -.2481E-03 | -.2035E-03 |

PRINCIPAL SHEAR STRAINS

| | | |
|---|---|---|
| PSE 1 | .3584E-03 | .3047E-03 |
| PSE 2 | .3092E-03 | .5358E-04 |

```
PSE 3  .4926E-04  .2511E-03


  Z=   4.99 LAYER NO,  1

  X          Y
    .00      .00
  16.20      .00



NORMAL STRESSES
SXX    .5637E+01 -.6925E+01
SYY    .6312E+01  .1268E+01
SZZ   -.4079E+01 -.1276E+01


SHEAR STRESSES
SXY    .0000E+00  .0000E+00
SXZ    .1721E+00  .0000E+00
SYZ    .0000E+00  .0000E+00


PRINCIPAL STRESSES
PS 1   .6312E+01  .1268E+01
PS 2   .5640E+01 -.1276E+01
PS 3  -.4082E+01 -.6925E+01


PRINCIPAL SHEAR STRESSES
PSS 1  .5197E+01  .4097E+01
PSS 2  .3360E+00  .1272E+01
PSS 3  .4861E+01  .2825E+01


DISPLACEMENTS
UX     .9950E-04  .0000E+00
UY     .0000E+00  .0000E+00
UZ     .4667E-01  .4368E-01


NORMAL STRAINS
EXX    .1270E-03 -.1787E-03
EYY    .1500E-03  .1005E-03
EZZ   -.2039E-03  .1378E-04
```

```
SHEAR STRAINS
EXY    .0000E+00  .0000E+00
EXZ    .1172E-04  .0000E+00
EYZ    .0000E+00  .0000E+00


PRINCIPAL STRAINS
PE 1   .1500E-03  .1005E-03
PE 2   .1271E-03  .1378E-04
PE 3  -.2040E-03 -.1787E-03


PRINCIPAL SHEAR STRAINS
PSE 1  .3541E-03  .2791E-03
PSE 2  .2289E-04  .8667E-04
PSE 3  .3312E-03  .1924E-03


  Z=  80.01 LAYER NO,  5

  X          Y
    .00      .00
  16.20      .00



NORMAL STRESSES
SXX   -.6799E-02 -.2932E-02
SYY   -.2065E-02  .3911E-04
SZZ   -.1108E+00 -.1132E+00


SHEAR STRESSES
SXY    .0000E+00  .0000E+00
SXZ    .1458E-01  .0000E+00
SYZ    .0000E+00  .0000E+00


PRINCIPAL STRESSES
PS 1  -.2065E-02  .3911E-04
PS 2  -.4794E-02 -.2932E-02
PS 3  -.1128E+00 -.1132E+00


PRINCIPAL SHEAR STRESSES
PSS 1  .5537E-01  .5662E-01
PSS 2  .1364E-02  .1486E-02
```

| | | |
|---|---|---|
| PSS 3 | .5401E-01 | .5513E-01 |

DISPLACEMENTS

| | | |
|---|---|---|
| UX | -.1445E-02 | .0000E+00 |
| UY | .0000E+00 | .0000E+00 |
| UZ | .2763E-01 | .2761E-01 |

NORMAL STRAINS

| | | |
|---|---|---|
| EXX | .8147E-04 | .8887E-04 |
| EYY | .9418E-04 | .9685E-04 |
| EZZ | -.1978E-03 | -.2072E-03 |

SHEAR STRAINS

| | | |
|---|---|---|
| EXY | .0000E+00 | .0000E+00 |
| EXZ | .7831E-04 | .0000E+00 |
| EYZ | .0000E+00 | .0000E+00 |

PRINCIPAL STRAINS

| | | |
|---|---|---|
| PE 1 | .9418E-04 | .9685E-04 |
| PE 2 | .8685E-04 | .8887E-04 |
| PE 3 | -.2032E-03 | -.2072E-03 |

PRINCIPAL SHEAR STRAINS

| | | |
|---|---|---|
| PSE 1 | .2974E-03 | .3041E-03 |
| PSE 2 | .7326E-05 | .7979E-05 |
| PSE 3 | .2900E-03 | .2961E-03 |

# APÊNDICE C – EXEMPLO DE RELATÓRIO GERADO PELO SISPAV



# SisPav

**v. 10/09/07**

## Relatório Técnico
## Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

O programa faz parte da Tese de Doutorado desenvolvida por:
**Filipe Augusto Cinque de Proença Franco**
email: filipefacpf@yahoo.com.br

## Dimensionamento

Seção do pavimento dimensionada com 1495.65% de dano relativo a:
Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)
Nível de confiabilidade de 50%
Vida de serviço estimada em 0.7 Anos

**Considerações:**

| | |
|---|---|
| Dano relativo à deflexão na superfície: | Avaliado |
| Dano relativo à tensão admissível no topo do subleito: | Avaliado |

**Modelos:**

Fadiga de Misturas Asfálticas

- *Fonte: Franco (2007)*
- *Fator Campo-Laboratório (fcl): 10000.00*
- *Coeficiente de Regressão (k1): 1.904e-6*
- *Coeficiente de Regressão (k2): -2.821*
- *Coeficiente de Regressão (k3): -0.740*
- *Erro padrão (%): 40*

Fadiga de misturas de solo-cimento

- *Fonte: Ceratti (1991)*
- *Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00*
- *Equação do modelo (1 ou 2): 2*
- *Coeficiente de Regressão (a): 125.63*
- *Coeficiente de Regressão (b): -14.92*
- *Erro padrão (%): 40*

Fadiga de misturas tratadas com cimento

- *Fonte: Trichês, G. (1994)*
- *Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00*
- *Coeficiente de Regressão (a): 14.306*
- *Coeficiente de Regressão (b): -15.753*
- *Erro padrão (%): 40*

Deflexões admissíveis para determinada vida de Fadiga

- *Fonte: Preussler, E.S. (1993)*
- *Fator Campo-Laboratório (fcl): 100.00*
- *Erro padrão (%): 40*

Deformação permanente de Misturas Asfálticas

*- Fonte: UZAN (1982)*
*- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00*
*- Coeficiente de Regressão (μ): 0.300*
*- Coeficiente de Regressão (a): 0.700*

Deformação permanente de Materiais Granulares

*- Fonte: UZAN (1982)*
*- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00*
*- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150*
*- Coeficiente de Regressão (a): 0.950*

Deformação permanente de Solos Lateríticos

*- Fonte: UZAN (1982)*
*- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00*
*- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150*
*- Coeficiente de Regressão (a): 0.950*

Deformação permanente de Solos finos, siltosos ou argilosos

*- Fonte: UZAN (1982)*
*- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00*
*- Coeficiente de Regressão (μ): 0.500*
*- Coeficiente de Regressão (a): 0.800*

## Fatores Climáticos Regionais

Local: **São Luiz**
Mês de Abertura do Tráfego: Junho
Temperatura Média Anual do Ar: 26.179ºC

### Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMMA (ºC)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 26.100 | 25.700 | 25.800 | 25.800 | 25.900 | 25.900 | 25.700 | 26.000 | 26.400 | 26.600 | 27.000 | 26.800 |

## Estrutura do Pavimento

| | Material | Espessura (m) | Coef Poisson | Módulo (MPa) | Parâmetros |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Mistura asfáltica | 0.050 | 0.320 | mod = 3<br>k1 = 3800.000<br>k2 = 0.000<br>k3 = 0.000<br>k4 = 0.000<br>k5 = 0.000 | Tipo de CAP = CAP 50/70<br>Penetração 100g 5s 25ºC 0,1mm = 60.0<br>Ao (visc x T) = 11.123<br>VTSo (visc x T) = -3.713<br>Volume de vazios (%) = 4.5<br>Teor de asfalto (%) = 6.0<br>RBV (%) = 73.5<br>Faixa Granulométrica (DNIT) = Faixa B<br>% passando #3/4 = 90.0<br>% passando #3/8 = 62.5<br>% passando #4 = 44.0<br>% passando #200 = 5.5 |

| | Material | Espessura (m) | Coef Poisson | Módulo (MPa) | Parâmetros |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | Material granular | 0.200 | 0.350 | mod = 1<br>k1 = 500.000<br>k2 = 0.500<br>k3 = 0.000<br>k4 = 0.000<br>k5 = 0.000 | |
| 3 | Material granular | 0.150 | 0.350 | mod = 1<br>k1 = 300.000<br>k2 = 0.500<br>k3 = 0.000<br>k4 = 0.000<br>k5 = 0.000 | |
| 4 | Solo laterítico | 0.400 | 0.400 | mod = 3<br>k1 = 160.000<br>k2 = 0.000<br>k3 = 0.000<br>k4 = 0.000<br>k5 = 0.000 | |
| 5 | Solos finos, siltosos ou argilosos | 0.000 | 0.450 | mod = 3<br>k1 = 53.000<br>k2 = 0.000<br>k3 = 0.000<br>k4 = 0.000<br>k5 = 0.000 | Classificação (DNIT) = Tipo III<br>CBR (%) = 3<br>% Silte na fração fina #200 = 80.0 |

## Dados do Tráfego

Variação lateral do tráfego: 0.30m
% de veículos na faixa de tráfego: 100%
Alinhamento crítico: 0.00m
Distância média entre rodas (SX): 0.324m
Distância média entre eixos (SY): 1.200m

### Distribuição anual do tráfego (%)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 |

### Tráfego previsto

| | Tipo | Rodas | Volume | Taxa | Peso (kgf) | Pressão (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 - Eixo Simples | 1 | 10000 | 0.000 | 6000.00 | 0.800 |
| 2 | 5 - Eixo duplo | 2 | 20000 | 0.000 | 10000.00 | 0.800 |
| 3 | 7 - Dois eixos duplos em tandem | 4 | 15000 | 0.000 | 17000.00 | 0.800 |
| 4 | 8 - Três eixos duplos em tandem | 6 | 11400 | 0.000 | 25500.00 | 0.800 |

## Resumo dos danos

| | Tipo | Deflexão Máxima | Tensão Admissível no SL | Fadiga Revestim Betum X | Fadiga Revestim Betum Y | Fadiga Camada Cimentada X | Fadiga Camada Cimentada Y |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 - Eixo Simples | 2.88 | -1.#J | 51.01 | 92.18 | 0.00 | 0.00 |

*Relatório criado em: 14/06/2017 às 16:11:31*

| | Tipo | Deflexão Máxima | Tensão Admissível no SL | Fadiga Revestim Betum X | Fadiga Revestim Betum Y | Fadiga Camada Cimentada X | Fadiga Camada Cimentada Y |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 5 - Eixo duplo | 30.58 | 0.00 | 70.75 | 404.33 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 7 - Dois eixos duplos em tandem | 48.67 | 0.00 | 92.76 | 476.98 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 8 - Três eixos duplos em tandem | 87.36 | 0.00 | 101.27 | 522.15 | 0.00 | 0.00 |
| | **Totais acumulados (%)** | **169.49** | **-1.#J** | **315.78** | **1495.65** | **0.00** | **0.00** |

## Estimativa de deformação permanente

Deformação permanente acumulada estimada = 2.555cm
Acima do limite aceitável de 1.25cm

*Deformação permanente detalhada por eixo e por camada do pavimento (cm)*

| | Eixo Tipo | Cam 1 | Cam 2 | Cam 3 | Cam 4 | Cam 5 | Total Eixo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 - Eixo Simples | 0.006 | 0.014 | 0.010 | 0.005 | 0.195 | 0.230 |
| 2 | 5 - Eixo duplo | 0.012 | 0.022 | 0.015 | 0.007 | 0.334 | 0.392 |
| 3 | 7 - Dois eixos duplos em tandem | 0.020 | 0.039 | 0.027 | 0.013 | 0.669 | 0.768 |
| 4 | 8 - Três eixos duplos em tandem | 0.027 | 0.056 | 0.039 | 0.019 | 1.024 | 1.166 |
| | Totais acumulados | 0.066 | 0.132 | 0.092 | 0.044 | 2.223 | 2.555 |

## Bacia de deflexão para controle no campo

Equipamento = Viga Benkelman
Raio do Carregamento = 0.108m
Pressão do Carregamento = 0.560m

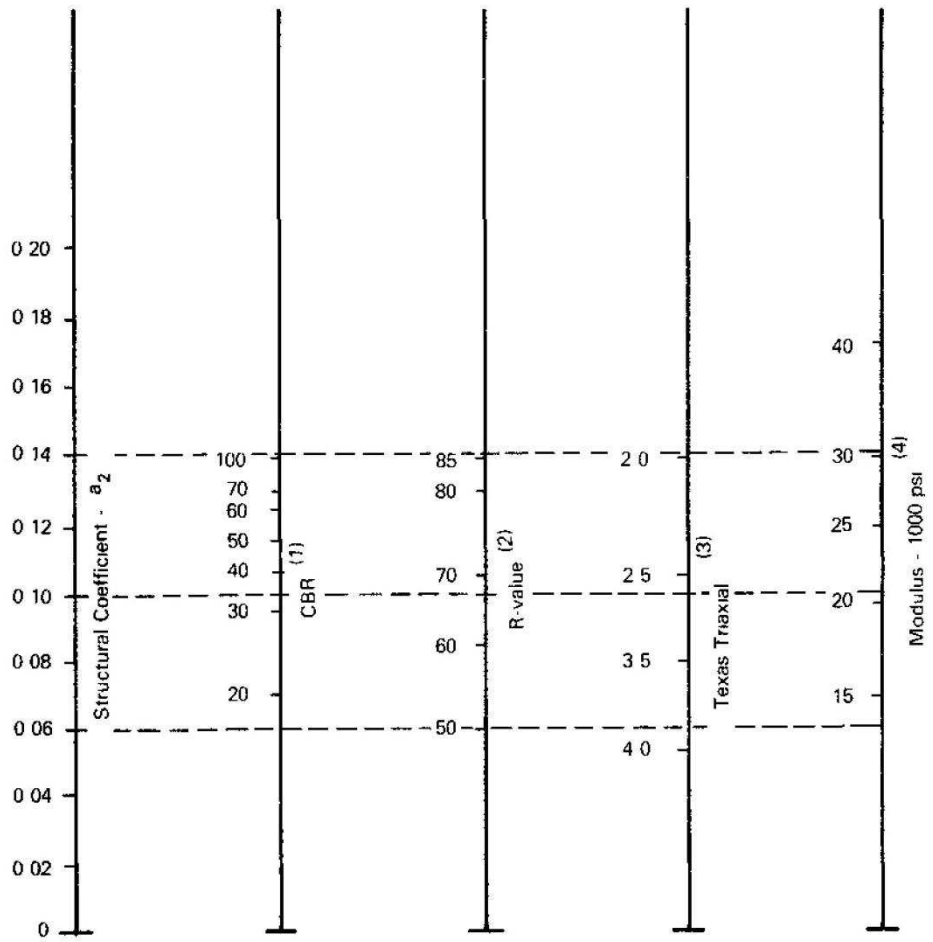
*Deflexões em 0.01mm*

| Sensor 1 0.000m | Sensor 2 0.200m | Sensor 3 0.300m | Sensor 4 0.450m | Sensor 5 0.600m | Sensor 6 0.900m | Sensor 7 1.200m | Sensor 8 1.500m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 102.849 | 72.134 | 53.980 | 36.856 | 28.187 | 20.624 | 16.613 | 13.691 |

# ANEXOS

# ANEXO A – NOMOGRAMA DO COEFICIENTE ESTRUTURAL DE BASES GRANULARES AASHTO 93



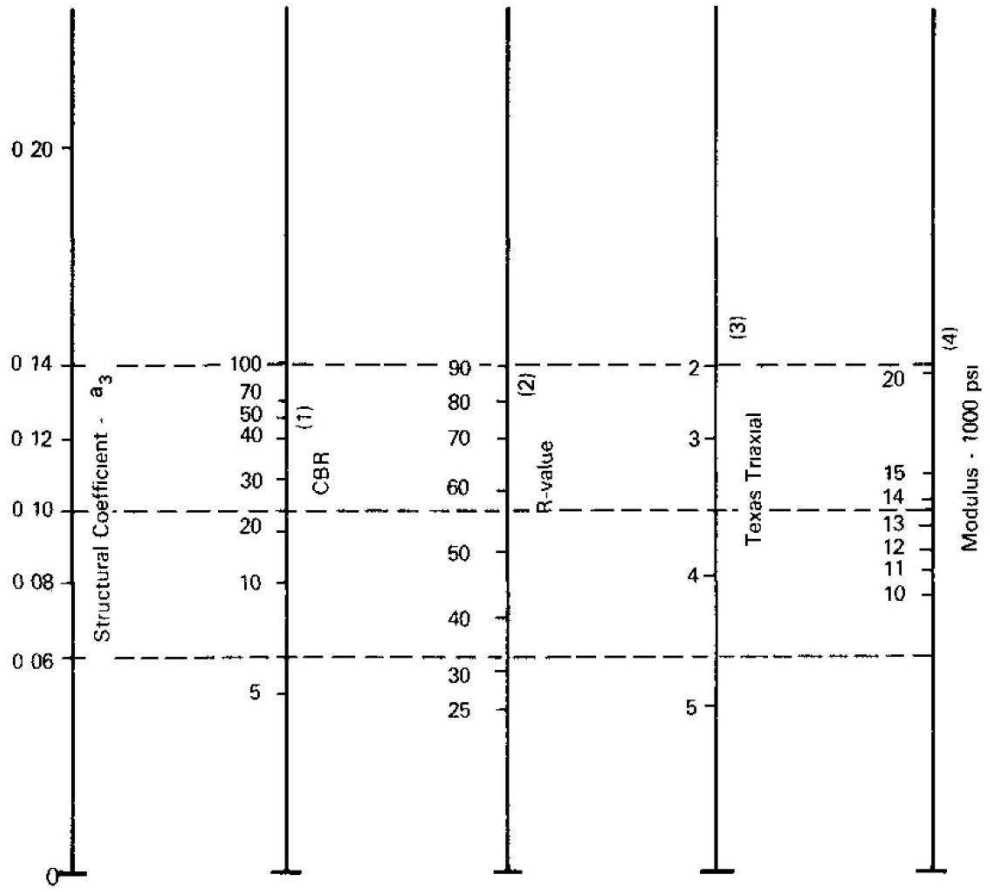



(1) Scale derived by averaging correlations obtained from Illinois
(2) Scale derived by averaging correlations obtained from California, New Mexico and Wyoming
(3) Scale derived by averaging correlations obtained from Texas
(4) Scale derived on NCHRP project *(3)*

**Figure 2.6. Variation in Granular Base Layer Coefficient ($a_2$) with Various Base Strength Parameters (*3*)**

## ANEXO B – NOMOGRAMA DO COEFICIETE ESTRUTURAL DE SUB-BASES GRANULARES AASHTO 93






(1) Scale derived from correlations from Illinois

(2) Scale derived from correlations obtained from The Asphalt Institute, California, New Mexico and Wyoming

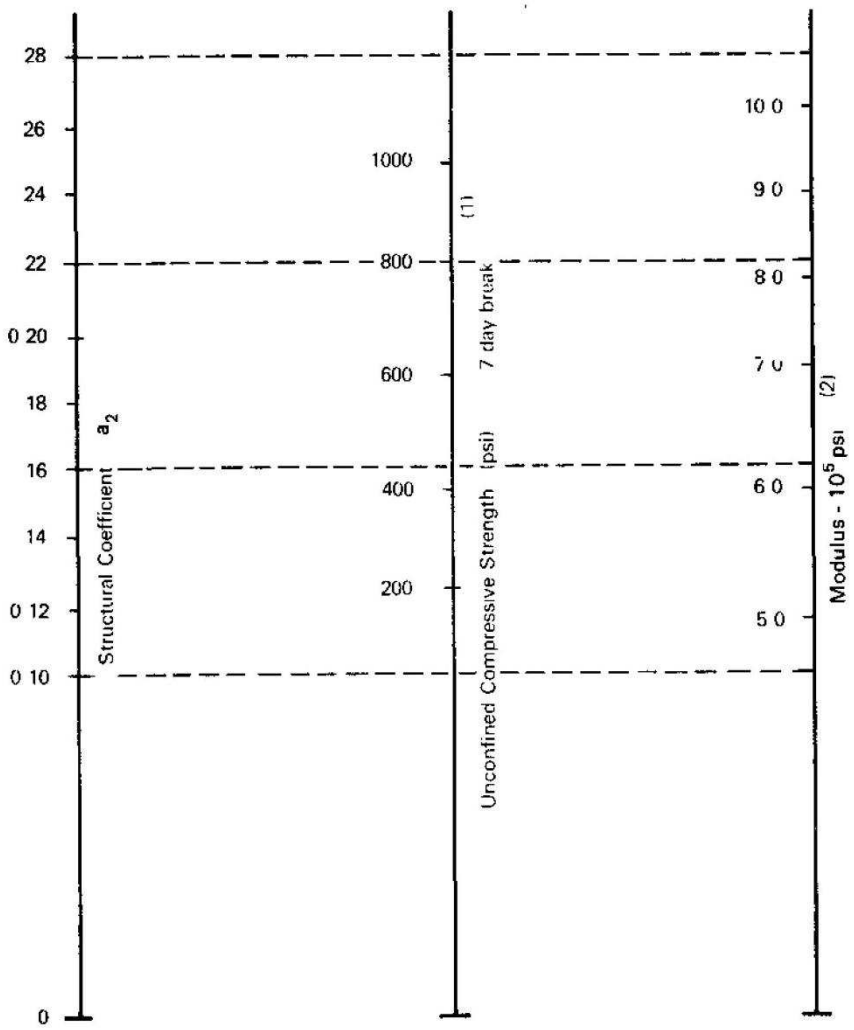
(3) Scale derived from correlations obtained from Texas

(4) Scale derived on NCHRP project *(3)*

**Figure 2.7. Variation in Granular Subbase Layer Coefficient ($a_3$) with Various Subbase Strength Parameters (*3*)**

# ANEXO C – NOMOGRAMA DO COEFICIENTE ESTRUTURAL DE BASES TRATADAS COM CIMENTOS AASHTO 93



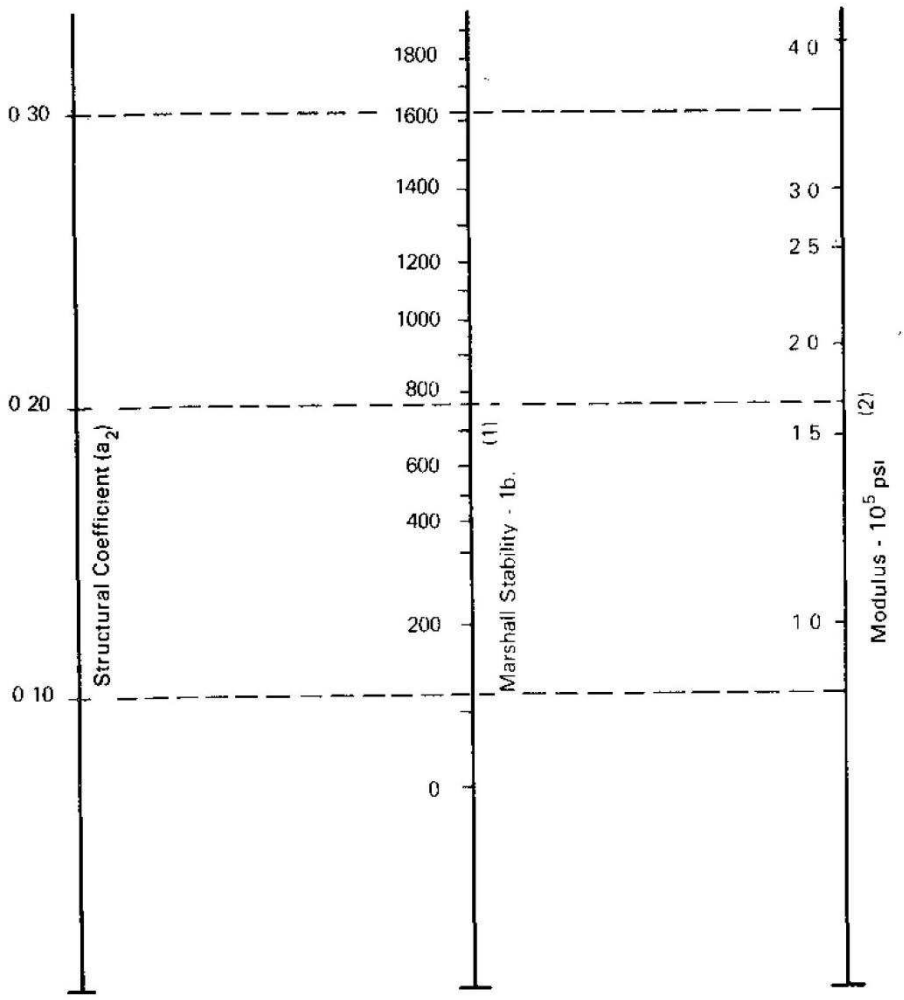



(1) Scale derived by averaging correlations from Illinois Louisiana and Texas
(2) Scale derived on NCHRP project (3)

**Figure 2.8. Variation in a for Cement-Treated Bases with Base Strength Parameter (*3*)**

# ANEXO D – NOMOGRAMA DO COEFICIENTE ESTRUTURAL DE BASES BETUMINOSAS AASHTO 93






(1) Scale derived by correlation obtained from Illinois

(2) Scale derived on NCHRP project (3)

**Figure 2.9. Variation in $a_2$ for Bituminous-Treated Bases with Base Strength Parameter (*3*)**

Nagai, Lucas Kiyoshi Pinheiro.
Comparação entre métodos de dimensionamento de pavimento flexível empíricos e análise mecanicista / Lucas Kiyoshi Pinheiro Nagai. – São Luís, 2017.
129f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'ana.

1. Método do DNIT. 2. Método da AASHTO. 3. ELSYM5. 4. SisPav. I. Título.

CDU 625.87