

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Wagner Dambros Fernandes

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DO BRASIL E O
MÉTODO DA AASHTO**

**Santa Maria, RS
2016**

Wagner Dambros Fernandes

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DO BRASIL E O MÉTODO DA AASHTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht
Coorientador: Prof. Dr. Deividi da Silva Pereira

Santa Maria, RS, Brasil
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dambros Fernandes, Wagner
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DO BRASIL E O
MÉTODO DA AASHTO / Wagner Dambros Fernandes.- 2016.
169 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht
Coorientador: Deividi da Silva Pereira
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2016

1. Dimensionamento Pavimentos 2. Custo 3. Vida Útil 4.
Análise Estatística I. Pivoto Specht, Luciano II. da
Silva Pereira, Deividi III. Título.

Wagner Dambros Fernandes

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DO BRASIL E O MÉTODO DA AASHTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovada em 14 de julho de 2016:

Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)
(Coorientador)

Lélio Antônio Teixeira Brito, PhD. (PUCRS)

Tatiana Cureau Cervo, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a
Minha esposa Andriellen e filha Helena,
Meus pais, Valdemar e Cleuza,
Pelo apoio, amor e carinho.

AGRADECIMENTO

Agradeço:

A Deus por me dar condições para realizar mais uma etapa na vida,

Aos meus familiares:

- Minha esposa, companheira incansável para todas as situações que fizeram parte da realização deste trabalho, sem nunca hesitar em ajudar e estar sempre ao meu lado,

- Minha filha, por compreender minhas ausências, mesmo com sua pouca idade, permanecendo sempre com a alegria contagiante que foi auxílio importante para desenvolver este trabalho.

- Meus pais, por sempre apoiarem os passos a serem dados,

Ao Prof. Luciano, meu orientador, por estar sempre pronto e disponível para auxiliar e responder às minhas perguntas, independentes do dia, horário e local, os inúmeros e-mails respondidos nos finais de semana,

Ao Prof. Deividi, meu coorientador, pelo auxílio e diversas ideias e opiniões para desenvolver e melhorar meu trabalho,

Aos Professores Lélío e Tatiana, por aceitarem fazer parte da avaliação deste trabalho e contribuírem com as melhorias,

Aos colegas Lucas Bueno e Rodrigo Klamt, que muito dispuseram de seus tempos para me auxiliarem e ajudarem no desenvolvimento do trabalho,

A empresa Prime Engenharia e Consultoria, pelo empréstimo do computador com o software AASHTOWare Pavement para realização das análises desta pesquisa,

Aos Professores e Colegas do curso que de uma forma ou outra contribuíram para este trabalho,

Para todos muito obrigado.

RESUMO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DO BRASIL E O MÉTODO DA AASHTO

AUTOR: WAGNER DAMBROS FERNANDES
ORIENTADOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT
COORIENTADOR: DEIVIDI DA SILVA PEREIRA

O Brasil como um país rodoviário, necessita muito de suas rodovias, no entanto, atualmente o país faz uso para dimensionamento de pavimentos de um método desenvolvido em 1966 e atualizado em 1981, pelo Engenheiro Murilo Souza do extinto DNER. Método este que seu principal fundamento de dimensionamento está no CBR, baseando-se no método empírico. Desta forma, juntamente à crescente frota do país e com o surgimento de alguns trabalhos de cunho mecanístico-empírico, este trabalho tem como objetivos, fazer a análise de um pavimento por meio do Método do DNIT e do uso do software SisPavBR desenvolvido por Felipe Franco em seus estudos que iniciaram em 2007 em sua tese, realizando o ajuste e calibração de alguns modelos de previsão de desempenho. Da mesma forma, foi utilizado também o software AASHTOWare Pavement desenvolvido pela AASHTO, bem como a determinação da espessura da camada de revestimento necessária para atender as solicitações impostas aos pavimentos por meio dos métodos mecanísticos-empíricos. Para isto, foi então feito uso da contagem de veículos realizados para BR116, no entanto, foi necessário criar faixas de volume de tráfego (N), devido o método do DNIT não considerar o arranjo dos eixos que o SisPavBR e AASHTO fazem em suas avaliações. Foi realizado também o levantamento do custo executivo do km de pavimento dimensionado por cada método, e uma análise estatística foi realizada por meio da AASHTO com variações nas espessuras do revestimento, base, sub-base, módulos de resiliência da base, sub-base, subleito e o volume de tráfego, para determinar quais destas variáveis causam maior interferência nos critérios de desempenho. Desta maneira, verificou-se que o pavimento dimensionado pelo DNIT necessita de uma espessura de revestimento de 12,5 cm, o SisPavBR necessita de 19,5 cm e a AASHTO precisou de 40 cm, da mesma forma que o custo do pavimento foi mais elevado para o dimensionamento da AASHTO e o DNIT e SisPavBR tiveram custos mais próximos. A vida de projeto do pavimento do DNIT ficou bem abaixo do esperado em ambas as análises, chegando em um caso durar apenas 2 meses. A análise estatística determinou 5 equações para determinação dos mecanismos de deterioração com R^2 acima de 0,85; foi possível determinar que as principais variáveis que influenciam no desempenho dos pavimentos flexíveis são o volume de tráfego e a espessura do revestimento.

Palavras-chaves: Dimensionamento Pavimentos. Custo. Vida Útil. Análise Estatística.

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THE FLOORS SCALING METHODS OF BRAZIL AND THE FLEXIBLE APPROACH AASHTO

AUTHOR: WAGNER DAMBROS FERNANDES
SUPERVISOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT
COSUPERVISOR: DEIVIDI DA SILVA PEREIRA

The Brazil as a country road, which needs much its highways, however, currently the country uses for PAVEMENT scaling of a method developed in 1966 and updated in 1981 by Murilo Souza Engineer extinct DEER. The method that your main idea it is sizing foundation which is in the CBR, based on the empirical method. This way , along the growing fleet of the country and the emergence of some works of mechanistic-empirical nature, this work aims to make the analysis of a pavement through DNIT method and software use SisPavBR developed by Felipe Franco in their studies that began in 2007 in his thesis, making the adjustment and calibration of some performance prediction models .Similarly, We also did the use the AASHTOWare Pavement software developed by AASHTO as well as determining the thickness of the coating layer required to meet the demands imposed on the floor by means of mechanistic and empirical methods. For this, was then done using vehicle counting performed to BR116, however, they were necessary to create traffic volume of tracks (N) due DNIT method does not consider the arrangement of axes that SisPavBR and AASHTO are in their reviews .It was also conducted a survey of the executive cost km deck sized for each method, and statistical analysis was performed by AASHTO with variations in thickness of the coating base, subbase, base resilience modules, sub-base, subgrade and the volume of traffic to determine which of these variables cause greater interference on performance criteria. Thus, it was found that the surface scaled by DNIT need a coating thickness of 12.5 cm, the need SisPavBR 19.5 cm and 40 cm AASHTO needed, as the cost of the pavement was more higher for the dimensioning and AASHTO DNIT and SisPavBR had closest costs. The life time of DNIT pavement scaling was well below expectations in both analyzes, arriving in a case last only two months. Statistical analysis determined five equations to determine the deterioration mechanisms with R^2 above 0.85; it was determined that the major variables that affect the performance of flexible pavements are traffic volume and thickness of the coating.

Keywords: Pavement Design. Cost. Lifespan. Statistical analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura do pavimento	33
Figura 2 - Sistema de camadas e tensões impostas ao pavimento.....	34
Figura 3 - Distribuição de tensões verticais devido à passagem da roda	37
Figura 4 - Esforços da carga externa superficial um ponto do semi-espaço elástico	37
Figura 5 - Processo de seleção de estruturas de pavimentos	40
Figura 6 - Esquema do procedimento de dimensionamento mecanístico – empírico de um pavimento flexível	41
Figura 7 - Formato dos eixos predominantes no país.....	43
Figura 8 - Aplicação gráfica da Hipótese de Miner	48
Figura 9 - Característica da função de danos híbridos e comparação com a regra de Miner e da teoria Henry.....	49
Figura 10 - Esquema camadas do pavimento em relação às camadas equivalentes	54
Figura 11 - Ábaco espessura do pavimento dado pelo valor de N e o CBR ...	55
Figura 12 - Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos de Franco (2007).....	59
Figura 13 - Esquema de camadas	63
Figura 14 - Fluxograma básico do sistema MEPDG (2004).....	66
Figura 15 - Escala de avaliação da serventia das rodovias	67
Figura 16 - Faixas de Variação do IRI conforme o caso e situação.....	69
Figura 17 - Medição do perfil da rodovia.....	69
Figura 18 - Fluxograma de Atividades	77
Figura 19 - Tela inicial SisPavBR	84
Figura 20 - Opção para alteração das camadas	85
Figura 21 - Interface de alteração das características das camadas.....	86
Figura 22 - Aba modelagem	86
Figura 23 - Tela de entrada dos dados de carregamento	87
Figura 24 - Interface de escolha do clima	88
Figura 25 - Tela inicial do AASHTOWare	89
Figura 26 - Tela de um projeto novo	90

Figura 27 - Dados iniciais do tipo de pavimento.....	90
Figura 28 - Condicionantes a serem avaliadas pelo AASHTOWare	91
Figura 29 - Tela de entrada de dados do tráfego	92
Figura 30 - Tela de informações do volume de tráfego	93
Figura 31 - Entrada do percentual de veículos por classe e crescimento	93
Figura 32 - Tela dos valores do percentual de VDM com relação mensal	94
Figura 33 - Entrada do espectro de eixos	94
Figura 34 - Entrada do percentual de carga das classes em relação mensal	95
Figura 35 - Interface de escolha do local e condições climáticas.....	96
Figura 36 - Comparativo entre a temperatura de Porto Alegre e Savannah ..	97
Figura 37 - Comparativo entre a precipitação em Porto Alegre e Savannah .	98
Figura 38 - Tela de entrada com estrutura do pavimento.....	99
Figura 39 - Escolha do material e suas características	99
Figura 40 - Entrada dos limites de Atterberg e percentuais de material passante em cada peneira.....	100
Figura 41 - Interface de aderência entre camadas.....	101
Figura 42 - Estrutura do pavimento de referência e composição das camadas	104
Figura 43 - Espessura revestimento para subleito com MR de 53 MPa.....	116
Figura 44 - Espessura revestimento para subleito com MR de 110 MPa.....	117
Figura 45 - Espessura revestimento para subleito com MR de 124 MPa.....	117
Figura 46 - Custo do pavimento para subleito com MR de 53 MPa	121
Figura 47 - Custo do pavimento para um subleito com MR de 110 MPa	121
Figura 48 - Custo do pavimento para subleito com MR de 124 MPa	122
Figura 49 - Vida útil do pavimento dimensionado pelo DNIT e avaliado seu desempenho pelo SisPavBR e AASHTO.....	130
Figura 50 - Valores obtidos x previstos para IRI	135
Figura 51 - Valores obtidos x previstos para deformação total pavimento...	137
Figura 52 - Valores obtidos x previstos para trincamento no revestimento <i>bottom-up</i>	139
Figura 53 - Valores obtidos x previstos para trincamento revestimento <i>top- down</i>	141
Figura 54 - Valores obtidos x previstos para deformação permanente do revestimento	143

Figura 55 - Valores observados x previstos do IRI (3ª ordem)	146
Figura 56 - Valores observados x previstos deformação total pavimento (3ª ordem).....	149
Figura 57 - Valores observados x previstos trincamento revestimento de baixo para cima (3ª ordem).....	152
Figura 58 - Valores observados x previstos trincamento revestimento de cima para baixo (3ª ordem).....	155
Figura 59 - Valores observados x previstos deformação revestimento	158

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Configuração de eixos	45
Quadro 2 - Fator de equivalência de cargas DNER.....	46
Quadro 3 - Fator de equivalência de cargas AASTHO	47
Quadro 4 - Características dos materiais do pavimento	53
Quadro 5 - Considerações sobre a pista experimental AASHTO	60
Quadro 6 - Classes de medição de irregularidade.....	70
Quadro 7 - Variáveis com maior influência nos critérios de desempenho	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 - Cargas máximas legais permitidas no país	42
Tabela 3 - Cargas encontradas nos estudos na BR 101 SC	42
Tabela 3 - Classificação funcional da via ou confiabilidade	52
Tabela 4 - Faixas granulométricas materiais granulares	54
Tabela 5 - Tipo de revestimento em relação aos valores de N e espessuras mínimas.....	56
Tabela 6 - Coeficiente de equivalência estrutural DNIT	57
Tabela 7 - Coeficiente de equivalência estrutural	62
Tabela 8 – Coeficientes de drenagem	63
Tabela 9 - Espessuras mínimas AASHTO.....	64
Tabela 10 – Ordem de grandeza dos critérios de ruptura da AASHTO (2008)	65
.....	
Tabela 11 – Modelos de previsão dos danos e fatores de calibração destes modelos da AASHTO (2008).....	65
Tabela 12 – Modelos de Previsão de Desempenho	73
Tabela 13 – Número de combinações a serem analisadas	78
Tabela 14 – Casos em estudo	79
Tabela 15 – Volume de tráfego de 2013 para cada categoria da BR 116	80
Tabela 16 – Fatores de equivalência de carga da USACE.....	80
Tabela 17 – Espectro de eixos de cada categoria	81
Tabela 18 – Valores de N utilizados na pesquisa	81
Tabela 19 – Cargas por eixo para cada situação	82
Tabela 20 – Percentuais VDM (BR 116) atual utilizados para atingir os valores de “N”	82
Tabela 21 – Estrutura do pavimento usado para dimensionamento	83
Tabela 22 – Limites Critério de Desempenho DNIT (2006b)	92
Tabela 23 – Distância média de transporte para levantamento de custos ...	102
Tabela 24 – Custo transporte materiais betuminosos.....	102
Tabela 25 – Custo materiais betuminosos.....	103
Tabela 26 – Composição custo CBUQ	103
Tabela 27 – Composição custo pintura de ligação	104
Tabela 28 – Composição custo imprimação	105

Tabela 29 – Composição custo camada BGS.....	105
Tabela 30 – Composição custo camada MS.....	105
Tabela 31 – Composição custo camada bloqueio.....	106
Tabela 32 – Composição custo camada TSD.....	106
Tabela 33 – Custo unitário final para pavimento.....	106
Tabela 34 – Espessuras do pavimento.....	108
Tabela 35 – Espessuras do Pavimento para N de $2,5 \times 10^6$ pelo SisPavBR .	109
Tabela 36 – Espessuras do Pavimento para N de $7,5 \times 10^6$ pelo SisPavBR .	109
Tabela 37 – Espessuras do Pavimento para N de $2,5 \times 10^7$ pelo SisPavBR .	110
Tabela 38 – Espessuras do Pavimento para N de $7,5 \times 10^7$ pelo SisPavBR .	110
Tabela 39 – Espessuras do Pavimento para N de $1,0 \times 10^8$ pelo SisPavBR .	110
Tabela 40 – Estrutura pavimento para N de $2,5 \times 10^6$ confiabilidade 90%.....	111
Tabela 41 – Estrutura do pavimento para N de $7,5 \times 10^6$ confiabilidade 90%	112
Tabela 42 – Estrutura do pavimento para N de $2,5 \times 10^7$ confiabilidade 90%	112
Tabela 43 – Espessuras do Pavimento N de $2,5 \times 10^6$ - AASHTO confiabilidade 50%.....	113
Tabela 44 – Espessuras do Pavimento N de $7,5 \times 10^6$ - AASHTO confiabilidade 50%.....	114
Tabela 45 – Espessuras do Pavimento N de $2,5 \times 10^7$ - AASHTO confiabilidade 50%.....	114
Tabela 46 – Espessuras do Pavimento para N de $7,5 \times 10^7$ pela AASHTO...	115
Tabela 47 – Custo do km do pavimento para N de $2,5 \times 10^6$	118
Tabela 48 – Custo do km do pavimento para N de $7,5 \times 10^6$	119
Tabela 49 – Custo do km do pavimento para N de $2,5 \times 10^7$	119
Tabela 50 – Custo do km do pavimento para N de $7,5 \times 10^7$	120
Tabela 51 – Custo do km do pavimento para N de $1,0 \times 10^8$	120
Tabela 52 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $2,5 \times 10^6$ pelo SisPavBR.....	123
Tabela 53 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $7,5 \times 10^6$ pelo SisPavBR.....	124
Tabela 54 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $2,5 \times 10^7$ pelo SisPavBR.....	124
Tabela 55 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $7,5 \times 10^7$ pelo SisPavBR.....	125

Tabela 56 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $1,0 \times 10^8$ pelo SisPavBR	125
Tabela 57 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $2,5 \times 10^6$ pela AASHTO.....	126
Tabela 58 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $7,5 \times 10^6$ pela AASHTO.....	127
Tabela 59 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $2,5 \times 10^7$ pela AASHTO.....	127
Tabela 60 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $7,5 \times 10^7$ pela AASHTO.....	128
Tabela 61 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $1,0 \times 10^8$ pela AASHTO.....	128
Tabela 62 – Custo Pavimento DNIT para durabilidade 10 anos conforme SisPavBR e AASHTO	132
Tabela 63 – Coeficientes obtidos para regressão linear dos valores do IRI .	134
Tabela 64 – Coeficientes obtidos para regressão linear dos valores da Deformação Total Pavimento	136
Tabela 65 – Coeficientes obtidos para regressão linear dos valores do trincamento no revestimento de baixo para cima	138
Tabela 66 – Coeficientes obtidos para regressão linear dos valores do trincamento no revestimento de cima para baixo	140
Tabela 67 – Coeficientes obtidos para regressão linear dos valores da deformação do revestimento	142
Tabela 68 – Coeficientes de regressão linear do IRI	144
Tabela 69 – Coeficientes de regressão linear deformação total pavimento..	147
Tabela 70 – Coeficientes de regressão linear trincamento de baixo-cima revestimento.....	150
Tabela 71 – Coeficientes de regressão linear trincamento de cima para baixo revestimento.....	153
Tabela 72 – Coeficientes de regressão linear deformação do revestimento	156

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO: *American Association of State Highway Officials*

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

ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ATR: Afundamento na Trilha de Roda

BGS: Brita Graduada Simples

CA: Concreto Asfáltico

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR: *California Bearing Ratio* (Índice de Suporte Califórnia)

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CDC: Coordenadoria de Defesa da Concorrência

CNT: Confederação Nacional do Transporte

CONTRAN: Conselho Nacional de Trânsito

CTB: Código de Trânsito Brasileiro

D: Percentual de resistência

D_i : Espessura da camada

DN: Dano Crítico

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

Dpr: Deformação Permanente do Revestimento

D_{tp} : Deformação Total Permanente do Pavimento

E: Módulo de Elasticidade

ECOSUL: Empresa Concessionária de Rodovias do Sul

E_{bas} : Espessura Base

E_{rev} : Espessura Revestimento

ESRD: Eixo Simples de Rodas Duplas

ESRS: Eixo Simples de Rodas Simples

E_{sub} : Espessura Sub-base

ETD: Eixo Tandem Duplo

ETT: Eixo Tandem Triplo

FR: Fator de Clima

Fd: Fator de distribuição

FEC: Fator de Equivalência de Cargas
Ff: Fator de frota
FGV: Fundação Getúlio Vargas
Fv: Fator de Veículo
Fs: Fator de sentido
FWD: *Falling Weigth Deflectometer*
HDM: *Highway Design Management*
ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IG: Índice de grupo
IP: Imprimação
IRI: *International Roughness Index* (Índice de Rugosidade Internacional)
kN: Quilonewton
LL: Limite de Liquidez
LDI: Lucros e Despesas Indiretas
MCT: Miniatura Compactação Tropical
 m_i : Coeficiente de drenagem da camada
MR: Módulo de Resiliência
 Mr_{bas} : Módulo de Resiliência Base
 Mr_{sl} : Módulo de Resiliência Subleito
 Mr_{sub} : Módulo de Resiliência Sub-base
MPa: Megapascal
MS: Macadame Seco
N: Número N de eixos padrões
 N_a : Número de eixos – padrão que podem provocar deformação
SICRO: Sistema de Custos Rodoviários
SN: Número estrutural
tf: Toneladas Força
Tbc: Trincamento *Bottom-up*
Tcb: Trincamento *Top-down*
TS: Tratamento superficial
TSD: Tratamento Superficial Duplo
USACE: *United States Army Corps of Engineers*
VDM: Volume Médio Diário

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
1.1 OBJETIVO GERAL	31
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	32
2 REVISÃO DE LITERATURA	33
2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	33
2.1.1 Estrutura das camadas do pavimento	33
2.2.1.1 Subleito.....	34
2.2.1.2 Reforço subleito	35
2.2.1.3 Sub-base.....	35
2.2.1.4 Bases.....	35
2.2.1.5 Revestimento asfáltico	35
2.2 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS.....	36
2.3 TRÁFEGO.....	41
2.3.1 Eixos	42
2.3.2 Tipos de veículos e classificação para os eixos	43
2.3.3 Equivalência de cargas (FEC)	44
2.3.4 Hipótese de Miner	47
2.4 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	49
2.4.1 Método de Dimensionamento DNIT	52
2.4.2 Método de Dimensionamento Proposto por Franco (2007)	57
2.4.3 Método de Dimensionamento da AASHTO	59
2.4.3.1 Método AASHTO 1993	59
2.4.3.2 Método AASHTO 2008	64
2.5 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DOS PAVIMENTOS	66
2.5.1 IRI (<i>International Roughness Index</i>)	68
2.5.2 Deformação	70
2.5.3 Trincamento	71
2.6 SOFTWARE SISPAVBR.....	72
2.7 SOFTWARE AASHTOWARE PAVEMENT.....	72
2.8 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO.....	73
3 METODOLOGIA	77

3.1 PLANEJAMENTO.....	77
3.1.1 Estudo comparativo.....	78
3.1.2 Estudo estatístico por meio AASHTOWare	78
3.2 TRÁFEGO DE REFERÊNCIA	79
3.3 ESTRUTURA DO PAVIMENTO UTILIZADO.....	83
3.4 UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE SISPAVBR	83
3.5 UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE AASHTOWARE	89
3.6 CÁLCULO DO CUSTO DO PAVIMENTO	101
3.7 SOFTWARE STATISTICA.....	107
4 RESULTADOS	108
4.1 DIMENSIONAMENTO	108
4.1.1 Dimensionamento pelo Método DNIT.....	108
4.1.2 Dimensionamento pelo SisPavBR.....	109
4.1.3 Dimensionamento pelo Método da AASHTO.....	113
4.1.4 Comparativo entre as espessuras de revestimento e custos executivos	116
4.2 ANÁLISE DESEMPENHO DO PAVIMENTO PELO SISPAVBR E AASHTO.....	123
4.2.1 Análise do pavimento por meio do SisPavBR.....	123
4.2.2 Análise do pavimento por meio da AASHTO.....	126
4.3 ESTUDO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS DO AASHTOWARE PAVEMENT	133
4.4 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	159
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	161
5.1 CONCLUSÕES	161
5.2 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS	162
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163

1 INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta atualmente uma malha rodoviária numa extensão de 1.720.607 km, onde destes são pavimentados apenas 213.299 km, ou seja, 12,4% do total. Porém, as rodovias brasileiras foram classificadas segundo o índice de competitividade global do Fórum Econômico Mundial, onde participaram 144 países e receberam notas entre 1 e 7 onde representam, extremamente subdesenvolvida (entre as piores do mundo) e extensa e eficiente (entre as melhores do mundo), o Brasil recebeu nota 2,8 e ficou na posição 122º (CNT, 2014).

Já no ano seguinte com a análise de 140 países o Brasil passou para posição 121º com a nota 2,7 (CNT, 2015). Além das rodovias estarem em condições não muito adequadas, a frota total brasileira segundo CNT (2015) aumentou em 118%, ou seja, os pavimentos executados em 2005, com taxas de crescimento baixas, hoje estão com mais do dobro de frota rodando sobre estes.

Mesmo com o Brasil tendo no seu modo de transporte o predomínio do sistema rodoviário, o país tem um histórico de carências no que se refere à infraestrutura. Na década de 50, o governo Kubistschek impulsionou a primeira grande expansão da malha viária do Brasil, no entanto, a partir da segunda metade dos anos de 1980, com a crise econômica e a extinção do Fundo Rodoviário Nacional, o crescimento da malha foi mínimo. Porém este cenário começou mudar com as implantações de obras do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) (MATTOS, 2014).

Como o PAC disponibiliza recursos para recuperação e expansão da malha viária, o dimensionamento de pavimentos flexíveis voltou a ocupar um espaço de suma importância para situação de evolução do sistema (MATTOS, 2014).

Porém, o mecanismo oficial de dimensionamento de pavimentos flexíveis adotado no Brasil para conjuntura de concepção de pavimentos é fundamentada no Índice de Suporte Califórnia (CBR – *California Bearing Ratio*), consistindo em um método empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis desenvolvido em 1966 pelo extinto DNER, atual DNIT (FRANCO, 2007).

Este método se baseia em regras desenvolvidas a partir de observações e experiência com certos tipos de pavimentos, para certos materiais de pavimentação e condições específicas de clima. Este método empírico apresenta várias situações

que são tratadas de forma simplificada. Sua maior limitação está em não poder ser generalizado com confiabilidade adequada para outras condições senão àquelas para o qual foi desenvolvido, levando a uma análise superficial sobre a situação e especificidades das diversas variáveis que influenciam no desempenho funcional e estrutural de um pavimento (FRANCO, 2007; COUTINHO, 2011; MATTOS, 2014).

Para sanar algumas dessas defasagens criadas pelos mecanismos empíricos vêm se tentando aprimorar o desenvolvimento de métodos mecanístico-empírico, onde se considera fatores de laboratório/campo. Assim estes fatores podem ser ajustados com as características dos materiais, estruturas, tráfego e clima. Como os trabalhos de Franco a partir de 2007 no SIS Pav, com sistema especificamente brasileiro, e o AASHTOWare desenvolvido a partir de 2002 pela AASHTO para os pavimentos Americanos (BEVENIDES *et al*, 2000; MATTOS, 2014).

Estas análises buscam o entendimento mais analítico do problema e tentam com isso, reduzir a parcela do empirismo. No sistema analítico, o pavimento é tratado como uma estrutura de engenharia e seu comportamento mecânico é avaliado em função do carregamento e da resistência dos materiais, assim como é feito com as estruturas de aço ou concreto. Relacionando as tensões de tração na base da camada asfáltica com a formação de trincas no revestimento do pavimento ou as deformações verticais com o desenvolvimento do afundamento de trilha de roda (MOTTA, 1991).

A maioria dessas teorias não modela alguns fatores no dimensionamento de um sistema em camadas, em que as propriedades variam com o tempo e com as condições ambientais, e que tem a deterioração acumulada com a passagem das cargas variáveis em intensidade, distribuição e velocidade. Por isso a parcela de empirismo acaba sendo inevitável, com a aplicação dos fatores de calibração laboratório-campo sobre os modelos desenvolvidos em laboratório (MOTTA, 1991; FRANCO, 2007).

Segundo Mattos (2014), existem vários softwares que se propõem à análise mecanística – empírica de pavimentos, no entanto, os modelos de degradação precisam ser calibrados, para que se possa empregar com confiabilidade os resultados de ensaios de laboratórios e de análises mecanísticas na previsão de fadiga da camada asfáltica, evolução das deformações permanentes (ATR) e irregularidade longitudinal (IRI) na superfície do pavimento, ao mesmo tempo considerando os aspectos estruturais e funcionais de serventia e de segurança.

Ferreira (2013) em seu trabalho teve como objetivo estudar o método de dimensionamento mecanístico-empírico expresso no programa SisPav, desenvolvido na COPPE/UFRJ por Filipe Franco, em 2007 e atualizado em 2013 com o programa SisPavBR, dentro do desenvolvimento da pesquisa da Rede Temática de Asfalto – COPPE/CENPES. No estudo foi possível concluir que o método empírico do DNIT também não tira proveito dos materiais das camadas do pavimento, já os modelos mecanístico-empíricos de desempenho de pavimentos, apesar da parcela empírica ainda presente, tiram maior proveito dos materiais, podendo levar a configurações julgadas impróprias pelo método do DNIT. Um exemplo disso é a utilização de solos tropicais lateríticos nas camadas dos pavimentos.

Conhecer as diferenças entre os métodos de dimensionamento, e o tamanho desta diferença, pode gerar resultados de grande valia econômica para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, para que se caminhe em direção contrária ao dimensionamento empírico, ou seja, conhecer melhor como a estrutura do pavimento tende a se comportar para determinada situação. A possibilidade de chegar ao sistema estrutural mais adequado para atender as solicitações impostas pelos carregamentos crescentes ano a ano, de forma a se ter economia para execução deste sistema e maior durabilidade.

1.1 OBJETIVO GERAL

Comparar os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, do DNIT (1981), proposto por Franco (2007) e AASHTO (2008), efetuando a análise de cada método, bem como obter dados estatísticos do comportamento dos pavimentos flexíveis por meio do software AASHTOWare Pavement.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Submeter a estrutura de pavimento obtido por meio do dimensionamento do DNIT, aos modelos propostos pelo método de dimensionamento de Franco (2007), através do software SisPavBR;

Submeter a estrutura de pavimento obtido por meio do dimensionamento do DNIT, aos modelos propostos pelo método de dimensionamento da AASHTO (2008), através do software AASHTOWare Pavement;

Determinar a espessura de revestimento necessária para atender as cargas impostas, por meio da análise do SisPavBR;

Determinar a espessura de revestimento necessária para atender as cargas impostas, por meio da análise do AASHTOWare;

Comparar as estruturas obtidas por meio do dimensionamento do DNIT, SisPavBR e AASHTO;

Identificar os parâmetros que influenciam no comportamento dos pavimentos flexíveis por meio de análise estatística com o método executado no software AASHTOWare Pavement.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido nas unidades:

- Unidade 1: apresenta introdução e objetivos que nortearam o desenvolvimento do trabalho;

- Unidade 2: revisão de literatura, que traz conceitos, estudos e trabalhos já realizados que nortearam o desenvolvimento dos métodos;

- Unidade 3: metodologia demonstra e explica como foram realizadas as atividades para obter os dados e resultados;

- Unidade 4: resultados estão contidos os valores, equações e observações realizadas e obtidos no desenvolvimento do estudo do trabalho;

- Unidade 5: considerações finais selecionam as principais e mais importantes conclusões obtidas ao longo dos resultados, bem como sugestões para futuras pesquisas que possam vir a aprimorar e refinar os resultados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

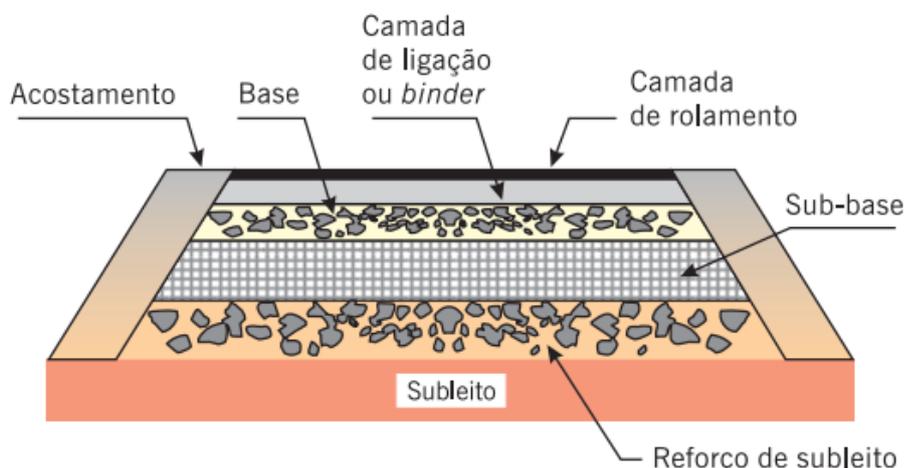
Para o DNIT (2006a) o pavimento é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentados sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito (infraestrutura ou terreno de fundação) a qual é designada de subleito.

Na NBR 7207 (1982) o pavimento é definido como uma estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais, melhorar as condições de rolamento e resistir aos esforços horizontais.

2.1.1 Estrutura das camadas do pavimento

Para Balbo (2007) a estrutura do pavimento não é perpétua, sendo formado por camadas de diferentes materiais compactados partindo do subleito do corpo da rodovia, atendendo estruturalmente e operacionalmente ao tráfego, de forma durável e com menor custo, levando em conta a cronologia para os serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação. O pavimento asfáltico é formado por cinco camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base, reforço do subleito e subleito (YODER & WITCZAK; 1975), conforme mostra da Figura 1.

Figura 1 - Estrutura do pavimento



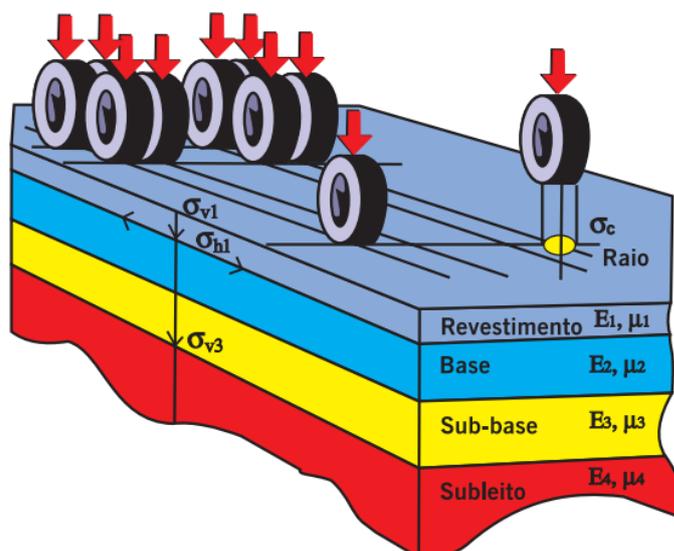
Os pavimentos asfálticos são compostos pelo revestimento, que é formado por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento, que está em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação (binder). Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas (PAPAGIANNAKIS & MASAD, 2007; BERNUCCI *et. al.* , 2010).

As camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural, pois precisam limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento, por meio de combinações entre os materiais e as espessuras das camadas constituintes (MEDINA, 1997; HUANG, 2004). A Figura 2 ilustra o sistema de camadas e as tensões impostas ao pavimento.

2.2.1.1 Subleito

O subleito é formado por material natural consolidado e compactado, ou por material de empréstimo compactado. Os esforços que são impostos a sua superfície serão absorvidos em sua profundidade, geralmente isto acontece no primeiro metro. Desta forma, as camadas superiores deverão absorver as maiores solicitações de esforços (BALBO, 2007; BRANCO, 2006).

Figura 2 - Sistema de camadas e tensões impostas ao pavimento



2.2.1.2 Reforço subleito

A camada de reforço do subleito se aplica para que a fundação tenha maior capacidade de resistência e ajude as camadas superiores, ou seja, aliviando a magnitude dos esforços impostos a esta. Para evitar custos mais elevados com camadas muito espessas de base e sub-bases, se faz uso de camada de reforço do subleito nos casos em que o solo de subleito é de baixa capacidade (BALBO, 2007; BRANCO, 2006).

2.2.1.3 Sub-base

Tem por finalidade diminuir a espessura da camada de base, ou seja, quando as condições de solicitações à camada de base resultar em uma camada muito espessa é realizada a divisão desta, aplicando a camada de sub-base que resulta em valores menores de custo. Os materiais utilizados podem ser os mesmos utilizados nas bases, quando há a utilização de aglomerantes o consumo de material é menor (BALBO, 2007; BRANCO, 2006).

2.2.1.4 Bases

As bases têm como finalidade receber as solicitações que são transmitidas do revestimento e também possui a função hidráulica no caso de materiais granulares. Podendo ser composta de solo estabilizado naturalmente e quimicamente, misturas de solos e agregados, brita graduada e brita graduada tratada com cimento (BALBO, 2007; BRANCO, 2006).

2.2.1.5 Revestimento asfáltico

Os revestimentos asfálticos devem receber as cargas estáticas e dinâmicas impostas sem sofrer elevadas deformações elásticas ou plásticas, desagregação dos componentes e perda de compactação. Devendo ser constituído de uma estrutura interna evitando a movimentação horizontal. Para os revestimentos asfálticos novos existe uma subdivisão em duas camadas, a camada de rolamento que consiste na camada superficial que receberá o contato direto das cargas e

ações do ambiente, e a camada de ligação (binder) que também é constituída de mistura asfáltica e está entre a camada de rolamento e a base, agindo como camada impermeável (BALBO, 2007; BRANCO, 2006).

2.2 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS

A estrutura de um pavimento asfáltico é submetida a um carregamento superficial distribuído em uma área circular, aproximadamente uma elipse e as suas dimensões dependem do tipo de pneu, pressão de enchimento e da carga que a roda submete ao pavimento (BRANCO, 2006; FRANCO, 2007; PAPAGIANNAKIS & MASAD, 2007). Assim, no dimensionamento de pavimentos a aproximação da área ao círculo traz a equação para área de contato entre pneu – pavimento pela equação 1.

$$A = \frac{P}{p} \quad (1)$$

Onde: A é a área de contato entre o pneu – pavimento;

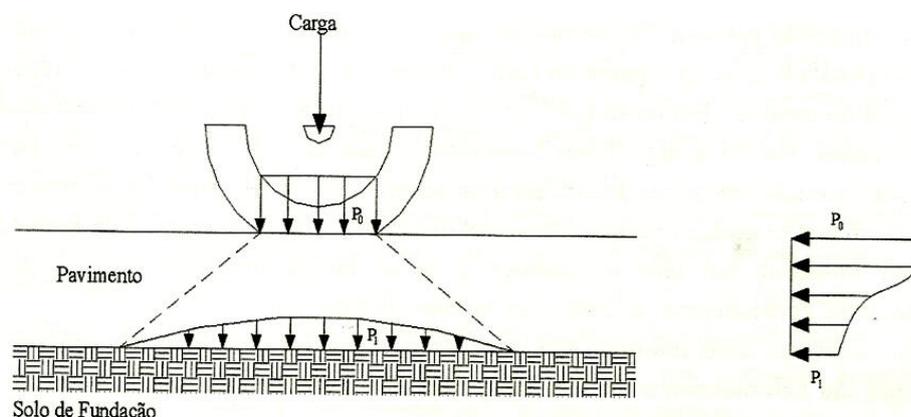
P é a carga por roda;

p é a pressão de enchimento do pneu.

A Figura 3 demonstra o esquema dos carregamentos e tensões atuantes nos pavimentos submetidos pelas rodas dos veículos. Os esforços são transmitidos por ações verticais, que advêm do peso na forma de pressão na superfície de contato, e as forças tangenciais que são oriundas do rolamento do veículo ou também ocorridas na derrapagem e travagem (BRANCO, 2006).

Com a caracterização da estrutura e dos materiais e as espessuras das camadas predefinidas, os módulos de resiliência, os coeficientes de Poisson e também a composição do tráfego atuante, a resposta do pavimento pode ser estimada via cálculo das tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura (FRANCO, 2007).

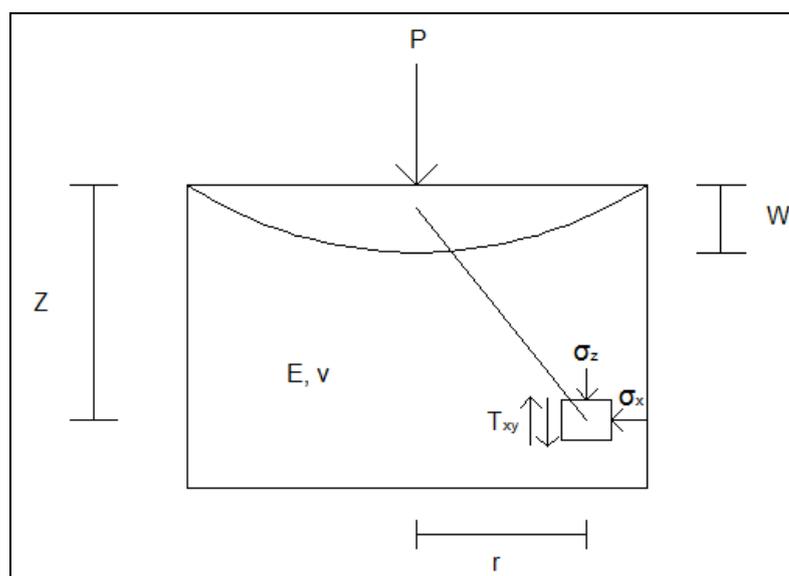
Figura 3 - Distribuição de tensões verticais devido à passagem da roda



Fonte: AI, 1981 *apud* BRANCO, 2006.

Para isto, Boussinesq desenvolveu um conjunto de equações para o cálculo de tensões e deformações em um espaço semi-infinito, linear, elástico, homogêneo e isotrópico submetido a um carregamento pontual (MEDINA, 1997; BALBO, 2007; FRANCO, 2007; PAPAGIANNAKIS & MASAD, 2007). A Figura 4 demonstra o esquema dos esforços atuantes em um semi-espaço elástico e as equações de 2 a 5 representam o cálculo destes esforços.

Figura 4 - Esforços da carga externa superficial em um ponto do semi-espaço elástico



Fonte: BALBO, 2007.

$$\sigma_x = \frac{P}{2\pi} \left\{ (1 - 2\nu) \left[\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] - 3r^2 z (r^2 + z^2)^{-5/2} \right\} \quad (2)$$

$$\sigma_z = -\frac{3P}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-5/2} \quad (3)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{3P}{2\pi} r z^2 (r^2 + z^2)^{-5/2} \quad (4)$$

$$w = \frac{P}{2\pi E} [z^2(1 + \nu)(r^2 + z^2)^{-3/2} + 2(1 - \nu^2)(r^2 + z^2)^{-1/2}] \quad (5)$$

Onde: P é carga aplicada;

E é o módulo de elasticidade do meio;

ν é o coeficiente de Poisson;

σ_x é a tensão normal na direção x;

σ_z é a tensão normal na direção z;

τ_{xz} é a tensão de cisalhamento da direção xz;

w é o deslocamento do ponto em estudo;

r e z são as distâncias horizontal e vertical entre o ponto de aplicação de carga e o ponto em estudo.

Esses cálculos consideram as tensões e deformações para um determinado local e espaço de tempo infinitesimal, ou seja, ao se deslocar a roda do ponto inicial de aplicação da carga, as tensões e as deformações relativas diminuem e anulam-se. O pavimento recupera praticamente sua condição inicial. No entanto, uma pequena parcela da deformação não é recuperada devido aos materiais que constituem a estrutura do pavimento não serem perfeitamente elásticos (YODER & WITCZAK, 1975; HUANG, 2004; BRANCO, 2006).

Com as passagens sucessivas das rodas dos veículos, os efeitos descritos anteriormente vão se repetindo, assim a deformação sucessiva pode implicar em uma ruptura do pavimento ao final de determinado número de passagens. Este fenômeno é chamado de fadiga dos materiais, comumente chamado de Lei da Fadiga, ou seja, cada material é correspondente a uma deformação para determinado carregamento até atingir a ruína do material por uma repetição excessiva deste carregamento (BRANCO, 2006; MEDINA & MOTTA; 2015).

Para análise estrutural Branco (2006) diz que em pavimentos flexíveis a tensão e deformação relativas a cada passagem do eixo – padrão (8,2 tf) permite determinar por meio da Lei da Fadiga o número máximo (admissível) de passagens do eixo – padrão durante a vida útil do pavimento. Para isto a equação 6, determina o dano gerado no pavimento.

$$D = \frac{N_p}{N_a} 100 \quad (6)$$

Onde: D é percentual de resistência;

N_p é número de eixos – padrão;

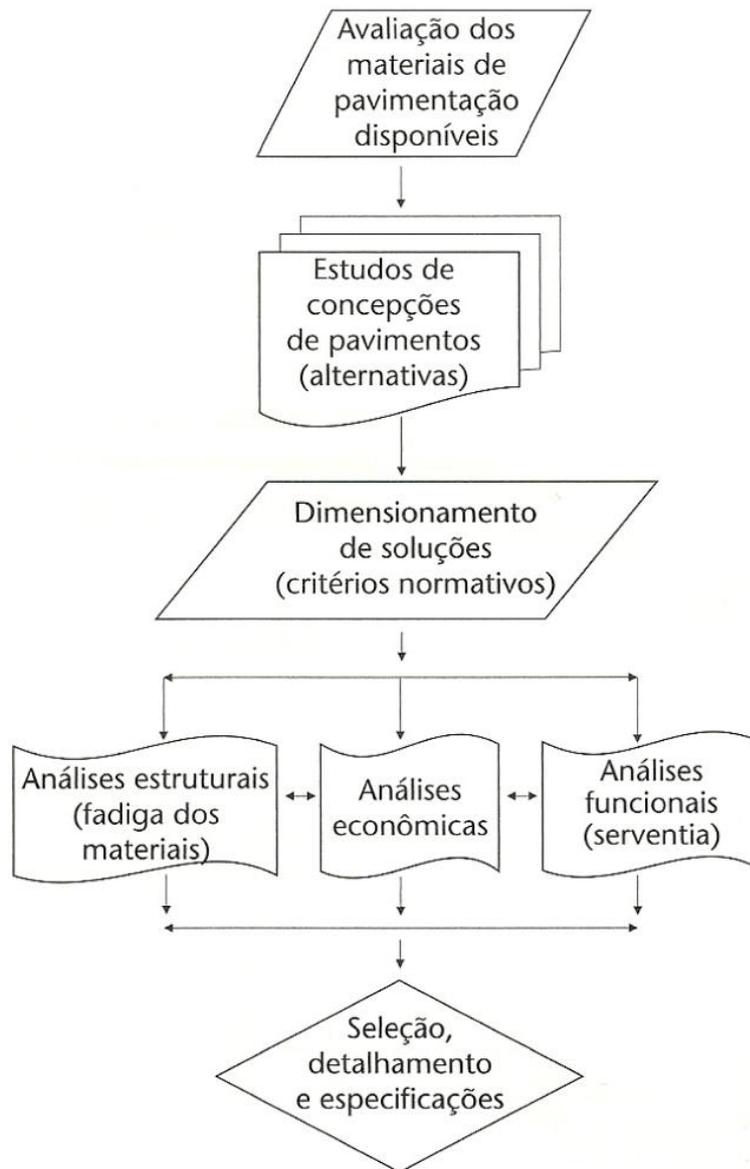
N_a é número de eixos – padrão que podem provocar deformação no pavimento sem que exista ruína.

A condição de regularidade do dimensionamento é que: $D > 100\%$, haverá o subdimensionamento e se $D < 80\%$, haverá sobredimensionamento. O dano total para cada tipo de manifestação é obtido pelo somatório de todos os danos unitários, em todos os pontos críticos da estrutura do pavimento, ou seja, os danos unitários calculados são acumulados de forma análoga a Hipótese de Miner, apresentada na equação 7.

$$D_t = \sum \frac{N_p}{N_a} = \sum D \quad (7)$$

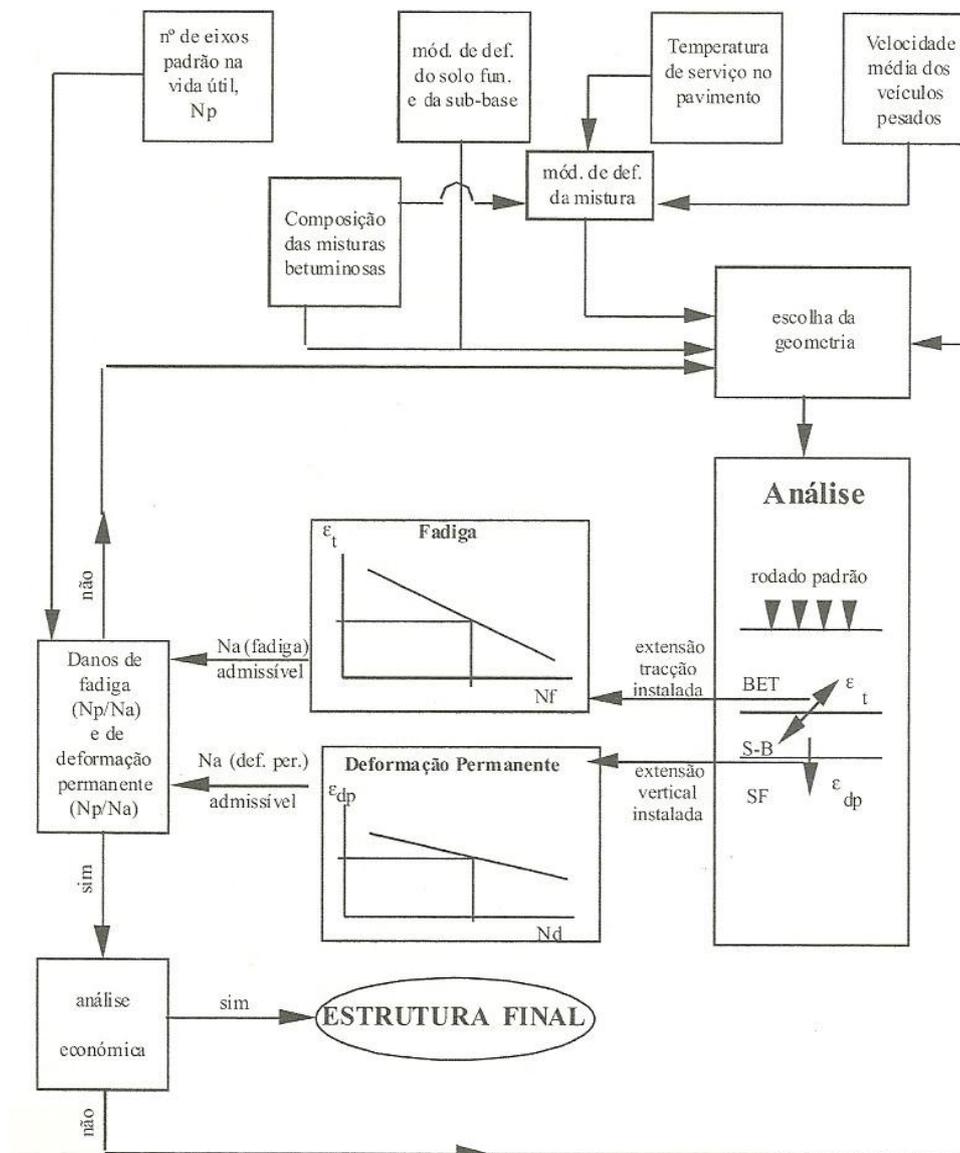
Desta forma, Balbo (2007) e Branco (2006), conforme as figuras 5 e 6, respectivamente, propõem o esquema de análise para dimensionamento de pavimentos.

Figura 5 - Processo de seleção de estruturas de pavimentos



Fonte: BALBO, 2007.

Figura 6 - Esquema do procedimento de dimensionamento mecânico – empírico de um pavimento flexível



Fonte: BRANCO, 2006.

2.3 TRÁFEGO

Para Bevenides (2000) e Darous (2003) o tráfego é um fator de suma importância ao se desenvolver um projeto de dimensionamento de pavimentos. Pois ao se obter informações sobre o volume de tráfego de forma aleatória, defasadas e sem a aplicação de uma metodologia de trabalho concisa, pode levar a falhas na escolha do pavimento.

2.3.1 Eixos

O tráfego é formado por uma diversidade de veículos e cargas, onde estes veículos são constituídos por diferentes configurações de eixos, com uma significativa diferença de cargas impostas por estes eixos ao pavimento (BALBO, 2007; MEDINA, 1997). A Figura 7 ilustra o formato destes eixos que percorrem as rodovias brasileiras. A previsão de demanda e de crescimento de tráfego depende diretamente do estabelecimento de critérios para realização da contagem e pesagem de veículos (DAROUS, 2003).

Medina (1997) considerou a previsão da evolução do tráfego ao longo do tempo, juntamente com a mensuração do poder destrutivo como uma das dificuldades ao se dimensionar pavimentos, devido às variações de cargas e níveis de repetições. Na Tabela 2 estão as cargas máximas legais permitidas no Brasil para cada tipo de eixo. No entanto, estes valores podem ser ultrapassados caso não exista uma fiscalização, como mostra Balbo (2007) em estudo realizado na BR – 101/SC no ano de 1986 (Tabela 3).

Tabela 1 - Cargas máximas legais permitidas no país

Eixo	Carga Máxima Legal (kN)	Carga possível por pneu (kN)
ESRS	60	30
ESRD	100	25
ETD	170	21,25
ETT	255	21,25

Fonte: BALBO, 2007.

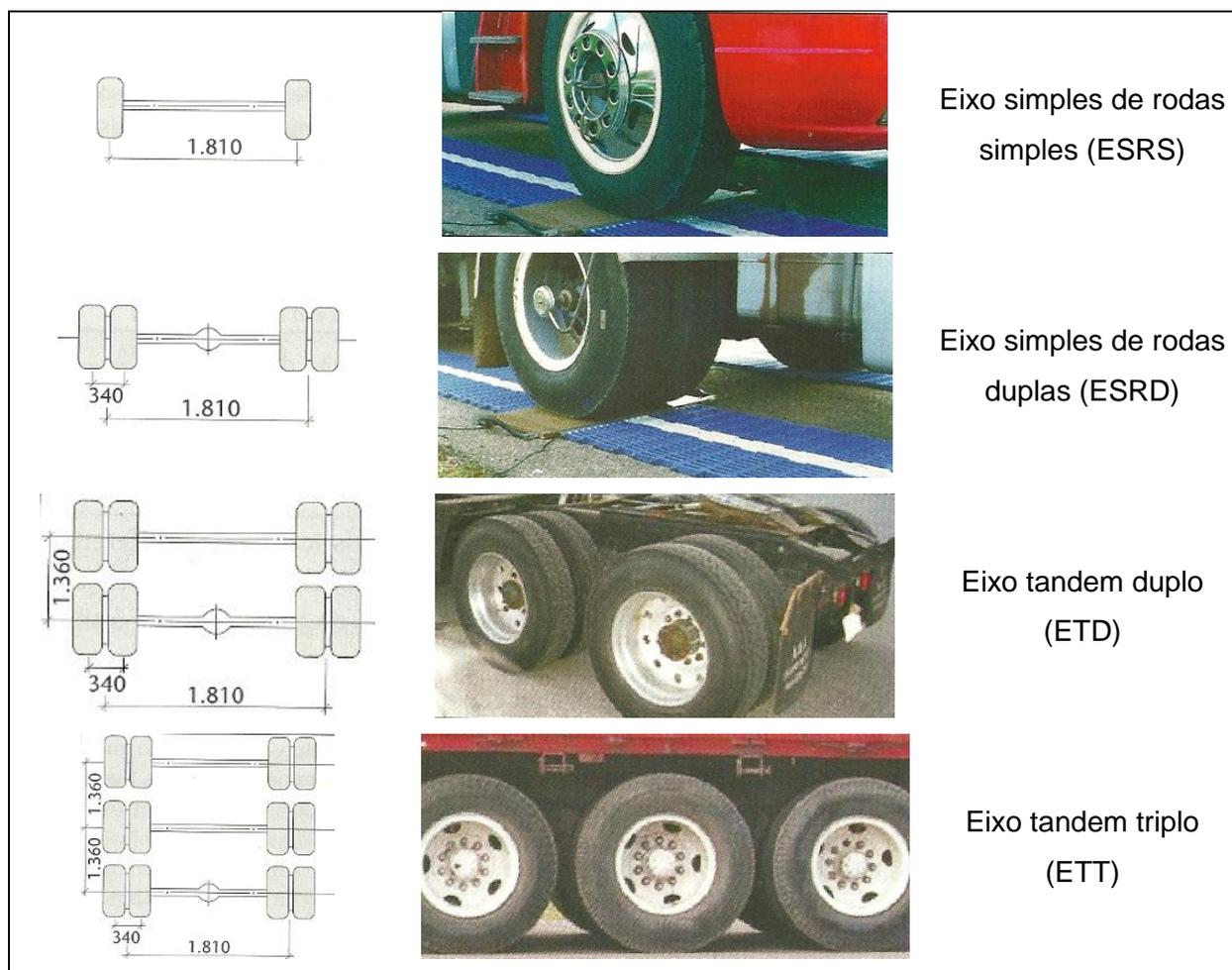
Tabela 2 - Cargas encontradas nos estudos na BR 101 SC

Eixo	Carga Mínima (kN)	Carga Máxima (kN)
ESRS	5	70
ESRD	10	220
ETD	40	200
ETT	50	540

Fonte: BALBO, 2007.

Todos os eixos mostraram valores de carga máxima acima do determinado por lei, e no caso dos eixos ESRD e ETT, a carga máxima encontrada passou de 100%, ou seja, o dobro de esforços sendo impostos ao pavimento (BALBO, 2007).

Figura 7 - Formato dos eixos predominantes no país



Fonte: BALBO, 2007.

2.3.2 Tipos de veículos e classificação para os eixos

No Manual de Conservação de Rodovias do DNIT (2005), os veículos que trafegam nas rodovias estão classificados da seguinte forma:

-Automóveis: com dois eixos e quatro rodas, destinados ao transporte de pessoas;

-Ônibus: com dois ou três eixos e quatro rodas, o eixo dianteiro possui duas rodas e os demais com quatro rodas cada;

-Caminhões leves: com dois eixos e quatro rodas, destinados ao transporte de cargas leves;

-Caminhões médios: com dois eixos, o traseiro possui rodas duplas, destinado ao transporte de cargas;

-Caminhões pesados: com dois eixos traseiros com quatro rodas cada e o dianteiro com duas rodas;

-Reboques e Semi-reboques: Veículos que são constituídos de mais de uma unidade. Eixo dianteiro simples de rodas duplas no veículo trator, os demais possuem quatro rodas podendo ser simples, em tandem duplo ou triplo.

O DNER adotou uma nomenclatura dos veículos, assim determinando a configuração de eixos que compõem o veículo como mostra no Quadro 1.

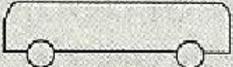
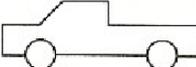
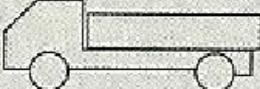
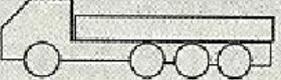
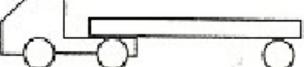
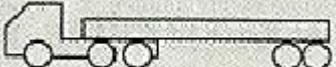
2.3.3 Equivalência de cargas (FEC)

O conceito de equivalência entre cargas surge ao se observar que os efeitos destrutivos ocasionados ao longo do tempo, por veículos com carregamentos diferentes, são diversos em estruturas semelhantes de pavimentos, o que levou ao desenvolvimento de um critério comparativo entre os veículos (BALBO, 2007).

Para Sales *et al.* (1987) o efeito destrutivo sobre um pavimento só pode ser obtido através da determinação da quantidade e do peso dos eixos que por ele trafegarão, inúmeras pesquisas tiveram como objetivo correlacionar o peso dos eixos e seu efeito destrutivo. Assim, o fator de equivalência de uma carga, é definido como o número de passagens equivalentes de um eixo-padrão de 8,2 tf que produz o mesmo efeito no pavimento que a carga em questão.

Para Yoder e Witczak (1975) os fatores de equivalência de cargas são definidos como sendo a relação entre o dano que é causado por um veículo qualquer em um tipo específico de pavimento, e um veículo tomado arbitrariamente como padrão. Onde nas pistas da AASHO foram definidos como 80 kN em eixos simples de rodas duplas.

Quadro 1 - Configuração de eixos

Tipo	Configuração	Eixos de Projeto	Classificação
Automóvel		-	2C
Ônibus		ESRS; ESRD ou ESRS	2C
Utilitário		-	2C
Caminhão		ESRS; ESRD	2C
Caminhão		ESRS; ETD	3C
Caminhão		ESRS; ETT	4C
Semirreboque		ESRS; ESRD (2)	2S1
Semirreboque		ESRS; ESRD; ETD	2S2
Semirreboque		ESRS; ESRD; ETT	2S3
Semirreboque		ESRS; ETD; ETD	3S2
Semirreboque		ESRS; ETD; ETT	3S3
Reboque		ESRS; ESRD (3)	2C2
Reboque		ESRS; ESRD (2); ETD	2C3

Fonte: BALBO, 2007.

Pereira (1985) considera que o fator de equivalência de cargas foi adotado como medida de desempenho de pavimentos porque comparativamente mede os efeitos que os excessos de carga por eixo provocam nos pavimentos flexíveis.

No dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil, o FEC para o DNER partiu dos trabalhos de Souza (1981), pressupostos nas avaliações realizadas pela USACE, no entanto Pereira (1985) contestou os fatores de equivalência de cargas adotados. Segundo Pereira (1985), a USACE não considera nem de forma indireta as espessuras e características dos materiais que compõem os pavimentos. Desta forma, em seu trabalho apresentou resultados baseados em uma pesquisa de campo que verificou as dimensões dos eixos, pneumáticos e cargas típicas das rodovias do país.

As equações usadas pelo DNER em 1981 e 1985 estão no Quadro 2.

Quadro 2 - Fator de equivalência de cargas DNER

Tipo de Eixo	Expressão para cargas em (kN) DNER - 1985	Expressão para cargas em (kN) DNER - 1981
ESRS	$\left[\frac{Q}{76,20} \right]^{4,32}$	$\left[\frac{Q}{80} \right]^{5,01}$
ESRD	$\left[\frac{Q}{80,12} \right]^{4,32}$	$\left[\frac{Q}{80} \right]^{5,01}$
ETD	$\left[\frac{Q}{147,88} \right]^{4,14}$	$\left[\frac{Q}{114} \right]^{4,46}$
ETT	$\left[\frac{Q}{225,06} \right]^{4,22}$	$\left[\frac{Q}{163} \right]^{4,65}$

Fonte: BALBO, 2007.

Para a AASHTO (1993) o método de projeto de pavimentos flexíveis deve considerar algumas premissas fundamentadas nos conceitos de ruptura funcional, relacionado à serventia do pavimento e na parametrização da estrutura do pavimento considerando o número estrutural "SN". Com isto a AASHTO (1993) determinou por meio de técnica estatística de regressão, conforme equação 8 as expressões para obter os valores dos fatores de equivalência de cargas (Quadro 3).

$$FEC = \left[\frac{Q_j}{Q_p} \right]^{\gamma} \quad (8)$$

Onde: Q_j é a carga sobre um eixo qualquer;

Q_p é a carga sobre o eixo-padrão de 80 kN;

γ é a constante de regressão.

Quadro 3 - Fator de equivalência de cargas AASTHO

Tipo de Eixo	Expressão para cargas em (kN)
ESRD	$\left[\frac{Q}{80} \right]^{3,998}$
ETD	$\left[\frac{Q}{154} \right]^{4,052}$
ETT	$\left[\frac{Q}{222} \right]^{3,987}$

Fonte: AASHTO, 1993.

2.3.4 Hipótese de Miner

O estudo da fadiga partiu de Miner em 1945 em estruturas metálicas e posteriormente sendo adaptada para os pavimentos (SANTOS, 2005; MEDINA & MOTTA, 2015).

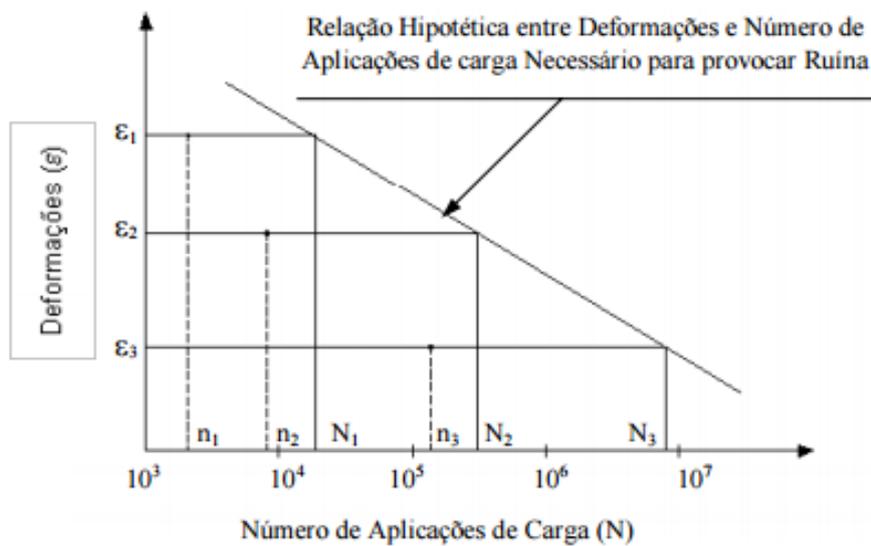
A equação que descreve a hipótese de Miner (eq. 7) mostra que quando várias tensões de valor constante são repetidas certo número de vezes, é verificado um desgaste progressivo na resistência à fadiga dos materiais e quando estiver totalmente consumida a relação proposta na equação 7 chega a valor igual a 1. Ou seja, quando uma tensão aplicada certo número de vezes, esta ação será responsável por certo consumo da vida de fadiga do material (SANTOS, 2005).

A relação entre a deformação e o número de aplicações de cargas, está representada no gráfico ilustrado na Figura 8.

Porém, como mostra a Figura 9, estudos posteriores foram apresentados descrevendo que a linearidade proposta por Miner poderia não ser exatamente

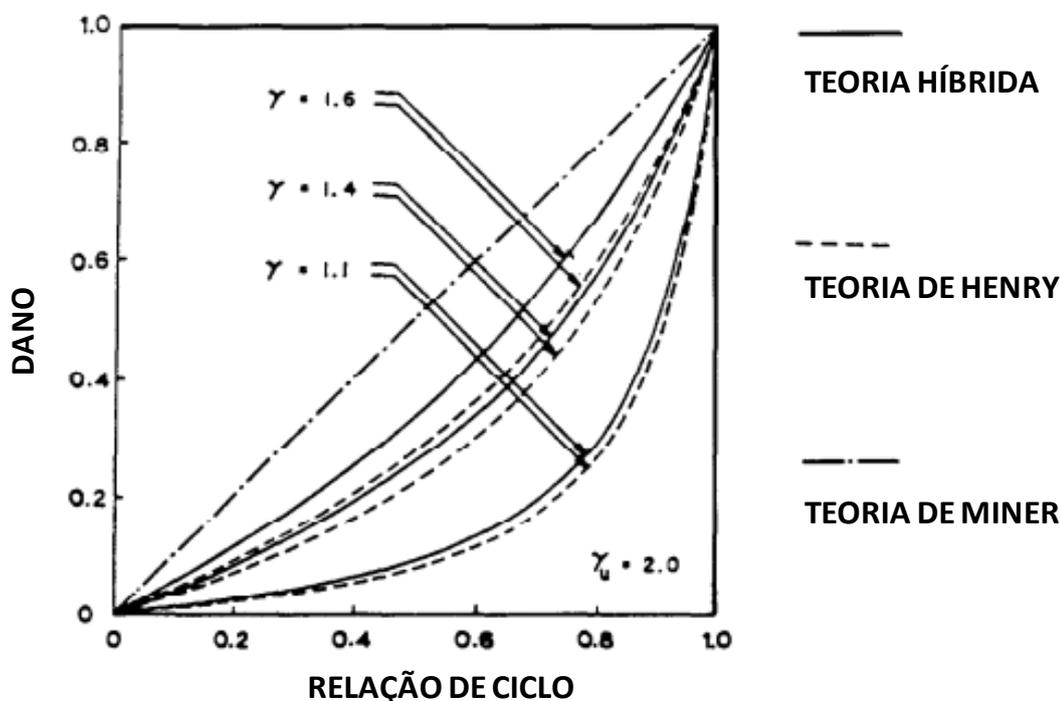
sempre verdade, ou seja, em certas situações como fossem aplicados os carregamentos para se ter os valores das proposições de Miner seria necessário um fator de correção (γ), no entanto, O'Niell (1970), em seus estudos chegou a conclusão que nenhuma hipótese diferente da regra de adição linear de razões de ciclo se mostrou superioridade nos resultados.

Figura 8 - Aplicação gráfica da Hipótese de Miner



Fonte: GONTIJO, 1980 *apud* SANTOS, 2005.

Figura 9 - Característica da função de danos híbridos e comparação com a regra de Miner e da teoria Henry



Fonte: FATEMI & YANG, 1998.

De modo geral o estudo de Miner propõe que o nível em que chegar o resultado da equação 6 a unidade, o trincamento ocorrerá ao longo da vida útil do projeto, desta forma, sendo considerado um dimensionamento adequado. No entanto, quando o resultado da equação 6 for superior a unidade, é provável que o trincamento ocorrerá antes do final da vida de projeto, ou seja, desta forma sendo necessário que ocorra um ajuste no dimensionamento do pavimento de modo a evitar a deformação das fibras inferiores do revestimento asfáltico (SANTOS, 2011).

2.4 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Conforme Balbo (2007), dimensionar um pavimento trata da determinação da espessura das camadas a serem aplicadas e a composição dos materiais que serão aplicados, pois desta maneira é possível construir uma estrutura que tenha

capacidade de suportar o carregamento imposto por determinado volume de tráfego em situações climáticas do meio em que está inserido.

Para Bevenides (2000) e Domingos (2007), a espessura e os materiais que compõem a estrutura de um pavimento devem suportar certo número de repetições de cargas durante sua vida útil. A vida útil é o tempo em que o pavimento não apresenta um grau inaceitável de deterioração, tanto estrutural quanto funcional. Ou seja, quando se atinge um trincamento generalizado do pavimento, isto mostra que sua vida útil chegou ao fim.

Para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis é disseminado no Brasil o método do DNER, que utiliza como base as curvas de dimensionamento da USACE (Corpo de Engenheiros Militares dos EUA) e no ensaio de CBR (MEDINA, 1997). O método de dimensionamento do DNER se inclui nos métodos empíricos, ou seja, baseia-se na experiência adquirida e faz algumas correlações entre o desempenho obtido do pavimento e certas propriedades dos materiais que integram a estrutura deste pavimento (BEZERRA NETO, 2004).

Segundo Bezerra Neto (2004) os métodos empíricos são de fácil empregabilidade, devido aos ensaios serem de grande simplicidade, o que torna desnecessário a utilização de equipamentos sofisticados. No entanto, as condições do clima da região, os materiais, o tráfego, se tornam limitantes, assim não tornando possível a generalização para diferentes cargas de tráfego, novos tipos de materiais e diferentes regiões.

Devido o pavimento ser uma estrutura complexa e a previsão de seu desempenho ser realizada com uma gama de simplificações desenvolveram-se alguns métodos de dimensionamento de pavimentos. Desta forma, chegou-se a três métodos de dimensionamento de pavimentos: os empíricos, mecanísticos e teóricos-experimentais (BEVENIDES, 2000; SILVA, 2009).

Balbo (2007) relata que a existência de diferentes formas de dimensionamento se deve ao fato da utilização de distintos critérios de ruptura da estrutura. Onde a ruptura se divide em: ruptura plástica, que ocorre quando o pavimento não suporta mais as cargas aplicadas e demonstra excessiva deformação plástica, ruptura por fadiga, que é de natureza estrutural, e ruptura funcional ou operacional que ocorre quando o pavimento não apresenta mais condições para o usuário no que se refere a conforto e segurança ao rolamento.

Motta (1991) diz que de maneira geral os métodos de dimensionamento de pavimentos levam uma grande dose do empirismo. No entanto, apontam as técnicas computacionais e as teorias de múltiplas camadas como um avanço para métodos mais racionais de raízes mecánísticas, logo é necessário ainda correções para os valores de campo, isto devido à complexidade da estrutura, seus componentes e a relação veículo-pavimento.

A confiabilidade de um projeto de pavimento pode ser definida como a probabilidade de certa seção do pavimento projetado desempenhar de forma satisfatória durante o período de projeto as solicitações de tráfego e as condições ambientais (AASHTO, 1993).

No dimensionamento de pavimentos pode ser feito uso de sistemas determinísticos ou probabilísticos. Onde no primeiro sistema, é atribuído ao projeto um fator de segurança, para prevenir os parâmetros de incertezas. Porém, este tipo de abordagem pode resultar em um superdimensionamento ou subdimensionamento das estruturas, variando conforme a magnitude dos fatores ou modelos aplicados (HUANG, 2004). Para o sistema probabilístico de projeto de pavimentos, a confiabilidade é avaliada estimando uma distribuição por meio de métodos de simulação (SANTOS, 2011).

Em um projeto de rodovia de natureza probabilística, nenhum dos parâmetros possui somente um valor determinístico, ou seja, deve ser tratado no formato estatístico (MOTTA, 1991).

Para uma análise determinística de uma seção do pavimento, são utilizados parâmetros médios para previsão dos indicadores funcionais e estruturais para vida de projeto, ou seja, os resultados destas previsões baseados em valores médios de entrada possuem confiabilidade de 50%, desta forma, ficando o resultado da análise com uma probabilidade de 50% de ser maior ou menor do que estimado (SANTOS, 2011).

O nível de confiança está relacionado com os procedimentos de dimensionamento, estipulando uma faixa de segurança que considere variações de tráfego e desempenho. A Tabela 3 apresenta a classificação funcional conforme o tipo de via.

Tabela 3 - Classificação funcional da via ou confiabilidade

Classificação Funcional da 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: BALBO, 2007.

Estudos mostraram que a incorporação da confiabilidade no método empírico mecanístico, compatível com a realidade brasileira, permitiu identificar as variáveis de incerteza na previsão de desempenho dos pavimentos ao longo do tempo, por consequência será possível dar maior eficiência no dimensionamento de pavimentos flexíveis (SANCHEZ & FERNANDES JR, 2015)

Santos (2011), enfatiza em seus estudos que o cálculo da confiabilidade de dimensionamento é uma importante ferramenta para tomada de decisão no que se refere à aceitação de uma estrutura de pavimento. Desta forma, é possível determinar o risco que se assume na aceitação, verificando também quais parâmetros de entrada tem maior influência no desempenho do pavimento, o que facilita o aumento da atenção no controle geométrico e de fatores de campo.

2.4.1 Método de Dimensionamento DNIT

O método que era adotado pelo DNER foi proposto pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza na década de 60, com base no critério do CBR, o eixo-padrão de 80 kN e considerando o coeficiente de equivalência estrutural obtido nas pistas da AASHTO (BALBO, 2007; MEDINA, 1997; MOTTA, 1991).

Bezerra Neto (2004) conclui que o método de dimensionamento está dividido em três etapas fundamentais: a definição dos materiais a serem utilizados, a determinação do tráfego e o dimensionamento propriamente dito.

Com isto, a definição dos materiais deve levar em consideração algumas observações feitas por Souza (1981), relacionadas a partir do CBR dos materiais a serem utilizados, ou seja, respeitando os valores mínimos de algumas características. Isto para que não ocorra a ruptura precoce no pavimento. Estas características dos materiais estão no Quadro 4.

Souza (1981) determinou também faixas granulométricas em que os materiais granulares devem estar para serem utilizados como base (Tabela 4). Para isto algumas considerações a respeito destas faixas devem ser consideradas como a fração passante na peneira nº 200 sendo inferior a 2/3 da fração passante na peneira nº 40 e também a fração graúda deve apresentar um desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50%. Para materiais com experiência de uso pode-se adotar valores de desgaste maior.

Quadro 4 - Características dos materiais do pavimento

Camada	Crítérios
Material de subleito	CBR \geq 2% Expansão menor que 2%
Material para reforço do subleito	CBR maior que o do subleito Expansão menor que 1%
Material para sub-base	CBR \geq 20% Expansão menor que 1% (Com sobrecarga de 4,536 kgf) Índice de grupo (IG) igual a zero
Material para base	CBR \geq 80% Expansão menor que 0,5% (Com sobrecarga de 4,536 kgf) LL \leq 25% IP \leq 6%

Fonte: SOUZA, 1981.

Para a determinação do tráfego Souza (1981), propõe o levantamento do número de veículos, faixas, tipo do veículo (comercial ou passeio) e tipo de eixo. O valor de repetições de passagem do eixo-padrão de 80 kN é dado por:

$$N = 365 \times P \times V_m \times FV \times FR \quad (9)$$

Onde:

N = número de operações do eixo padrão;

P = período de projeto em anos;

V_m = Volume médio diário de tráfego durante a vida de projeto;

FV = Fator de veículo da frota;

FR = Fator climático regional.

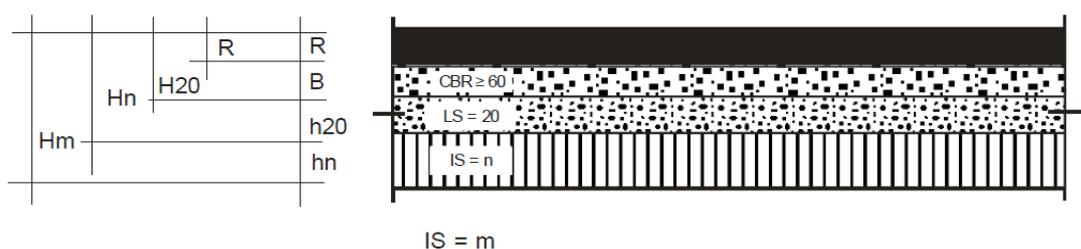
Tabela 4 - Faixas granulométricas materiais granulares

Peneiras	Porcentagem que passa			
	A	B	C	D
2"	100	100	-	-
1"	-	75 – 90	100	100
3/8"	30 – 65	40 – 75	50 – 85	60 – 100
n° 4	25 – 55	30 – 60	35 – 65	50 – 85
n° 10	15 – 40	20 – 45	25 – 50	40 – 70
n° 40	8 – 20	15 – 30	15 – 30	25 – 45
n° 200	2 – 8	5 – 15	5 – 15	5 – 20

Fonte: SOUZA, 1981.

Para o dimensionamento do pavimento primeiro se determina a espessura total do pavimento, posteriormente a determinação (escolha) do tipo de revestimento e por fim a espessura das demais camadas que compõem o pavimento. A Figura 10 demonstra o esquema das camadas do pavimento.

Figura 10 - Esquema camadas do pavimento em relação às camadas equivalentes



Fonte: DNIT, 2006a.

A espessura do pavimento correlacionando os valores de N e CBR são dados pelo ábaco construído por Souza (1981), Figura 11. No entanto, Balbo (2007) cita a equação 10, como solução para as retas contidas no ábaco, estas obtidas por regressão linear múltipla.

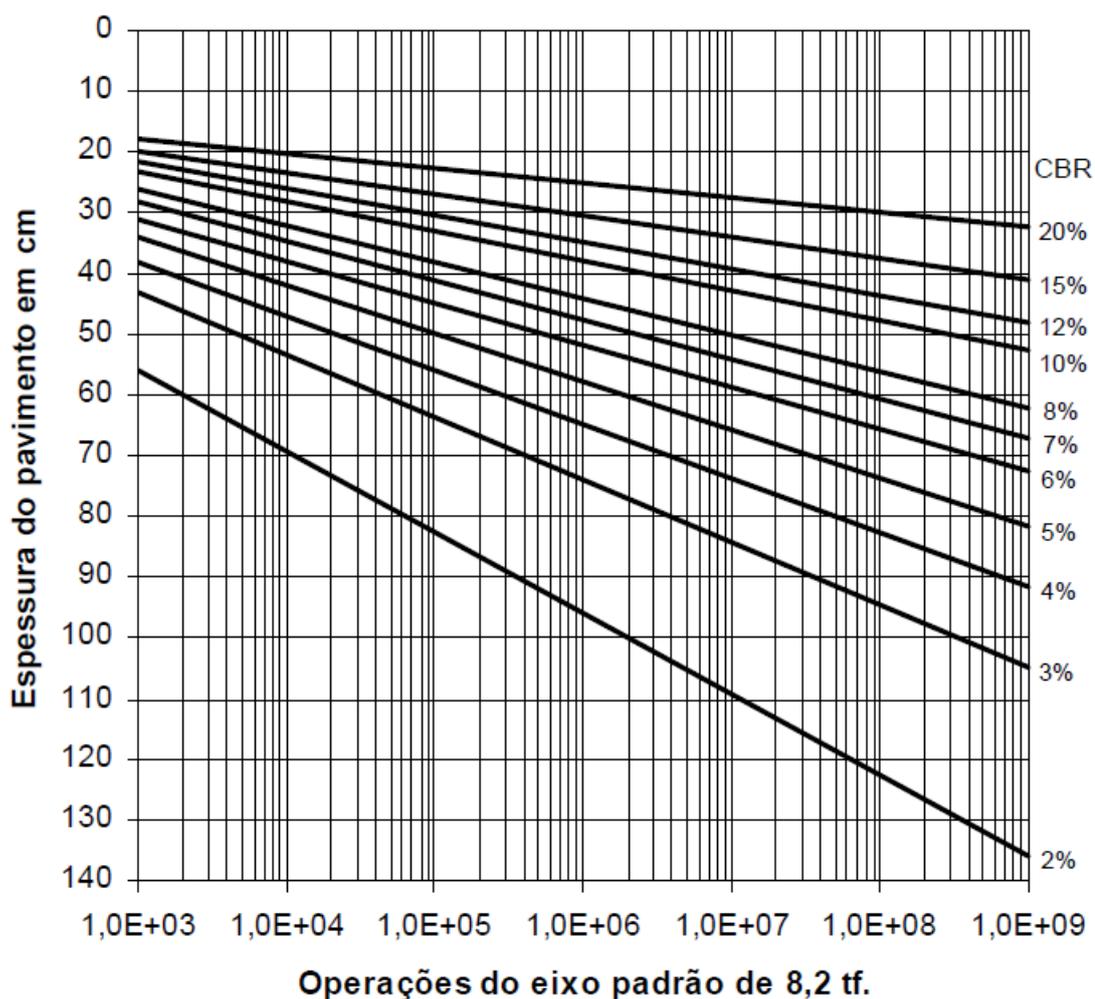
$$H_{eq} = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (10)$$

Onde: H_{eq} = espessura equivalente em cm;

N = número de repetições de carga;

CBR = valor da camada de suporte.

Figura 11 - Ábaco espessura do pavimento dado pelo valor de N e o CBR



Fonte: SOUZA, 1981 *apud* BEZERRA NETO, 2004.

A escolha do tipo e espessura do revestimento parte de valores mínimos conforme faixas de valor de repetições de carga a serem aplicadas no pavimento, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Tipo de revestimento em relação aos valores de N e espessuras mínimas

N (repetições do ESRD de 80kN)	Tipo de Revestimento	Espessura (mm)
$\leq 10^6$	Tratamentos superficiais	15 a 30
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	CA, PMQ, PMF	50
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto asfáltico	75
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico	100
$N > 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico	125

Fonte: SOUZA, 1981 *apud* BALBO, 2007.

O cálculo das demais camadas do pavimento é obtido por meio da resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$R \times K_r + B \times K_b \geq H_{20} \quad (11)$$

$$R \times K_r + B \times K_b + h_{20} \times K_s \geq H_n \quad (12)$$

$$R \times K_r + B \times K_b + h_{20} \times K_s + h_n \times K_n \geq H_m \quad (13)$$

Onde:

K_r , K_b , K_s e K_n = são os coeficientes de equivalência estrutural dos materiais do pavimento;

R , B , h_{20} e h_n = são os valores das espessuras das camadas de revestimento, base, sub-base e reforço do subleito;

H_{20} , H_n e H_m = são os valores das espessuras das camadas equivalentes, de referência pedra britada graduada, sobre a sub-base, reforço do subleito e subleito.

Os coeficientes de equivalência estruturais são obtidos por meio da Tabela 6, que correlaciona o coeficiente com o tipo de material.

Tabela 6 - Coeficiente de equivalência estrutural DNIT

Tipo de Material	Coeficiente de Equivalência Estrutural (K)
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,0
Base ou revestimento pré-misturado a quente de graduação densa	1,7
Base ou revestimento pré-misturado a frio com graduação densa	1,4
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,2
Camadas granulares	1,0
Solo-cimento com resistência aos 7 dias superior a 4,5 MPa (compressão)	1,7
Solo-cimento com resistência aos 7 dias entre 2,8 a 4,5 MPa (compressão)	1,4
Solo-cimento com resistência aos 7 dias entre 2,1 a 2,8 MPa (compressão)	1,2
Bases de solo-cal	1,2

Fonte: SOUZA, 1981 *apud* BALBO, 2007.

2.4.2 Método de Dimensionamento Proposto por Franco (2007)

Para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura de pavimentos submetidos ao tráfego de veículos, existem dois métodos mais conhecidos, sendo a Teoria da Elasticidade e o Método de Elementos Finitos. Franco optou pela Teoria da Elasticidade e Medina & Motta (2015) ressaltam ser importante a avaliação entre o compromisso e o rigor analítico dos cálculos, bem como a definição e escolha dos parâmetros dos materiais.

Franco (2007) considera que o critério de ruptura do pavimento asfáltico é um dos fatores de suma importância no projeto estrutural de pavimentação. E a definição deve ser bem clara, visto que esta influencia diretamente nos custos de implantação da rodovia. Sendo que se o projeto ficar subdimensionado, serão necessários custos extras para reparação e no caso de superdimensionado, existirá excesso de investimentos que poderiam ter sido economizados.

No método é considerado também que a mistura asfáltica envelhece ao passar do tempo devido à exposição ao sol e intempéries. Pois com o aumento da temperatura no decorrer do dia, ocorre à diminuição do módulo de resiliência e da resistência à tração da mistura asfáltica e o tempo de uso do pavimento modifica as

características químicas e reológicas do CAP, ocasionando um aumento de sua consistência (MEDINA & MOTTA, 2015).

Para essa estimativa de envelhecimento Franco em seus trabalhos se apropriou da equação 14 de Witczak & Mirza (1995).

$$\log.\log(\eta) = A + VTS.\log(T + 459,67) \quad (14)$$

Onde: A e VTS são constantes da regressão;

η é a viscosidade do ligante asfáltico em centi Poise;

T é a temperatura do ligante asfáltico em °F.

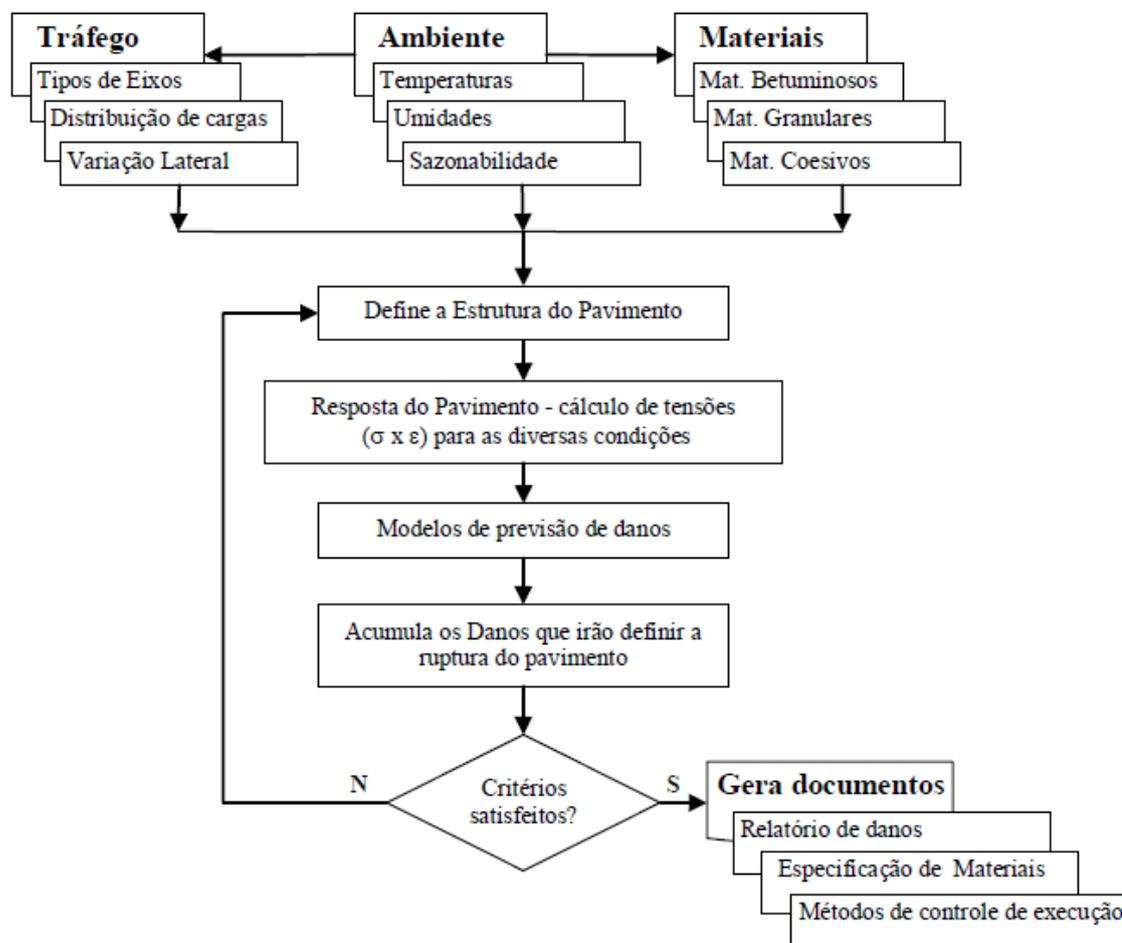
Franco (2007) fez a avaliação da evolução do envelhecimento do ligante em relação à temperatura, bem como a evolução do módulo dinâmico, desta forma a implementação desta técnica foi realizada por meio do SisPav, que caracteriza a mistura asfáltica com base no módulo de resiliência, coeficiente de Poisson, granulometria da mistura, parâmetros de viscosidade do ligante e índices volumétricos.

O método também considera o efeito de cada configuração do eixo sobre o pavimento, onde de forma individual o programa efetua o cálculo das tensões e deformações nos pontos críticos da estrutura (MEDINA & MOTTA, 2015).

Como análise final, o método dimensiona a estrutura com base nos dados de entrada e determina a espessura que atende aos critérios de projeto. Possibilitando também verificar os dados e requisitos informados pelo projetista informando se a estrutura suporta os esforços durante a vida de projeto. É possível obter as estimativas de afundamento de trilha de roda e danos relativos à deflexão máxima na superfície do pavimento e a tensão limite no topo do subleito (MEDINA & MOTTA, 2015).

O software implementado por Franco verifica os danos acumulados por fadiga no revestimento asfáltico e se necessário nas camadas de base cimentadas. O fluxograma de análise do pavimento proposto por Franco está ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos de Franco (2007)



Fonte: FRANCO, 2007.

2.4.3 Método de Dimensionamento da AASHTO

2.4.3.1 Método AASHTO 1993

O método foi fundamentado na análise estatística dos resultados que se obtiveram na pista experimental da AASHTO, localizada em Ottawa nos EUA, que foi concluída em 1958 e monitorada até 1960. Foram monitorados os efeitos das cargas de tráfego por meio de fatores de equivalência estrutural, estes foram definidos através da determinação de correlações entre a repetição de cargas de ESRD com 18 libras (80kN), a espessura das camadas e perda de qualidade de trafegabilidade

do pavimento e a variação de serventia. O Quadro 5 mostra as informações que Balbo (2007) levantou sobre os testes realizados na AASHO Road Test.

Quadro 5 - Considerações sobre a pista experimental AASHTO

Informação	Detalhes
Temperaturas e clima	Média no mês de julho: 24,5°C Média no mês de janeiro: -2,8°C Índice pluviométrico anual: 837mm Profundidade média de congelamento do pavimento: 711mm
Pistas	Seis circuitos Circuitos 2 e 6 submetidos ao tráfego Circuito 1 apenas para o estudo de efeitos do clima
O que foi medido durante os testes	Irregularidade Serventia Defeitos (visuais) Deflexões Deformações
Tráfego durante os testes	Loop 2 – ESRD (8,9kN) e ETD (26,7kN) Loop 3 – ESRD (53,3kN) e ETD (106,7kN) Loop 4 – ESRD (80kN) e ETD (142,2kN) Loop 5 – ESRD (99,6kN) e ETD (177,8kN) Loop 6 – ESRD (133,3kN) e ETD (213,3kN)
Misturas asfálticas	Revestimento em CBUQ com agregado de calcário, areia silicosa natural e cal como material de enchimento, empregando-se um CAP 80-100. Material dosado pelo ensaio Marshall com 50 golpes por face. O teor de asfalto foi de 5,4%, e os vazios, em torno de 7,7 %. Camadas de ligação em PMQ com agregado de calcário, areia silicosa natural e cal como material de enchimento, empregando-se um CAP 80-100. Material dosado pelo ensaio Marshall com 50 golpes por face. O teor de asfalto foi de 4,4%, e os vazios, em torno de 7,7 %.
Bases e sub-bases	Bases de BGS com CBR de 107% em laboratório, porém entre 52 e 160% em pistas, umidade variando entre 5,6% e 6,1%, massa específica aparente seca máxima entre 22,42kN/m ³ e 22,75kN/m ³ . Sub-bases com misturas de areia natural e pedregulhos naturais com CBR entre 28% e 51%, umidade variando entre 6,1% e 6,8%, e massa específica aparente seca máxima entre 22,27kN/m ³ e 22,59kN/m ³ . Estudos secundários com bases tratadas com asfalto e com cimento e também com pedregulho não britado.
Subleito na área	A CFT foi construída em 1m de espessura cm solo tipo total das pistas A-6, LL de 31%, IP de 16% e umidade de compactação de 13%, com CBR variando entre 1,9% e 3,5% e grau de compactação de 98%.

Fonte: BALBO, 2007.

AASHTO (1993) mensurou a serventia em um valor variando entre 0 e 5, onde a definição deste índice é dado como sendo as condições de qualidade de um

pavimento em determinado momento, levando em conta o conforto e segurança, sob determinadas condições do clima.

Com isto a AASHTO equalizou seu método baseando-se na relação serventia-desempenho. E determinou a equação 15 que leva em consideração tráfego, serventia e a espessura das camadas para demonstrar o desempenho do pavimento flexível. Para isto, foram realizadas 1.114.000 aplicações de cargas e quando a seção de aplicação de carga atingia um valor de serventia de 1,5, recebiam um reforço em CBUQ antes dos novos testes.

$$\log N = Z_r \times S_0 + 9,36 \times \log(SN + 1) - 0,2 + \frac{\log(p_0 - p_t)}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1) \times 5,19}} + 2,32 \times \log M_r - 8,07 \quad (15)$$

Onde:

SN é o número estrutural do pavimento;

p_0 é a serventia inicial;

p_t é a serventia ao final do projeto;

M_r é o módulo de resiliência;

Z_r é o nível de confiança do processo de dimensionamento.

O valor de SN é dado pela equação 16, que expressa a capacidade estrutural do pavimento para um número de repetições do eixo padrão em uma serventia ao final da vida útil, considerando as condições climáticas.

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3 \quad (16)$$

Onde:

a_i é o coeficiente estrutural da camada;

D_i a espessura da camada;

m_i o coeficiente de drenagem da camada.

A serventia inicial é o valor que se define pela qualidade da construção do pavimento logo após a construção. Pela AASHO foi obtido um valor médio de 4,2. A serventia terminal é o momento em que a rodovia para de ser trafegável e o valor determinado foi de 1,5.

O coeficiente de equivalência estrutural é a medida de capacidade do material em atuar dentro do sistema como mecanismo estrutural, dissipando as pressões que o pavimento é submetido sobre as camadas inferiores. A AASHTO estabeleceu correlações entre as propriedades mecânicas dos materiais como CBR e módulo de

resiliência para obtenção do coeficiente de equivalência estrutural como mostra na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficiente de equivalência estrutural

Material	Parâmetro de controle	CE
CBUQ, PMQ, a 20°C	Mr = 3.160 MPa	0,44
	Mr = 2.110 MPa	0,37
	Mr = 1.406 MPa	0,30
Bases granulares	CBR = 100%	0,14
	CBR = 33%	0,10
Sub-bases granulares	CBR = 100%	0,14
	CBR = 23%	0,10
Materiais cimentados (aos 7dias)	Rc = 5,6 MPa	0,22
	Rc = 3,1 MPa	0,16
	Rc = 1,4 MPa	0,13

Fonte: AASHTO, 1993.

O método da AASHTO especificou coeficientes modificadores, que levam em consideração as características drenantes dos materiais, onde a eficácia da drenagem está correlacionada com o tempo em que se leva para que a água seja removida do pavimento nas camadas granulares. Assim a remoção da água em duas horas é excelente, em um dia é boa, em uma semana é regular, em um mês é pobre e, quando a água não é drenada considera-se como muito pobre.

Determinados os valores dos números estruturais, calcula-se a espessura para cada camada do pavimento conforme as equações abaixo:

-Para a espessura do revestimento utiliza se a equação 17:

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} \quad (17)$$

-A espessura da base é dada pela equação 18:

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 \times m_2} \quad (18)$$

-A espessura da camada de sub-base é determinada pela equação 19:

$$D_3 = \frac{SN_3 - SN_2}{a_3 \times m_3} \quad (19)$$

Na Tabela 8, estão os valores de modificação m_i para coeficientes estruturais de camadas granulares de bases e sub-bases.

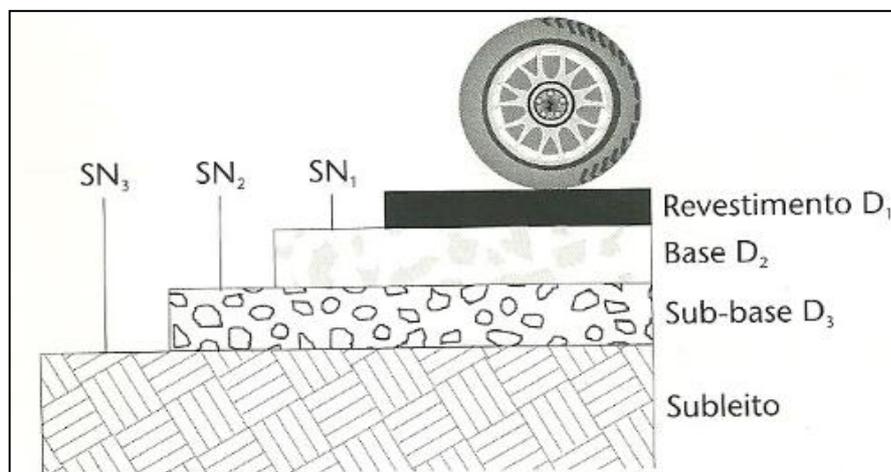
Tabela 8 – Coeficientes de drenagem

Qualidade de Drenagem	Porcentagem de Tempo a 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
Boa	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.

A Figura 13 demonstra um esquema dos valores que são necessários para se obter a espessura das camadas dos pavimentos.

Figura 13 - Esquema de camadas



Fonte: BALBO, 2007.

Como para a determinação dos valores dos números estruturais, é possível se obter inúmeras possibilidades para solução da equação 15, a AASHTO determinou espessuras mínimas para as camadas de pavimentos como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Espessuras mínimas AASHTO

Número de repetições do eixo – padrão (80 kN)	Espessura do Revestimento Asfáltico (mm)	Espessura bases granulares (mm)
$\leq 5 \times 10^4$	25 *	100
$5 \times 10^4 < N \leq 1,5 \times 10^5$	50	100
$1,5 \times 10^5 < N \leq 5 \times 10^5$	65	100
$5 \times 10^5 < N \leq 2 \times 10^6$	75	150
$2 \times 10^6 < N \leq 7 \times 10^6$	90	150
$N > 7 \times 10^6$	100	150

* Pode ser adotado TS (Tratamento Superficial)

Fonte: AASHTO, 1993.

Desta forma, para o cálculo da espessura das camadas do pavimento, deve-se levar em conta as espessuras mínimas, ou seja, deve ser feita a conferência pós cálculo.

2.4.3.2 Método AASHTO 2008

A partir de 2002, vários estados americanos deram início as atividades de implementação de um guia de dimensionamento. Compreendendo as atividades, treinamento de pessoal, coleta de dados de entrada, tráfego e os materiais, aquisição de equipamentos para testes, bem como a seleção e preparação de seções teste para calibração local (KALOUSH & RODEZNO, 2011).

A AASHTO vem evoluindo para uma concepção mecanística-empírica, onde o projetista deve ter uma abordagem iterativa, dando a possibilidade do projetista após escolhida a estrutura inicial, efetuar a análise detalhada se os critérios de desempenho estão sendo atendidos, onde o método em questão avalia os critérios de deformação permanente (ATR), trincas por fadiga de baixo para cima (*bottom-up*) e de cima para baixo (*top-down*), trincas térmicas e irregularidades superficiais (IRI) (MEDINA & MOTTA, 2015).

As Tabelas 10 e 11 descrevem a ordem de grandeza dos critérios de ruptura recomendados e os fatores de calibração dos modelos de previsão da AASHTO de 2008, respectivamente.

Tabela 10 – Ordem de grandeza dos critérios de ruptura da AASHTO (2008)

Defeito	Valor limite em cada nível de confiabilidade
Irregularidade – IRI final (pol/milha ou m/km)	Interestadual: 160 in/mi (2,7 m/km) Primária e secundária: 200 in/mi (3,3 m/km)
Trincamento interligado (Couro de jacaré - % da área da faixa)	Rodovia Interestadual: 10% Rodovia Primária: 20% Rodovia Secundária: 35%
Fratura térmica (trincamento transversal) (pé/milha ou m/km)	Interestadual: 500 ft/mi (100 m/km) Primária e secundária: 700 ft/mi (140 m/km)
Deformação permanente ou afundamento total de trilha de roda (pol/mm)	Interestadual: 0,40 pol (10 mm) Primária: 0,50 pol (13 mm) Outras < 45 mph (75 km/h): 0,65 pol (17 mm)

Fonte: MEDINA & MOTTA, 2015.

Tabela 11 – Modelos de previsão dos danos e fatores de calibração destes modelos da AASHTO (2008)

Parâmetro	Fórmula	Fator de Calibração	Valor default	Valores de calibração trecho
Fadiga	$N_f = \beta f 1 k_1 (\varepsilon_t)^{\beta f 2 k_2} (E)^{-\beta f 3 k_3}$	$\beta f 1$	1.0	1.0
		$\beta f 2$	1.0	0.8
		$\beta f 3$	1.0	1.5
Trinca Longitudinal	$F.C = \left(\frac{6000}{1 + e^{C_1 + C_2 \cdot \log D}} \right) * 10,56$	C1	7.0	Default
		C2	3.5	Default
Trinca couro jacaré	$F.C = \left(\frac{6000}{1 + e^{C_1 + C_2 \cdot \log D}} \right) * \frac{1}{60}$	C1	1.0	Default
		C2	1.0	Default

Default: Valor básico disponível no programa

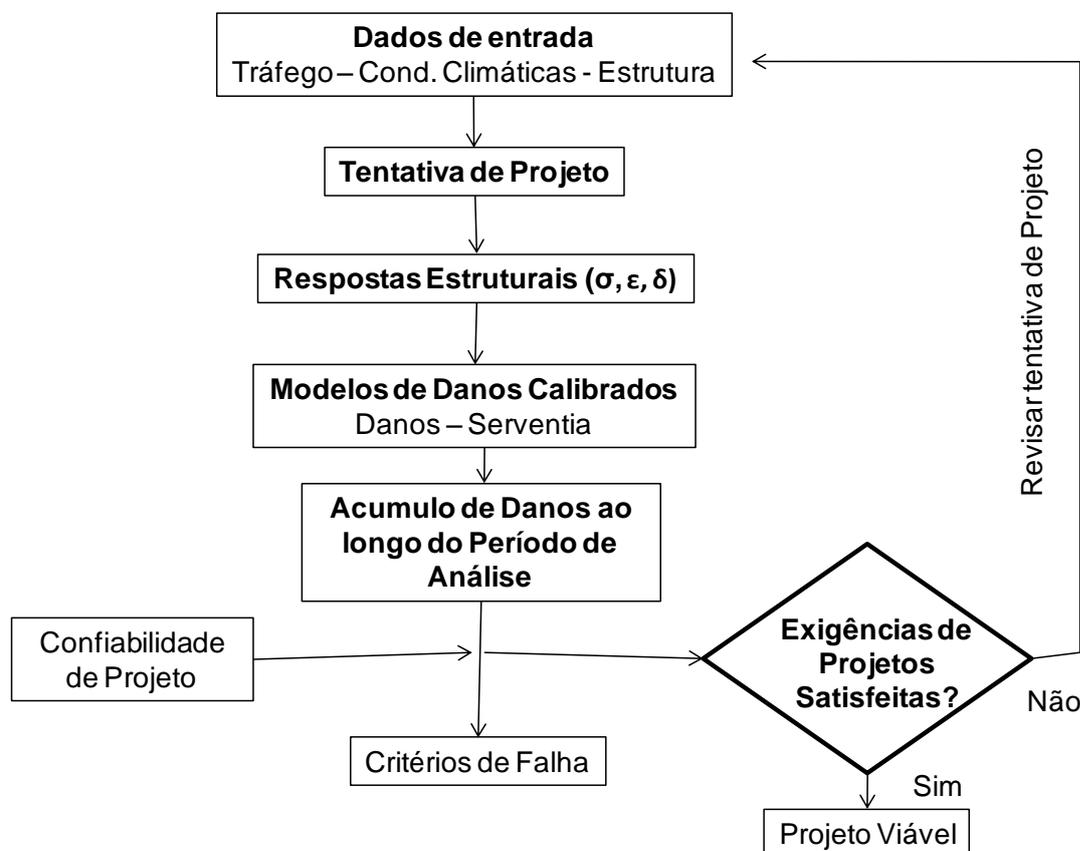
Fonte: MEDINA & MOTTA, 2015.

As equações descritas na Tabela 11 estão melhores compostas no item 2.8 (modelos de previsão de desempenho), para o ano de 2008.

Os parâmetros de análise (critério) por desempenho da AASHTO asseguram uma avaliação mais adequada do pavimento durante sua vida de serviço (KALOUSH & RODEZNO, 2011).

O fluxograma mostrado na Figura 14, demonstra a estrutura básica de análise do AASHTOWare.

Figura 14 - Fluxograma básico do sistema MEPDG (2004)



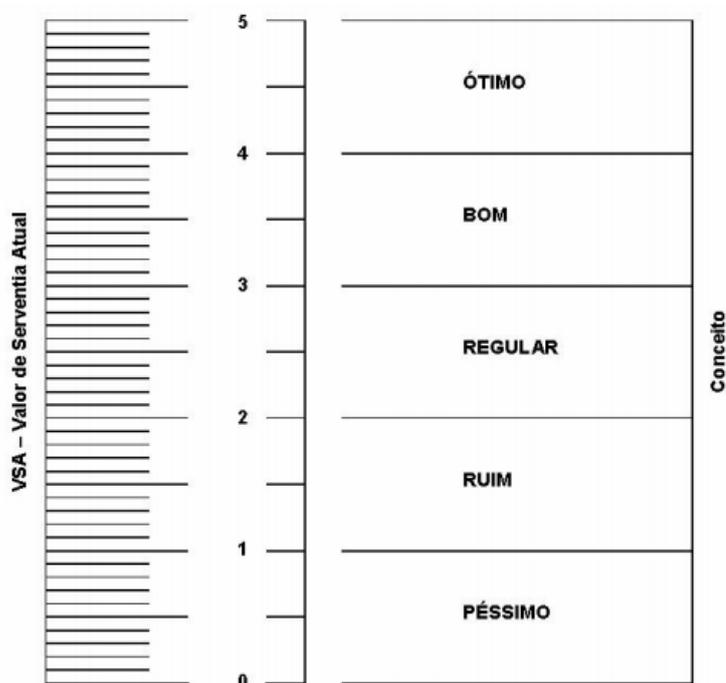
Fonte: MEDINA & MOTTA, 2015.

2.5 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DOS PAVIMENTOS

Para Mattos (2014) os principais mecanismos de deterioração dos pavimentos flexíveis que devem ser considerados em um dimensionamento de pavimentos racional, são os que afetem o nível de serventia em termos funcionais ou que gerem falhas na estrutura durante a vida de projeto. O valor de serventia é uma nota atribuída por cinco avaliadores dentro de um veículo de passeio, classificando o estado da superfície de um determinado pavimento quanto ao seu conforto ao rolamento.

O valor de serventia atual normatizado pelo DNIT (2003) está ilustrado por meio da escala de avaliação na Figura 15, onde estes valores variam de perfeitas condições (ótimo), nota 5, até condições extremamente insatisfatórias (péssimo), nota zero. Aonde a nota final vem da média das notas de 5 avaliadores.

Figura 15 - Escala de avaliação da serventia das rodovias



Fonte: DNIT, 2003.

O Valor de serventia impactará na confiabilidade, visto que segundo Motta (1991) a confiabilidade é definida como a medida da probabilidade da serventia do pavimento permanecer em um nível adequado através da vida de serviço, ou seja, é a probabilidade de sucesso no projeto do pavimento. E para avaliar a Confiabilidade, é necessário considerar os possíveis modos de ruptura, sendo que esta avaliação deve ser feita por meio de estudos probabilísticos.

Hartmann (2009) diz que a degradação de um pavimento está correlacionada a várias patologias, como: deformações permanentes, trincamento por fadiga, trincamento por retração térmica, perda de adesão entre o agregado e o ligante e suscetibilidade a umidade. No entanto, cita que as duas primeiras estão mais relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto as outras estão relacionadas mais diretamente com as características dos materiais utilizados e as condições climáticas em que o pavimento está construído.

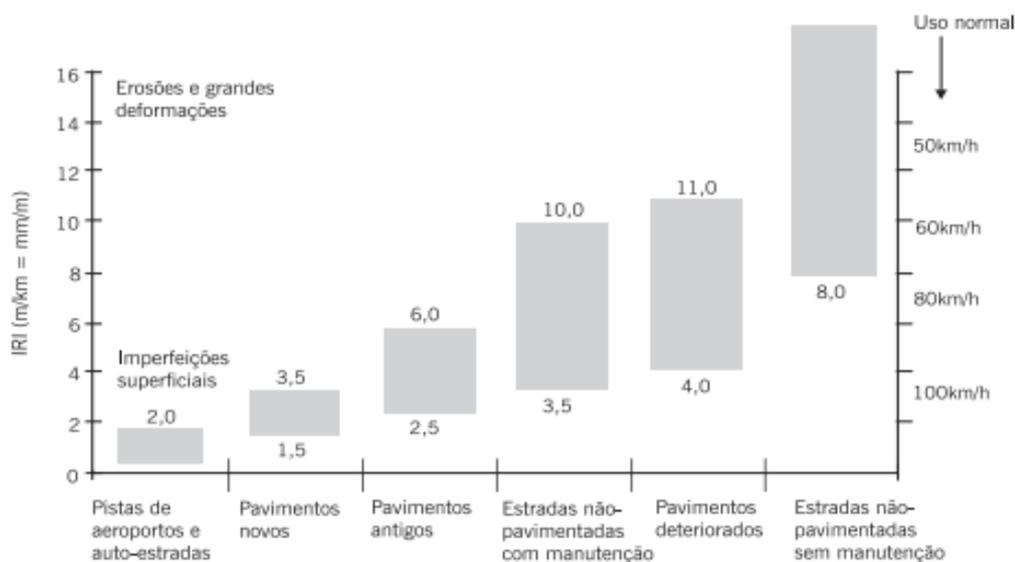
2.5.1 IRI (*International Roughness Index*)

O IRI é um índice estatístico, que é expresso em m/km e que quantifica os desvios da superfície do pavimento em relação à de projeto (BERNUCCI *et. al.*, 2010). O índice de irregularidade foi amplamente utilizado, devido o método de análise visar o uso de diversos tipos de perfilômetros. As equações de análise foram desenvolvidas de maneira a minimizar os efeitos de alguns parâmetros de medida dos perfilômetros (SAYERS & KARAMIHAS, 1998).

Com isto o IRI se tornou uma ferramenta de controle de obras e aceitação de serviços. A irregularidade é medida ao longo de uma linha imaginária, paralela ao eixo da estrada e, na maioria das vezes, coincidente com as trilhas de roda, podendo em alguns casos haver o interesse de melhor detalhar o perfil. A linha de levantamento longitudinal possui uma largura variável de alguns milímetros a centímetros e depende do tipo de equipamento empregado (BERNUCCI *et. al.*, 2010).

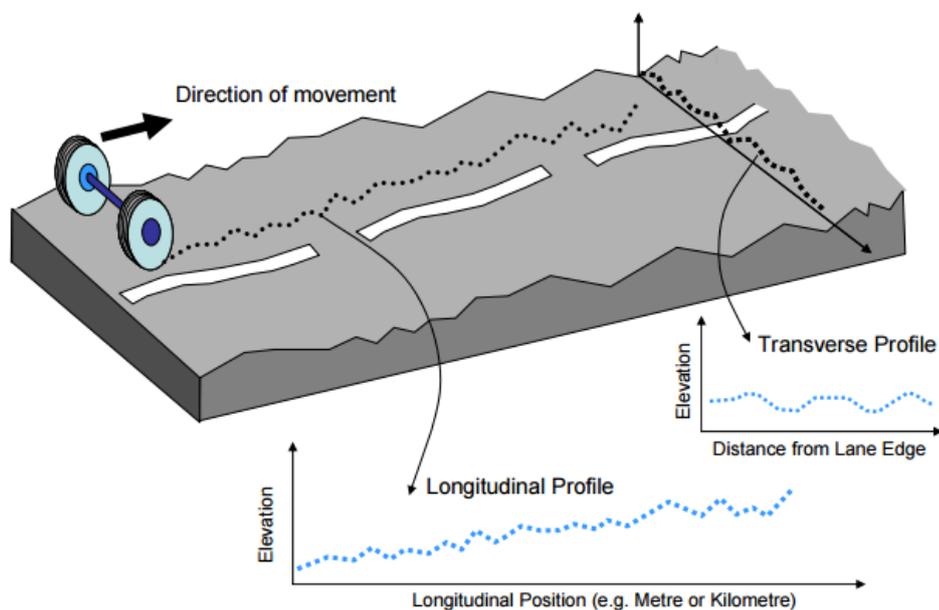
A Figura 16 mostra as faixas de variação do IRI em diversas situações e a Figura 17 ilustra como é a medição do IRI como também demonstra a irregularidade transversal à rodovia. A irregularidade pode ser levantada com medidas topográficas ou por equipamentos com capacidade para medir o perfil longitudinal com ou sem contato, ou ainda indiretamente avaliada por equipamentos do tipo “resposta”, que fornecem um somatório de desvios do eixo de um veículo em relação à suspensão (BERNUCCI *et. al.*, 2010).

Figura 16 - Faixas de Variação do IRI conforme o caso e situação



Fonte: SAYERS & KARAMIHAS, 1998 *apud* BERNUCCI *et. al.* 2010.

Figura 17 - Medição do perfil da rodovia



Fonte: COTTO, 2007.

A classificação de medição das irregularidades está descrita no Quadro 6 de COTTO (2007), correlacionando a classes de equipamentos e as características destes.

Quadro 6 - Classes de medição de irregularidade

Classe de equipamento (dispositivo)	Padrão e Características de Classe
Classe 1: Perfis de Precisão	<ul style="list-style-type: none"> • Mais alto padrão de acurácia nas medições • Demanda medições de precisão de estradas e apuração do IRI • 2% de acurácia em 320 m • IRI repetitivamente de aproximadamente 0,3 m/km em estradas pavimentadas • IRI repetitivamente de aproximadamente 0,5 m/km em todos os tipos de estrada.
Classe 2: Perfis imprecisos	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda medição de perfis de estradas e computação de IRI • Inclui fazer perfis com equipamentos incapazes de acurácia classe 1
Classe 3: Estimativa do IRI por correlações	<ul style="list-style-type: none"> • Não demanda medições de perfis de estrada • Inclui todos os tipos de equipamento de resposta • Equipamentos são calibrados por correlação de resultados de valores de IRI conhecidos em específicas secções de estradas
Classe 4: Classificações subjetivas e equipamentos não calibrados	<ul style="list-style-type: none"> • Inclui classificações subjetivas de rugosidade • Inclui equipamentos tipo - resposta descalibrados e perfilômetros

Fonte: COTTO, 2007.

2.5.2 Deformação

Branco (2006) cita o afundamento de trilha de rodas, um tipo de deformação longitudinal que se desenvolve na banda de passagem dos pneus dos veículos. E que este tipo de degradação do pavimento é o mais significativo dos tipos de deformação.

Para medir o afundamento de trilha de rodas pode ser utilizada uma treliça de alumínio 1,20 m de base, sendo conectada a sua base uma régua vertical, onde é possível levar a régua até o fundo da deformação e medir o afundamento (MEDINA & MOTTA, 2015). Bem como o perfilômetro a laser, que faz a leitura por meio automatizado, utilizando um automóvel com o equipamento acoplado, dando maior

precisão e rapidez nos resultados, visto que os valores são obtidos a cada 2 cm com o cálculo do valor médio da deformação para cada 10 metros (SEVERO, 2004).

Medina & Motta (2015) em seu trabalho citam que o afundamento de trilha de roda admissível em autoestradas é de 10 mm, e para estradas com menor intensidade de tráfego pode ser admitido o valor de 16 mm, porém no instante que atingir 20 mm é recomendável o reparo imediato do pavimento. Também mencionaram os estudos da ASSHO, que determinou em pista experimental o percentual de contribuição de cada camada na deformação permanente, sendo 32% do revestimento asfáltico, 4% da base (britada), 5% da sub-base e 9% do subleito.

2.5.3 Trincamento

O defeito mais frequente nos pavimentos flexíveis no Brasil é o trincamento da camada superior de concreto asfáltico. Que se desenvolve pela flexão alternada da camada superficial apoiada em camadas granulares, geralmente bastante deformáveis elasticamente (MEDINA & MOTTA, 2015).

Nos pavimentos flexíveis, tem origem na maioria dos casos na fadiga dos materiais constituintes das camadas betuminosas, isto devido à repetição dos esforços submetidos ao pavimento. Podem ser também do tipo isoladas ou ramificadas, longitudinal ou transversal dependendo do sentido do desenvolvimento (GONÇALVES, 1999; BRANCO, 2006).

Quando a repetição de cargas ocorre gerando flexão no revestimento asfáltico, podem aparecer fissuras na fibra inferior que se expandem até chegar à superfície do pavimento, dando então origem ao trincamento por fadiga de baixo para cima (*bottom-up cracking*) (MATTOS, 2004).

Núñez *et. al.* (2011) relatam em seus estudos que a tensão cisalhante é um dos fatores que mais influência no desempenho de pavimentos asfálticos. Quando esta tensão for de grandeza elevada, poderá ocorrer ruptura por cisalhamento, gerando trincamentos superficiais de cima para baixo (*top-down cracking*).

O trincamento resultante da variação de temperatura é devido à combinação da retração térmica e da alta rigidez do ligante betuminoso, que ocorre quando a temperatura é reduzida consideravelmente (DNER, 1998).

2.6 SOFTWARE SISPAVBR

O software foi desenvolvido com estrutura no Visual C++, versão 6.0, onde o programa buscou unir a praticidade e simplificação na entrada de dados à agilidade e velocidade nos cálculos, e processamento com a apresentação em gráficos e tabelas de fácil manipulação dos resultados. As janelas e tabelas foram desenvolvidas para fácil edição e com acesso direto a outras ferramentas, como os programas de Elementos Finitos EFin3D de análise elástica de múltiplas camadas AEMC. O intuito é de facilitar o contato de estudantes e projetistas com o processo de análise e dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos (FRANCO, 2007).

Franco (2007) desenvolveu originalmente o SisPav baseado nos modelos aprimorados e calibrados em seus estudos desenvolvidos para sua tese e posteriormente deu sequência aos estudos atualizando o software por meio do SisPavBR no ano de 2013.

2.7 SOFTWARE AASHTOWARE PAVEMENT

AASHTOWare Pavement ME Design é um software de dimensionamento de pavimentos, que se baseia no Guia AASHTO em uma metodologia mecânica-empírica. Os engenheiros podem prever com precisão o desempenho do pavimento, pois o software incorpora propriedades dos materiais, dados climáticos, espectros de carga por eixo e outros avanços (AASHTO, 2014).

O programa MEPDG analisa o desempenho da estrutura de um pavimento mediante critérios preestabelecidos. O software utiliza uma aproximação hierárquica na incorporação das variáveis de entrada, em função da importância do projeto e da disponibilidade dos dados. Tal aproximação se refere aos dados de entrada de tráfego, materiais e meio ambiente. A partir dos resultados obtidos no MEPDG, é possível conduzir uma análise de sensibilidade para verificar os efeitos da variação dos parâmetros de projeto no comportamento dos pavimentos ao longo de sua vida útil. (PELISSON *et. al.*, 2015).

2.8 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO

Segundo Mattos (2014) os principais modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis estão na Tabela 12. Em seu trabalho mostra que o desenvolvimento de um método racional é fundamental para determinar critérios de projeto com base em modelos de previsão de desempenho adequados. No Brasil os que repercutiram em maior reconhecimento internacional foram os desenvolvidos por Queiroz e Paterson, que foram inseridos no *Highway Design Management* (HDM), que por sua vez serve como base a AASTHO e estão empregados nos softwares AASTHOWare Pavement e SisPavBR.

Tabela 12 – Modelos de Previsão de Desempenho

(continua)

	Modelo de previsão de desempenho
Queiroz (1981)	$QI = 12,63ER + 3,31TR + 0,393A + 8,66 \left(\frac{\log N_{acum}}{SNC} \right) + 7,17 \cdot 10^{-5} (B \cdot \log N_{acum})^2$ <p>QI é o coeficiente de irregularidade; ER é a variável que indica a existência ou não de restauração; A é a idade do pavimento desde a construção; N_{acum} é o número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão; SNC é o número estrutural corrigido; B é a deflexão com viga Benkelman (10^{-2}mm)</p>
Paterson (1987)	$RDM = AGE^{0,166} \times SNC^{-0,502} \times COMP^{-2,30} \times NE_4^{ERM}$ $ERM = 0,0902 + 0,0384 \times DEF - 0,009 \times RH + 0,00158 \times MMP \times CRX$ $IRI = [IRI_0 + 725(1 + SNC)^{-4,99} \times NE_4] \times e^{0,0153 - AGE}$ <p>RDM é a profundidade média das trilhas de roda; AGE é a idade do pavimento desde a construção; COMP é o índice de compactação de Paterson; NE_4 é o número equivalente acumulado de solicitação de eixo padrão, calculado pelos fatores de equivalência de carga; DEF é a deflexão máxima média medida com viga Benkelman (10^{-2}mm); RH é a variável que indica se o pavimento é restaurado ou não; MMP é a precipitação média mensal; CRX é a área de trincamento proposto por Paterson (1987); IRI_0 é a irregularidade longitudinal inicial; SNC é o número estrutural corrigido.</p>

(continuação)

Marcon (1996)	$QI = 25,783 + 4,0 \times 10^{-6} \times NA - 5,0 \times 10^{-14} \times NA^2$ $DEFM = 44,928 + 1,0 \times 10^{-5} \times NA$ $TRI = 3,3051 + 5,0 \times 10^{-7} \times NA$ <p>QI é o quociente de irregularidade; DEFM é a deflexão máxima média; TRI é a profundidade média nas trilhas de roda; NA é o número equivalente acumulado de solicitações do eixo-padrão.</p>
Yshiba (2003)	$IRI = 2,8 + 0,38.P(I) + 0,31.P(N) - 0,16.P(S) + 0,09.P(I).P(N) - 0,08.P(I).P(S)$ $DEF = 56 + 8,7.P(I) + 4,25.P(N) - 4,75.P(S) + 1,81.P(I).P(S)$ $P(I) = \frac{I-13}{8} \quad P(N) = \frac{N-5 \times 10^4}{10^5} \quad P(S) = \frac{S-5,5}{2}$ <p>IRI é a irregularidade longitudinal; DEF é a deflexão medida pela viga Benkelman; I é a idade do revestimento; N é o número de solicitações de tráfego; S é o número estrutural corrigido.</p>
Vitorello (2008)	$DEF = 47,87 + 1,65.N_{acum}$ $QI = 19,35 + 0,82.N_{acum} + 5,81.i$ $ATR = 2,36 + 0,56.N_{acum}$ <p>DEF é a deflexão medida com o FWD (10^{-2}mm); QI é o quociente de irregularidade; N_{acum} é o número acumulado de solicitações do eixo padrão; i é a variável que indica se o pavimento sofreu restauração; ATR é o afundamento médio nas trilhas de rodas.</p>

(continuação)

AASHTO/MEPDG (2004/2008)	$N_f = 0,00432 \times k'_1 \times C \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} \times \left(\frac{1}{E}\right)^{1,281}$	
	$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{11,02 - 3,49h_{ac}}}}$	<i>Bottom-up</i>
	$k'_1 = \frac{1}{0,0001 + \frac{29,844}{1 + e^{30,544 - 5,7357h_{ac}}}}$	<i>Top-down</i>
	$C = 10^{4,84\left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69\right)}$	
	$FC_{bottom} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C'_1 + C'_2 \cdot \log_{10}(D1 \cdot 100))}}\right) \left(\frac{1}{60}\right)$	
	$FC_{top} = \left(\frac{1000}{1 + e^{(2,8 - 1,4 \cdot \log_{10}(D2 \cdot 100))}}\right) (10,56)$	
	$C'_1 = -2 \cdot C$	
	$C = -2,40874 - 39,748 \cdot (1 + h_{ac})^{-2,856}$	
	<p>N_f é a vida útil do pavimento quanto à fadiga;</p> <p>k'_1 é o coeficiente em função da espessura do revestimento;</p> <p>C é coeficiente em função dos parâmetros volumétricos da mistura asfáltica;</p> <p>ε_t é a deformação de tração no revestimento;</p> <p>E é o módulo dinâmico do revestimento;</p> <p>h_{ac} é a espessura do revestimento;</p>	<p>V_a é o volume de vazios com ar no revestimento;</p> <p>V_b é o teor de asfalto em volume no revestimento;</p> <p>FC_{bottom} é o trincamento da base para o topo;</p> <p>$D1$ é o dano de fadiga da base para o topo;</p> <p>$D2$ é o dado de fadiga do topo para a base;</p>

(conclusão)

Franco (2007/2014)	$N_f = fcl \cdot k_1 \cdot \varepsilon_t^{k_2} \cdot MR^{k_3}$ $\frac{\varepsilon_p(N)}{\varepsilon_r} = \mu \cdot (N)^{-\alpha}$ $\frac{\sigma_{adm}}{\rho_0} = \frac{\sigma_3}{\rho_0} + \varphi_3 \sqrt{\frac{\varepsilon}{l_0} \frac{1}{\varphi_1 \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\varphi_2} N^{\varphi_4}}} \quad (\text{GUIMARÃES, 2014})$ <p> N_f é a vida útil do pavimento quanto à fadiga; fcl é o fator campo – laboratório (10000); k_1, k_2, k_3, são os coeficientes de regressão, (1,904x10⁻⁶, -2,821, -0,740); ε_t é a deformação específica de tração no revestimento; MR é o módulo de resiliência da mistura asfáltica; ε_p é a deformação permanente devido à repetição de carga; ε_r é a deformação específica resiliente; N é o número de repetições de carga; μ e α são os coeficientes de regressão; σ_{adm} é a tensão admissível; σ_3 é tensão de desvio; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ são coeficientes de regressão que dependem do solo. ρ_0 pressão atmosférica 1kgf/cm². </p>
Mattos (2009)	$BPN_{final} = 2,67 + 0,95 \cdot BPN_{inicial} - 0,7 \cdot \Delta T$ $HS_{final} = 0,14 + 0,7 \cdot HS_{inicial} - 0,008 \cdot \Delta T$ <p> BPN_{final} é a previsão de atrito após determinado tempo; $BPN_{inicial}$ é o valor do atrito medido; ΔT é o intervalo de tempo; HS_{final} é a previsão da macrotextura após determinado tempo; $HS_{inicial}$ é o valor da macrotextura medida. </p>

Fonte: adaptado MATTOS, 2014.

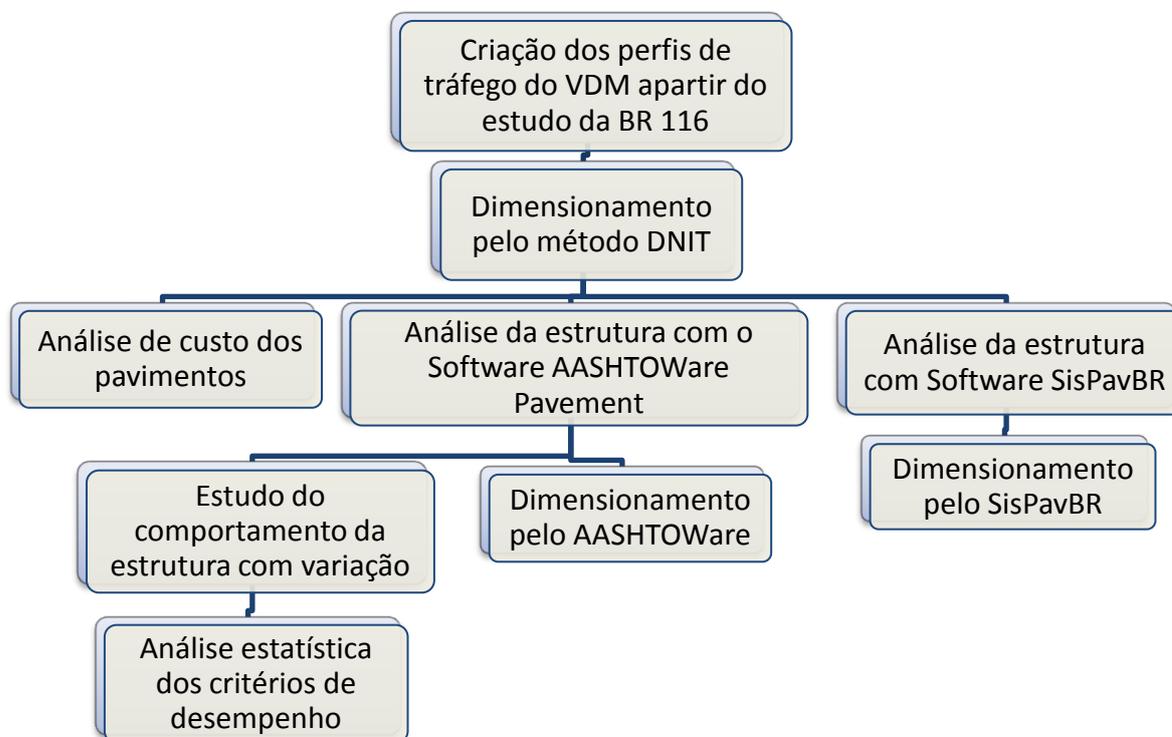
3 METODOLOGIA

3.1 PLANEJAMENTO

O trabalho será estruturado com base em dois segmentos de análises. O primeiro visa realizar a comparação das análises obtidas por meio dos Softwares AASHTOWare Pavement e SisPavBR, após dimensionamento dos pavimentos pelo método oficial do DNIT. O segundo ramo do estudo se baseia em fazer uma análise paramétrica de cunho estatístico, onde será desenvolvida uma análise de comportamento da estrutura do pavimento, quando ocorrer variação na espessura e módulos de resiliência das camadas constituintes.

O fluxograma demonstra as seguintes questões a serem desenvolvidas e analisadas durante o trabalho (Figura 18).

Figura 18 - Fluxograma de Atividades



3.1.1 Estudo comparativo

Foi realizado o estudo comparativo entre o método do DNIT e os softwares do SisPavBR e AASHTOWare Pavement. Este estudo procedeu-se da seguinte forma, de primeiro momento foi realizado o dimensionamento pelo método do DNIT, onde foi obtida a espessuras das camadas do pavimento.

Com esta estrutura definida foi então feito uso do software do SisPavBR para determinar se a estrutura teria capacidade de suporte durante a vida útil prevista em projeto conforme os modelos de previsão do software. O mesmo foi realizado com o software da AASHTO (*level 3*). Vale lembrar que foram definidos os materiais a serem utilizados nas camadas do pavimento e não houve alteração nas características dos materiais no decorrer dos estudos.

As simulações se deram por meio da avaliação com confiabilidade de 50% e 90% para ambos os softwares. Desta forma, a Tabela 13 mostra o número de combinações que foram realizadas para “rodar” em cada sistema.

Tabela 13 – Número de combinações a serem analisadas

Valores de “N”	Módulo Subleito	Confiabilidade
5 casos	3 casos	2 casos
Total		
30 casos para cada Software		

3.1.2 Estudo estatístico por meio AASHTOWare

Por meio do software AASHTOWare foi realizada a análise do comportamento dos parâmetros de avaliação do pavimento, efetuando a variação das espessuras e módulos de resiliência das camadas, isto para os cinco carregamentos utilizados (Tabela 14).

Com as combinações usadas se buscou abranger o maior número de possibilidades de variação do pavimento, no entanto, os materiais utilizados não variaram, fez-se uso apenas de MS e BGS, mais comumente utilizados nas rodovias da região sul.

Tabela 14 – Casos em estudo

	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
Espessura	5; 10; 15; 20 cm	15; 20; 25 cm	16; 20; 32 cm	Não se aplica
Módulo de Resiliência	<i>Default</i> (sistema calcula)	100; 200; 300 MPa	100; 200; 300 MPa	53; 124 MPa
Valores de “N” (USACE)	2,5x10 ⁶ ; 7,5x10 ⁶ ; 2,5x10 ⁷ ; 7,5x10 ⁷ ; 1,0x10 ⁸			
Total	3240 casos			

3.2 TRÁFEGO DE REFERÊNCIA

Foram utilizados os dados do tráfego da BR 116, obtidos por Klamt (2014) por meio da ECOSUL – Empresa Concessionária de Rodovias do Sul, na Praça de Bom Retiro, em Pelotas/RS. Com estes dados o autor chegou aos valores de volume de tráfego correspondente a cada categoria conforme a Tabela 15.

Foi aplicado um percentual aos valores de VDM, para que fosse possível definir o volume de tráfego correspondente ao N desejado; desta forma obteve-se o N para o dimensionamento por meio do método oficial do DNIT e nos sistemas SisPavBr e AASHTOWare que são baseados na Hipótese de Miner e necessitam da discretização do tráfego.

Para o cálculo dos valores de N, foi levada em consideração a taxa de crescimento determinada no trabalho de Klamt (2014) de 4,86% com um crescimento do volume de tráfego médio geométrico, por meio da equação 20. E para o cálculo do FEC's foram utilizadas as equações preconizadas pela USACE (Tabela 16) e o espectro de eixos conforme a Tabela 17.

$$N = 365 \cdot VDM \cdot \frac{(1+t)^P}{\ln(1+t)} \cdot Fv \cdot Ff \cdot Fs \cdot Fd \quad (20)$$

Onde: VDM é o volume diário médio;

t é a taxa de crescimento;

P é o tempo de vida do projeto;

Fv é o fator de veículos;

Ff é o fator de frota;

Fs é o fator de sentido;

Fd é o fator de distribuição.

Tabela 15 – Volume de tráfego de 2013 para cada categoria da BR 116

Categoria	Silhueta	Contagem 2013
1		1.650.844
2		217.749
3		9.626
4		228.612
5		1.874
6		43.999
7		156.135
8		225.244
10		22.584
11		551
12		8.698
15		12
Total		2.565.928

Tabela 16 – Fatores de equivalência de carga da USACE

Tipo de eixo	Faixa de cargas (tf)	FEC (P em tf)
Dianteiros simples e traseiros simpes	0 – 8	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem-duplo	0 – 11	$FEC = 1,592 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FEC = 1,528 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem-triplo	0 – 18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

P = Carga por eixo

Fonte: DNIT, 2006b.

Tabela 17 – Espectro de eixos de cada categoria

Categoria	Eixos de Veículos			
	ESRS ¹	ESRD	ETD	ETT
1	0	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	0	0	0
4	1	0	1	0
5	0	0	0	0
6	1	1	1	0
7	1	1	0	1
8	1	0	1	1
10	1	2	2	0
11	1	2	1	1
12	1	1	2	1
15	1	3	3	0

¹ Eixo dianteiro

Fonte: KLAMT, 2014.

Os valores de N definidos pelo DNIT para as espessuras mínimas de revestimentos variam entre faixas, foi então utilizado valores médios desta faixa como referência para se determinar qual seria o percentual do volume de tráfego atual que deveria ser aplicado. A Tabela 18 mostra os valores utilizados.

Tabela 18 – Valores de N utilizados na pesquisa

Faixa de valores de “N” (DNIT)	Valores de “N” utilizados	Espessura mínima (mm)
$\leq 10^6$	-	15 a 30
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	$2,5 \times 10^6$	50
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	$7,5 \times 10^6$	75
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	$2,5 \times 10^7$	100
$N > 5 \times 10^7$	$7,5 \times 10^7$	125
-	$1,0 \times 10^8$	125

Para as cargas por eixo foi considerada a hipótese de que o carregamento se deu com 80,0% da frota com carga máxima no valor máximo estabelecido pelo CTB, e que os demais 20,0% de veículos trafegam vazios, se deslocando na busca de carga ou retornando para as bases de referência (LASTRAN, 2003). Os valores utilizados de carga por eixo são os descritos na Tabela 19.

Tabela 19 – Cargas por eixo para cada situação

	ESRS	ESRD	ETD	ETT
Carga Máxima Legal (tf)	6	10	17	25,5
Carga veículo vazio (tf)	0,5	1	4	5

Foi determinado com auxílio dos valores e equações mencionadas anteriormente os percentuais de VDM necessários (Tabela 20) para atingir os valores de N (utilizados), com isso foi realizado o dimensionamento dos pavimentos pelo Método do DNIT, predefinindo assim as espessuras das camadas do pavimento que foram utilizados no sistema do AASHTOWare e SisPavBR.

Tabela 20 – Percentuais VDM (BR 116) atual utilizados para atingir os valores de “N”

Percentual do VDM	191%			143%			48%			14%			5%		
	VDM DIARIO														
CATEGORIA	Total	80%	20%	Total	80%	20%	Total	80%	20%	Total	80%	20%	Total	80%	20%
CAT1	4319	3455	864	3236	2589	647	1076	861	215	323	259	65	108	86	22
CAT2	570	456	114	427	341	85	142	114	28	43	34	9	14	11	3
CAT3	25	20	5	19	15	4	6	5	1	2	2	0	1	1	0
CAT4	598	479	120	448	359	90	149	119	30	45	36	9	15	12	3
CAT5	5	4	1	4	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
CAT6	115	92	23	86	69	17	29	23	6	9	7	2	3	2	1
CAT7	409	327	82	306	245	61	102	81	20	31	24	6	10	8	2
CAT8	589	471	118	442	353	88	147	117	29	44	35	9	15	12	3
CAT 10	59	47	12	44	35	9	15	12	3	4	4	1	1	1	0
CAT 11	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAT 12	23	18	5	17	14	3	6	5	1	2	1	0	1	0	0
CAT 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	6714	5371	1343	5030	4024	1006	1673	1339	335	503	402	101	168	134	34
VDM TOTAL VEÍCULOS COMERCIAIS	2364			1771			589			177			59		
N	1,0x10 ⁸			7,5x10 ⁷			2,5x10 ⁷			7,5x10 ⁶			2,5x10 ⁶		

Vale lembrar que a contagem inicial do volume de tráfego, foi feita nos dois sentidos pela concessionária, ou seja, o tráfego é bidirecional. Assim para fins de cálculo de N os valores do volume de tráfego foram divididos em dois.

Para o estudo foi encontrado um valor de 0,35 para o fator de frota, que é a relação entre o VDM e o VDM de veículos comerciais.

3.3 ESTRUTURA DO PAVIMENTO UTILIZADO

Foram iniciados os dimensionamentos dos pavimentos a partir dos materiais e parâmetros que compõem a Tabela 21. Sendo que tanto no dimensionamento pelo software AASHTOWare ou SisPavBR a aderência entre as camadas foi desconsiderada, desta forma, o pavimento ficou mais próximo ao que se consegue executar em campo com maior facilidade, e assim o projeto já parte de um fator de segurança no dimensionamento.

Tabela 21 – Estrutura do pavimento usado para dimensionamento

Camada	Material	Módulo de Resiliência	Coefficiente de Poisson
Revestimento	CA	Calculado pelo AASHTOWare SisPavBR = 5000 MPa	0,35
Base	BGS	300 MPa	0,40
Sub-base	MS	208 MPa	0,40
Subleito	Solo (variando CBR)	53, 110 e 124 MPa	0,45

Os valores mencionados na Tabela 21 foram baseados no trabalho de Ribas (2014), sendo os coeficientes de Poisson os utilizados nos seus estudos e os módulos os valores médios obtidos após uma análise de refinamento estatístico dos valores obtidos. Os módulos de subleito utilizados basearam-se no banco de dados do AASHTOWare, desta forma, para equivalência aos CBR's de 5, 10 e 15%, foi optado pelos solos A-5 (5%), A-3 (10%) e A-1-a (15%).

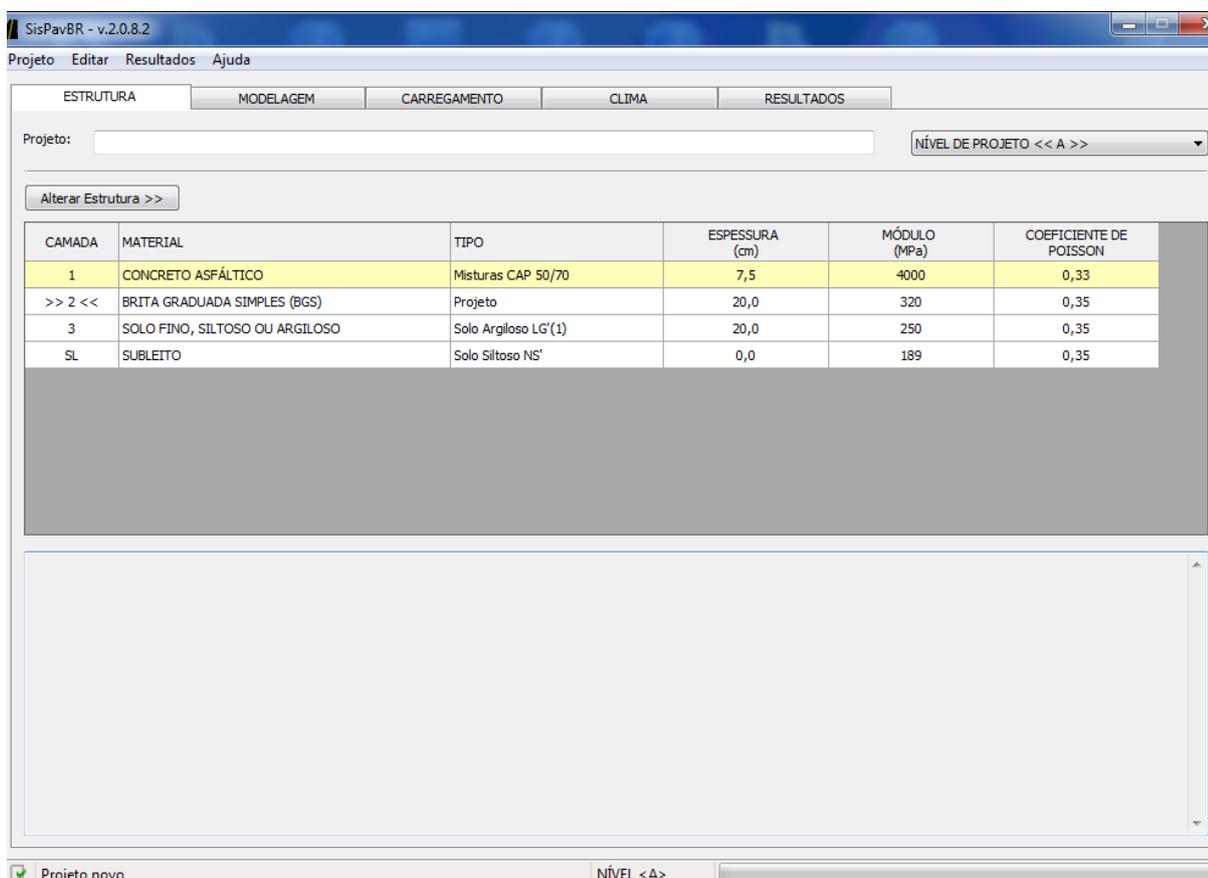
O ligante utilizado no software AASHTOWare foi o 70-22 e no SisPavBR como equivalência foi feito uso do modificado.

3.4 UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE SISPAVBR

A tela inicial ao ser acessado o software do SisPavBR versão 2.0.8.2 é ilustrada na Figura 19, onde é possível observar que o sistema está dividido em cinco itens, sendo eles a estrutura, modelo, carregamento, clima e por fim a aba que após efetuado dimensionamento ou estimativa de vida do pavimento, fica aberta com acesso aos resultados.

A versão utilizada no trabalho está baseada nos esforços de tração na camada inferior do revestimento para determinação do dano crítico, sendo que atualmente a versão do SisPavBR já está sendo implementada para fazer a avaliação de um pavimento levando em consideração uma faixa (malha) de pontos onde ocorrem os esforços de tração e assim obter o dano médio para o revestimento.

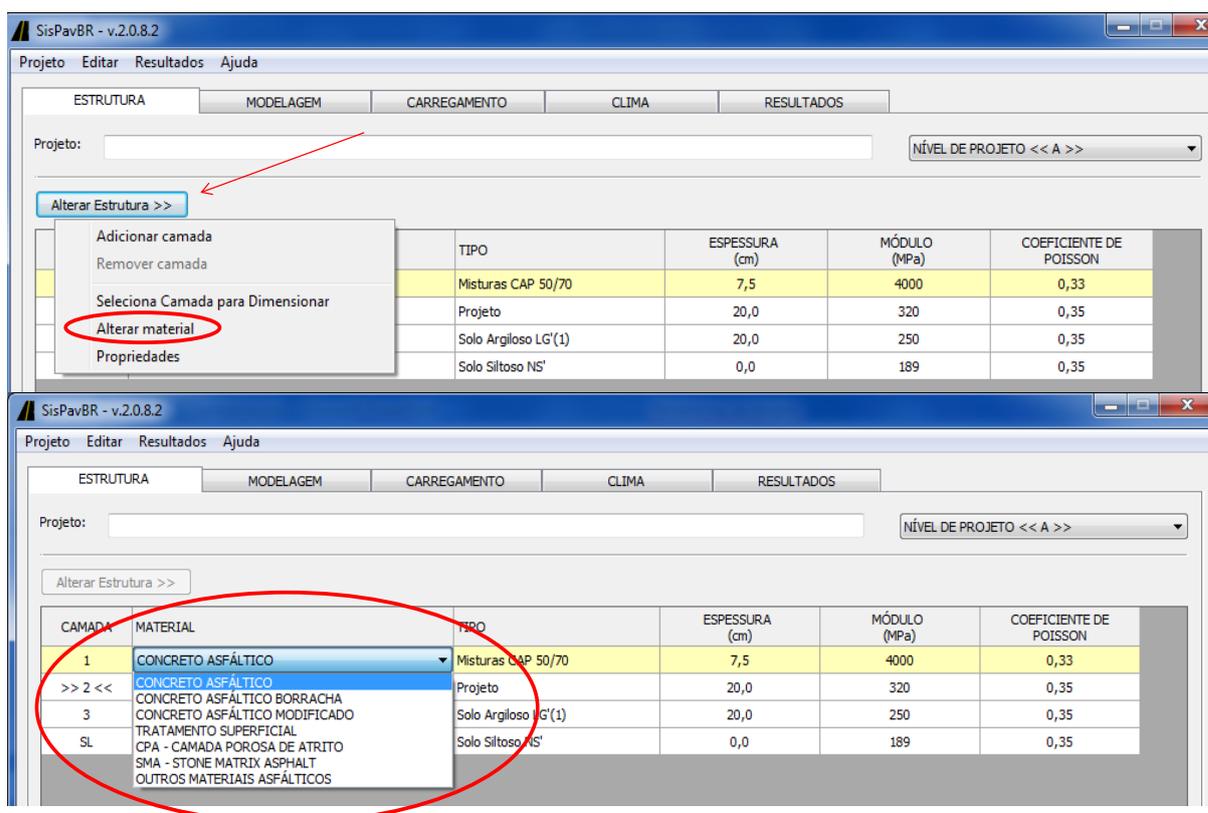
Figura 19 - Tela inicial SisPavBR



Dentro da aba estrutura é possível inserir/remover camadas, como também alterar o material e o tipo de material ao fazer o acesso conforme mostra a Figura 20. Cada camada que se deseja efetuar modificações deve estar selecionada para que haja possibilidade de alterações destinadas a cada camada e material, como por exemplo, no revestimento asfáltico existe a possibilidade de alteração do ligante asfáltico, diferentemente da camada de subleito, que irá dispor apenas de materiais como solos.

É possível também fazer a edição dos materiais, espessura da camada, coeficiente de Poisson, módulo de resiliência, e também características mais específicas de cada camada, como por exemplo, no caso do revestimento que mostra a Figura 21, onde estão grifados os dados que se referem à faixa granulométrica, percentual de ligante, índice de vazios e o percentual de abrasão.

Figura 20 - Opção para alteração das camadas



Como no caso do software AASHTOWare, a estrutura do pavimento seguiu a mesma utilizada, sendo que os materiais foram escolhidos no ícone “projeto” visto que neste existia a possibilidade de editar os valores para que assim ficassem iguais aos utilizados anteriormente.

Na aba de modelagem é possível definir a confiabilidade implicada ao projeto, vida de projeto, percentual de erro, as condições de tráfego, como percentual de veículos trafegando na faixa, variação lateral, alinhamento e também pode ser informado o raio de carregamento (FWD), a carga a ser aplicada e os pontos de leitura (Figura 22).

Figura 21 - Interface de alteração das características das camadas

The screenshot shows a software window titled 'Propriedades da Camada 1'. On the left, a table under 'BASE DE DADOS' lists 'Projeto', 'Misturas CAP 50/70', and 'Misturas CAP 30/45', with the first three rows circled in red. The main area is divided into sections for 'CONCRETO ASFÁLTICO' with the following data:

CONCRETO ASFÁLTICO	
Parâmetros	
Espessura (cm)	7,5
Coefficiente de Poisson	0,33
Contacto	Não Adesivo
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	4000
Características	
Material selecionado	Misturas CAP 50/70
Tipo de CAP	CAP 50/70
Faixa Granulométrica	Faixa B
Teor de asfalto (%)	6,00%
Volume de vazios (%)	5,0%
Abração Los Angeles (%)	40,0%
Fadiga de Misturas Asfálticas	
Considerar no projeto:	SIM
Modelo:	COPPE, 2014
Fator Campo-Laboratório (fcl):	10000,00
Coefficiente de Regressão (k1):	2,328e-9
Coefficiente de Regressão (k2):	-2,623
Coefficiente de Regressão (k3):	0,223
Erro padrão (%):	40,0
Deformação Permanente	

Figura 22 - Aba modelagem

The screenshot shows the 'Modelagem' tab of a software interface. The left sidebar lists model options: '1 - CONCRETO ASFÁLTICO', '2 - BRITA GRADUADA SIMPLES (BGS)', '3 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO', and '4 - SUBLEITO'. The main area displays the following settings:

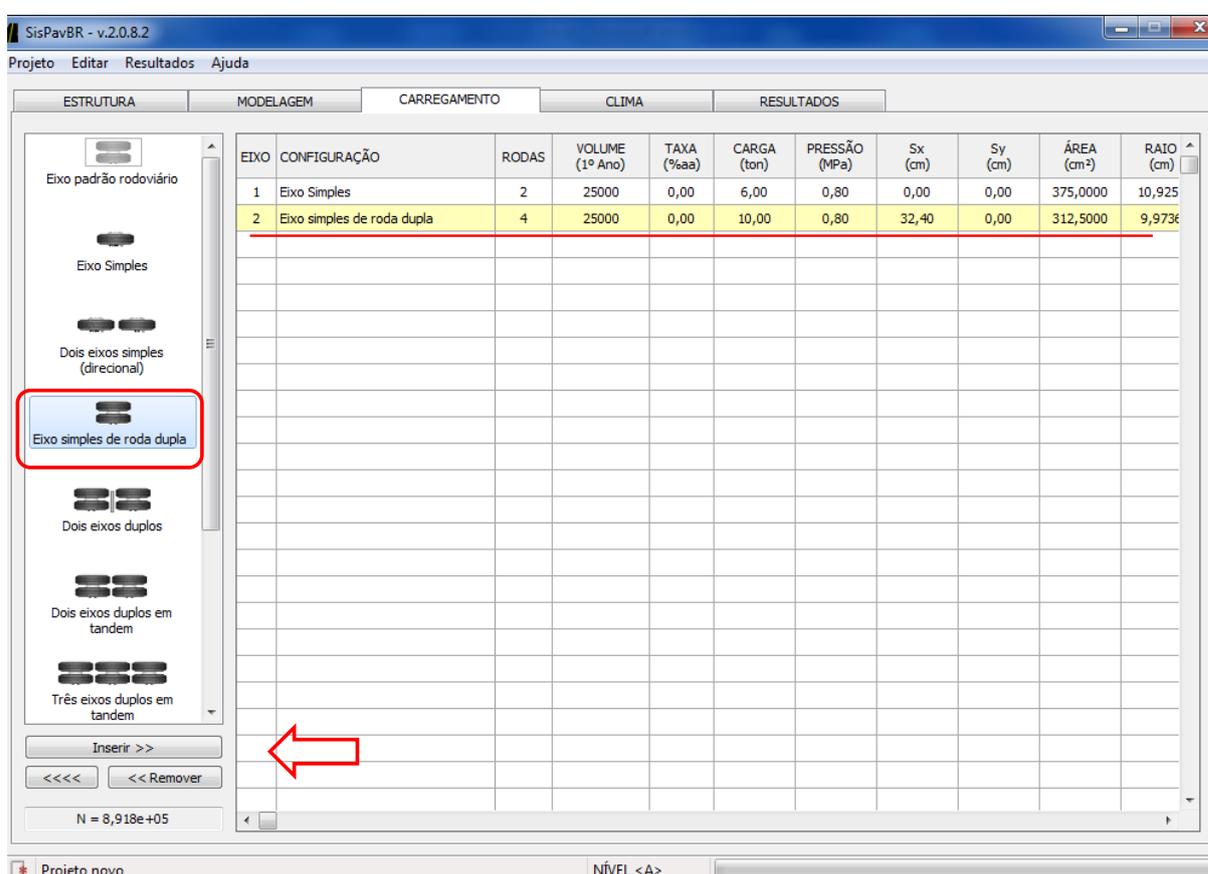
OPÇÕES DE CÁLCULO	
Nível de confiabilidade (%)	85%
Tolerância no dimensionamento(%)	2,00
Número máximo de tentativas:	20
Período de projeto (anos):	10
OPÇÕES DE TRÁFEGO	
Condições do tráfego:	Normal
% Veículos na faixa de projeto:	100%
Alinhamento de Projeto (cm):	0,0
Variação lateral do tráfego (cm):	30
CONTROLE DE CAMPO	
Raio de carregamento FWD (cm):	15,0
Carga de impacto FWD (ton):	4,00
Ponto de leitura 1 (cm):	0
Ponto de leitura 2 (cm):	15
Ponto de leitura 3 (cm):	30
Ponto de leitura 4 (cm):	45
Ponto de leitura 5 (cm):	60
Ponto de leitura 6 (cm):	90
Ponto de leitura 7 (cm):	120
Ponto de leitura 8 (cm):	150
Ponto de leitura 9 (cm):	180

Para o trabalho foi alterado a confiabilidade, ou seja, para a previsão de capacidade do pavimento utilizando as espessuras obtidas por meio do

dimensionamento do DNIT, a confiabilidade imposta foi de 50% e 90%, no entanto, para o dimensionamento se fez uso apenas de 50%.

No carregamento é realizada a escolha dos eixos que farão parte do dimensionamento e em seguida é inserido o eixo na tabela (Figura 23). Ao inserir o eixo é possível então realizar a edição do número de veículos que irão passar sobre o pavimento, a taxa de crescimento do tráfego, o carregamento, o posicionamento, área de contato, pressão dos pneus e raio. Sendo que devem ser informados todos os eixos que farão parte da composição deste tráfego.

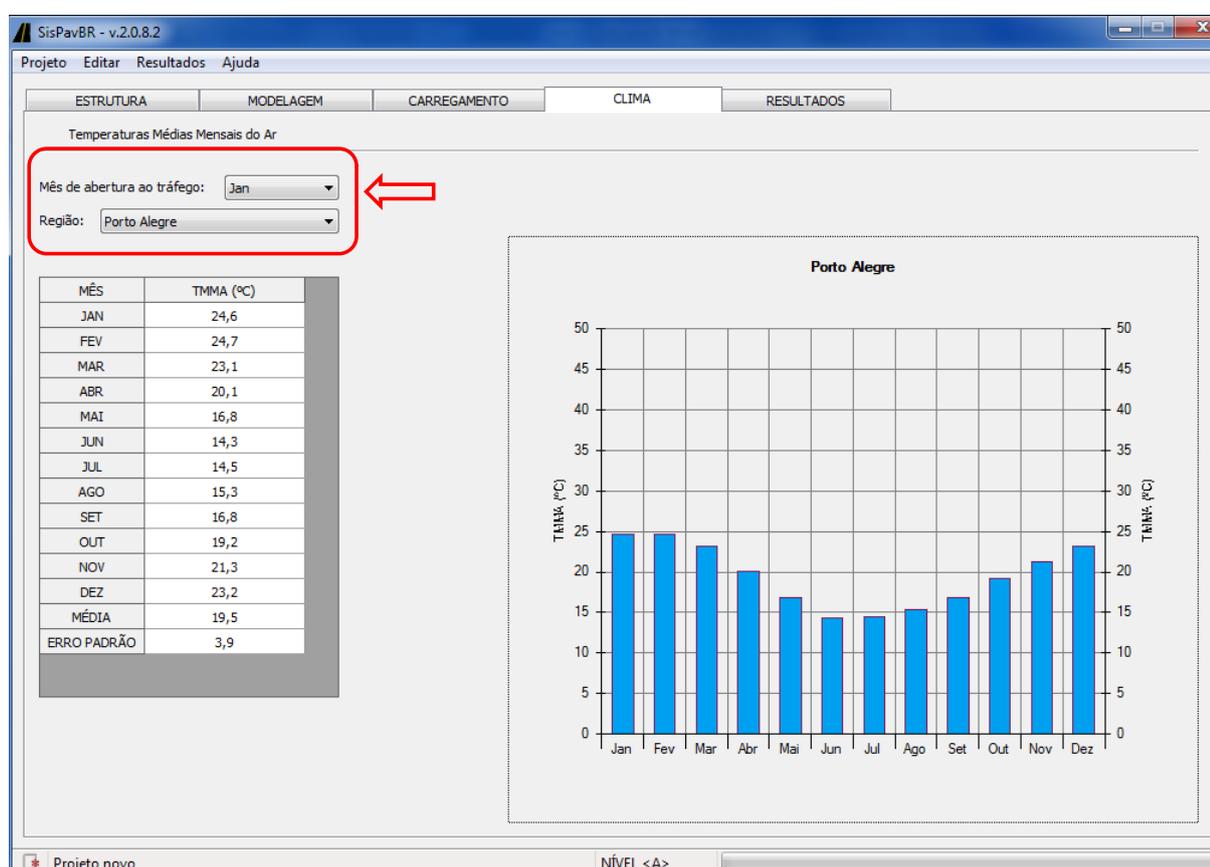
Figura 23 - Tela de entrada dos dados de carregamento



No trabalho, foi inserido cada tipo de eixo duas vezes, sendo que uma vez o eixo estava com 80% da carga máxima legal e 20% com o carregamento mínimo (vazio) e, foi também alterado o VDM, correspondente a cada percentual mencionado de carregamento. Para todos os eixos a taxa de crescimento foi considerado o valor de 4,6%, determinados por Klamt (2014).

Na opção destinada ao clima, é possível informar o mês de abertura do pavimento ao tráfego e também escolher o município para se usufruir dos dados de temperatura média mensal do ar (Figura 24), sendo que o software possui um banco de dados com 25 municípios, entre capitais e grandes centros. Também é possível optar por “outros” e criar o modelo de temperatura que se queira utilizar para o dimensionamento, ou seja, caso se tenha à disposição as informações climáticas de temperatura da região onde irá se desenvolver o projeto é possível informar isto ao sistema.

Figura 24 - Interface de escolha do clima

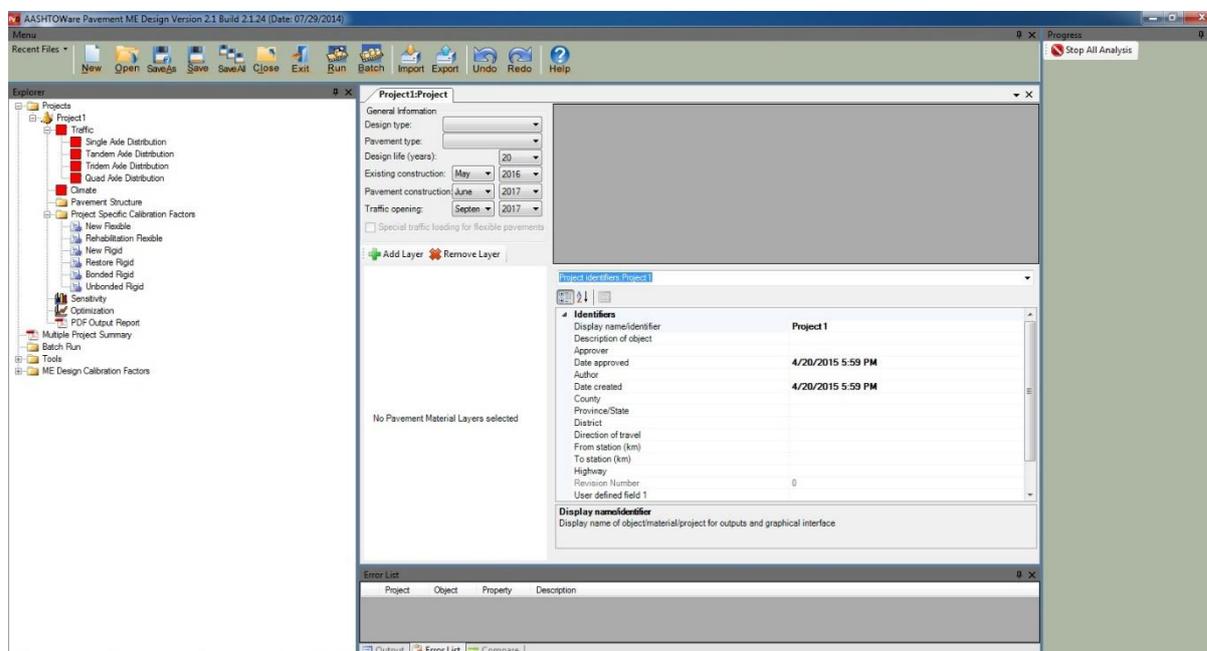


Para o dimensionamento realizado no trabalho, foram utilizados os dados referentes ao município de Porto Alegre no Rio Grande do Sul, visto que o tráfego utilizado é de uma rodovia localizada em partes da região escolhida e abertura do tráfego no mês de janeiro, onde existe uma severidade das altas temperaturas, o que pode implicar em maiores deformações iniciais do pavimento.

3.5 UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE AASHTOWARE

A versão do software utilizado foi AASHTOWare Pavement ME Design 2.1 do ano de 2014 (*level 3*). Na tela inicial de acesso ao software é mostrada na Figura 25, onde o sistema disponibiliza as primeiras opções para dar início à entrada de informações que constituirão o projeto de dimensionamento de pavimentos, ou seja, deve ser informado o tipo de projeto que será desenvolvido.

Figura 25 - Tela inicial do AASHTOWare



Em sequência deve ser optado por um projeto novo, que permite efetuar a escolha do tipo de pavimento que será dimensionado, ou seja, é possível partir de um pavimento novo, sendo este um pavimento flexível ou rígido, também a recuperação de pavimentos com reforços estruturais.

A Figura 26 demonstra o início da entrada de dados para a caracterização do pavimento e também os critérios a serem avaliados pelo software. A imagem mostra que está dividida em dois setores, sendo que cada um deles compete a desempenhar as seguintes funções:

Na Figura 27 que representa o setor (1) estão os dados iniciais onde se escolhe o tipo de pavimento, a vida de projeto determinada para este pavimento, a

data inicial da construção do pavimento, o término e a liberação do pavimento para o uso. Isto devido ao software levar em consideração os efeitos climáticos que o pavimento pode sofrer.

Figura 26 - Tela de um projeto novo

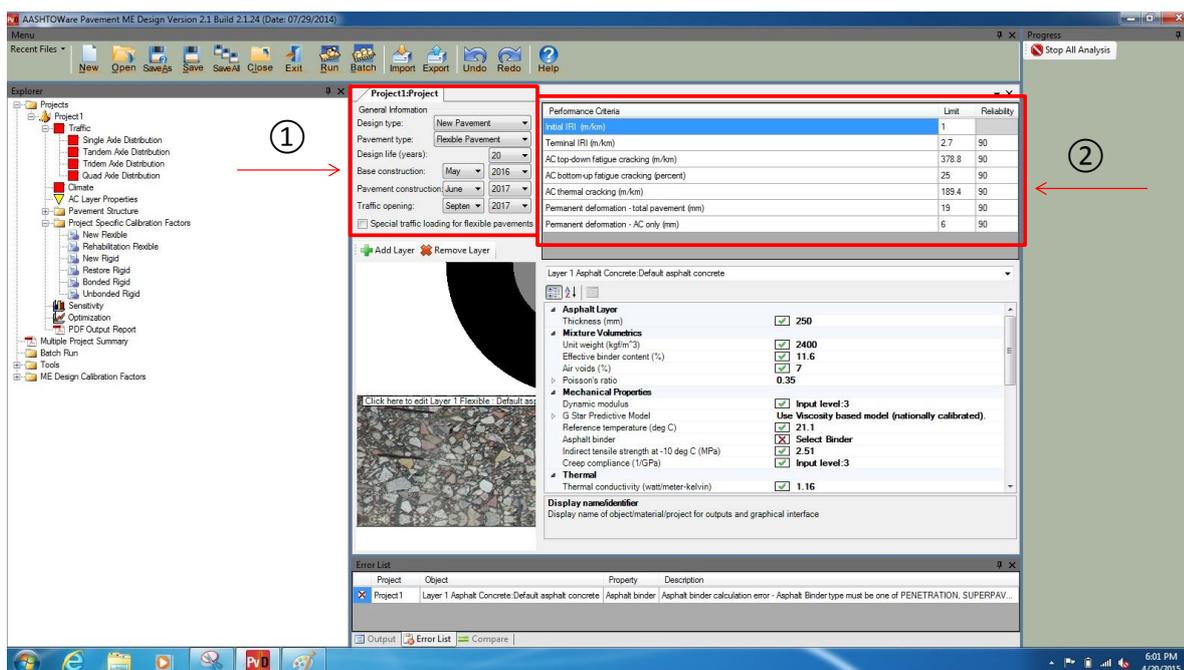


Figura 27 - Dados iniciais do tipo de pavimento

Project1:Project

General Information

Design type: New Pavement

Pavement type: Flexible Pavement

Design life (years): 20

Base construction: May 2016

Pavement construction: June 2017

Traffic opening: Septen 2017

Special traffic loading for flexible pavements

Desta forma, para o estudo foi considerado que a liberação ao trafego se deu próximo ao meio do ano, no Brasil, pois desta maneira o software americano estima as ações climáticas nos meses mais quentes, assim condicionando o pavimento ao

seu início de vida útil a elevadas temperaturas e conseqüentemente a maiores deformações iniciais ao pavimento.

A Figura 28 representa o setor (2) da Figura 26 onde estão as condicionantes que irão avaliar a estrutura do pavimento e atenderá as solicitações dentro da vida de projeto, onde o software avalia a IRI (Irregularidade Longitudinal da pista), trincamento do revestimento de cima para baixo, trincamento no revestimento de baixo para cima, trincamento térmico, deformação total do pavimento e deformação do revestimento, também nesta aba pode-se estipular a confiabilidade que se pretende impor ao projeto. Para este estudo os limites para as condicionantes de dimensionamento foram mantidas as do software e como dimensionamento em referência ao previsto pelo DNIT a confiabilidade proposta foi de 50 e 90%, no entanto, para o dimensionamento da estrutura de forma a atender os limites de projeto a confiabilidade utilizada foi de 50%. Os valores contidos na imagem são os limites dos critérios de desempenho utilizado pela AASHTOWare.

Figura 28 - Condicionantes a serem avaliadas pelo AASHTOWare

Performance Criteria	Limit	Reliability
Initial IRI (m/km)	1	
Terminal IRI (m/km)	2.7	90
AC top-down fatigue cracking (m/km)	378.8	90
AC bottom-up fatigue cracking (percent)	25	90
AC thermal cracking (m/km)	189.4	90
Permanent deformation - total pavement (mm)	19	90
Permanent deformation - AC only (mm)	6	90

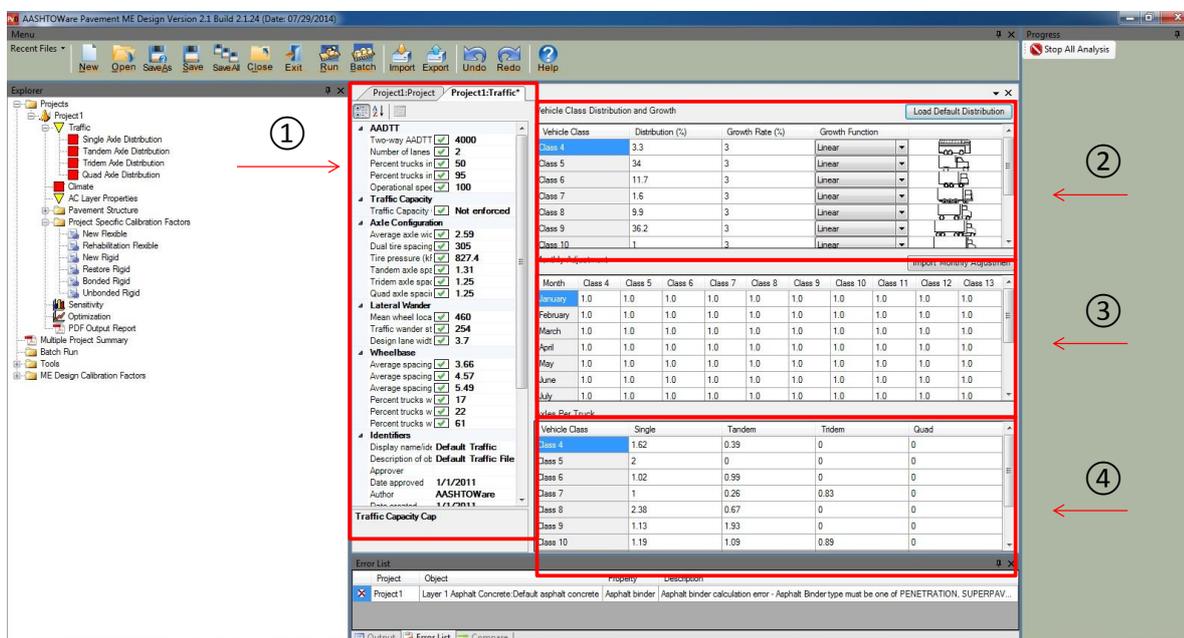
A Tabela 22 foi construída com os valores de referência do manual de restauração de pavimentos asfálticos do DNIT, o trincamento *top-down*, térmico e a deformação do revestimento não são considerados pelo DNIT. O trincamento *bottom-up* foi considerado o valor de 30%, sendo que o manual determina que 20% já apresentam condições regulares, porém, sugere que seja adotado valor de referência entre 25 a 30% do trincamento total.

Tabela 22 – Limites Critério de Desempenho DNIT (2006b)

Critério Desempenho	Limite
IRI (m/km)	3,5
Trincamento top-down revestimento (m/km)	-
Trincamento bottom-up revestimento (%)	30
Trincamento térmico (m/km)	-
Deformação permanente pavimento (mm)	12
Deformação permanente revestimento (mm)	-

Para o dimensionamento são divididas as informações em três grandes grupos, estrutura do pavimento (juntamente com materiais utilizados), tráfego em que o pavimento será submetido e os fatores relevantes do clima. Com isto na Figura 29 estão as principais fontes de entrada para o tráfego.

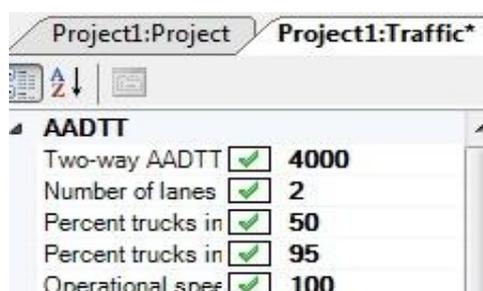
Figura 29 - Tela de entrada de dados do tráfego



A tela anterior foi dividida em 4 segmentos de informações que compõem a estrutura destinada às informações de tráfego. Onde o segmento (1) trata das informações relevantes ao VDM, número de faixas por sentido, percentual de veículos comerciais (8,2tf), percentual de sentido, configuração dos eixos (distância)

e variação lateral dos rodados, como mostra na Figura 30. No entanto, para a pesquisa foi utilizado apenas às cinco primeiras informações, sendo que o VDM variou conforme os valores de N foi considerado apenas uma faixa, acarretando assim em 100% de veículos nesta faixa e o percentual de veículos comerciais foram considerados como 100%, visto que no VDM desconsiderou os veículos de passeio.

Figura 30 - Tela de informações do volume de tráfego



No segmento (2) (Figura 31) está disponível o espaço para inserção do percentual de veículos de cada classe que compõem o VDM, como também a taxa de crescimento, sendo que esta pode ser informada para cada classe, no caso de ocorrer variação de crescimento de uma determinada classe para certa rodovia devido informações que o projetista possua da região. É possível optar se o crescimento se dará de forma linear ou geométrica. Para o trabalho como mencionado anteriormente, os percentuais de VDM partiram dos valores de N e, o crescimento geométrico, visto que o número de veículos cresce de maneira elevada, assim o dimensionamento estaria prevendo a pior condição que este pavimento pode estar submetido.

Figura 31 - Entrada do percentual de veículos por classe e crescimento

Vehicle Class	Distribution (%)	Growth Rate (%)	Growth Function
Class 4	3.3	3	Linear
Class 5	34	3	Linear
Class 6	11.7	3	Linear
Class 7	1.6	3	Linear
Class 8	9.9	3	Linear

Na Figura 32 que ilustra o segmento (3), estão as informações referentes ao percentual de tráfego do VDM, distribuídos por classe em relação aos meses, ou seja, caso ocorra sazonalidade do volume de veículos sobre o pavimento, isto pode ser informado. Para o trabalho foram mantidas as distribuições de forma uniforme, visto que não foi realizado estudo da região que usufrui a BR 116, apenas se fez uso do tráfego desta rodovia.

No segmento (4) (Figura 33) está o local destinado para informar o número de eixos que compõem cada classe, ou seja, o espectro de eixos. Neste trabalho foi utilizado o que Klamt (2014) determinou em seu trabalho, para que assim pudéssemos informar para o software o formato dos veículos que transitam pelas rodovias brasileiras.

Figura 32 - Tela dos valores do percentual de VDM com relação mensal

Monthly Adjustment											Import Monthly Adjustmen
Month	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8	Class 9	Class 10	Class 11	Class 12	Class 13	
January	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
February	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
March	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
April	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
May	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
June	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
July	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	

Figura 33 - Entrada do espectro de eixos

Axles Per Truck				
Vehicle Class	Single	Tandem	Tridem	Quad
Class 4	1.62	0.39	0	0
Class 5	2	0	0	0
Class 6	1.02	0.99	0	0
Class 7	1	0.26	0.83	0
Class 8	2.38	0.67	0	0
Class 9	1.13	1.93	0	0
Class 10	1.19	1.09	0.89	0

É importante salientar que no caso dos estudos da AASHTO eles não consideram os eixos simples de rodas simples, onde está na tela disponível para

inserir informações sobre o eixo “single”, referindo-se ao eixo simples de rodas duplas, ou seja, os valores de rodas dianteiras que compõem o espectro de Klamt (2014) não foram utilizados.

Na Figura 34, temos mais uma opção que compõem as informações do tráfego, ou seja, a opção de informar o percentual de veículos com certa carga que passa em determinado mês.

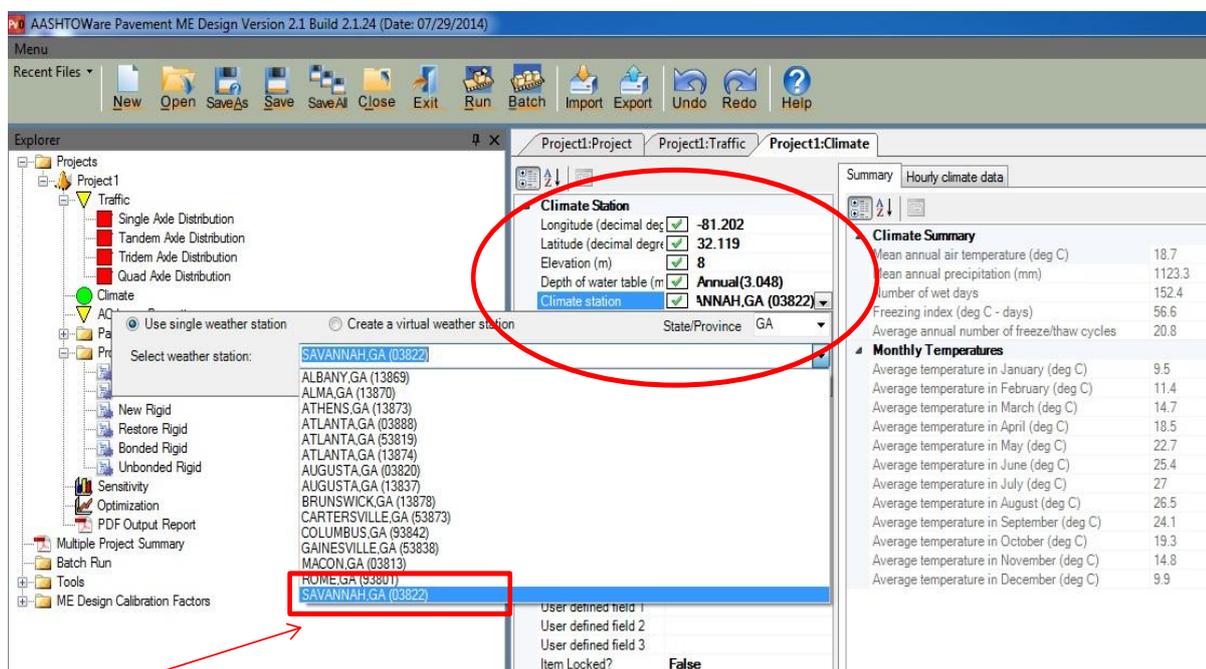
Figura 34 - Entrada do percentual de carga das classes em relação mensal

Month	Class	Total	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
January	4	100	0.52	1.66	1.95	3.78	6.19	10.9	12.39
January	5	100	2.8	12.16	15.93	14.71	10.69	9.37	8.08
January	6	100	0.72	2.44	2.72	4.05	6.1	8.62	12.07
January	7	100	0.65	1.75	1.47	2.8	3.28	5.44	5.89
January	8	100	3.25	10.4	7.01	8.09	8.29	9.95	10.77
January	9	100	0.47	1.76	2.18	3.49	4.77	7.99	13.59
January	10	100	1.04	3.09	1.87	3.15	4.86	8.01	13.72
January	11	100	1.01	3.64	4.24	5.72	6.44	7.4	8.55
January	12	100	1.92	5.67	3.7	5.87	6.48	8.67	10.28
January	13	100	2.47	7.4	3.45	4.95	6.24	8.13	9.06
February	4	100	0.52	1.66	1.95	3.78	6.19	10.9	12.4
February	5	100	2.81	12.14	15.92	14.7	10.7	9.38	8.08
February	6	100	0.72	2.44	2.72	4.05	6.1	8.62	12.09
February	7	100	0.64	1.75	1.47	2.8	3.28	5.44	5.89
February	8	100	3.23	10.4	7	8.09	8.29	9.96	10.78
February	9	100	0.47	1.76	2.18	3.49	4.77	7.99	13.6

Na Figura 34 o local circulado e indicado com uma seta mostra os tipos de eixos, onde ao ser clicado libera a aba que é mostrada ao lado referente ao tipo do eixo. Nesta aba temos os meses, dentro de cada mês todas as classes e na guia superior estão às cargas em kgf, ou seja, na tabela é possível estipular o percentual de cada carregamento por eixo. No trabalho foi utilizado aqui a relação de 80% de carga máxima legal e 20% com carregamento para veículos vazios.

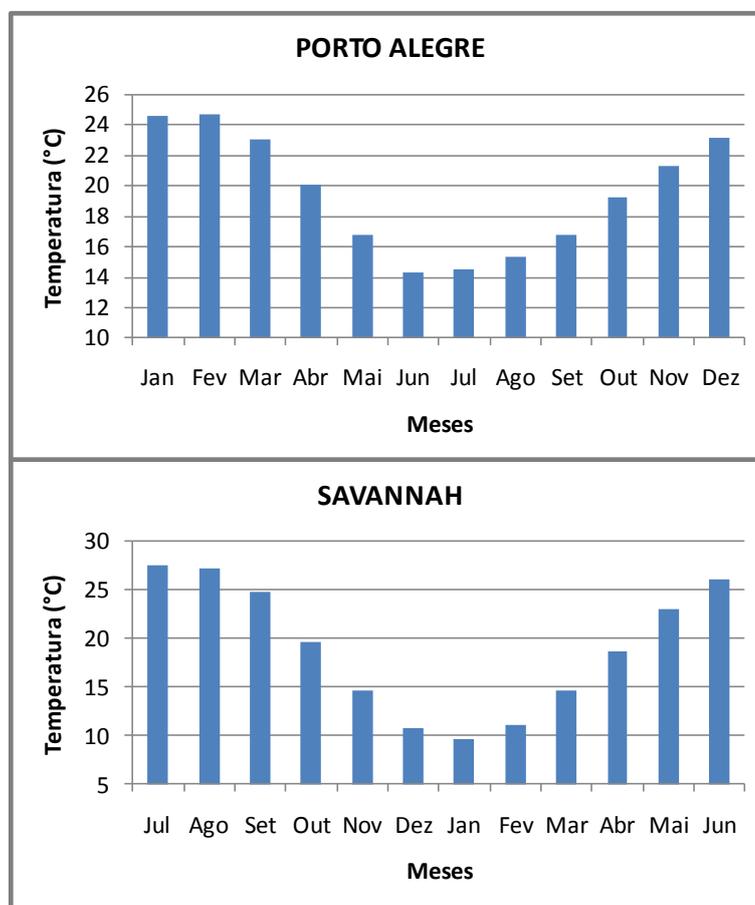
A Figura 35 mostra a aba que abre quando efetuado um clique sobre o espaço entre o pneu e o pavimento na ilustração que está à direita da interface do software. Esta aba irá permitir a escolha do local sobre o qual estará o pavimento, ou seja, é possível escolher as condições climáticas que estarão agindo sobre a estrutura.

Figura 35 - Interface de escolha do local e condições climáticas



Para o trabalho foram utilizadas as condições climáticas da região de Savannah nos EUA, devido ao software necessitar de um banco de dados climáticos e na licença que se teve acesso as condições climáticas eram dos EUA. É possível observar na Figura 36 que existe uma correspondência das temperaturas médias mensais entre Porto Alegre e Savannah, sendo que nas duas localidades a temperatura média anual é muito próxima, Porto Alegre 19,49°C e Savannah 18,98°C.

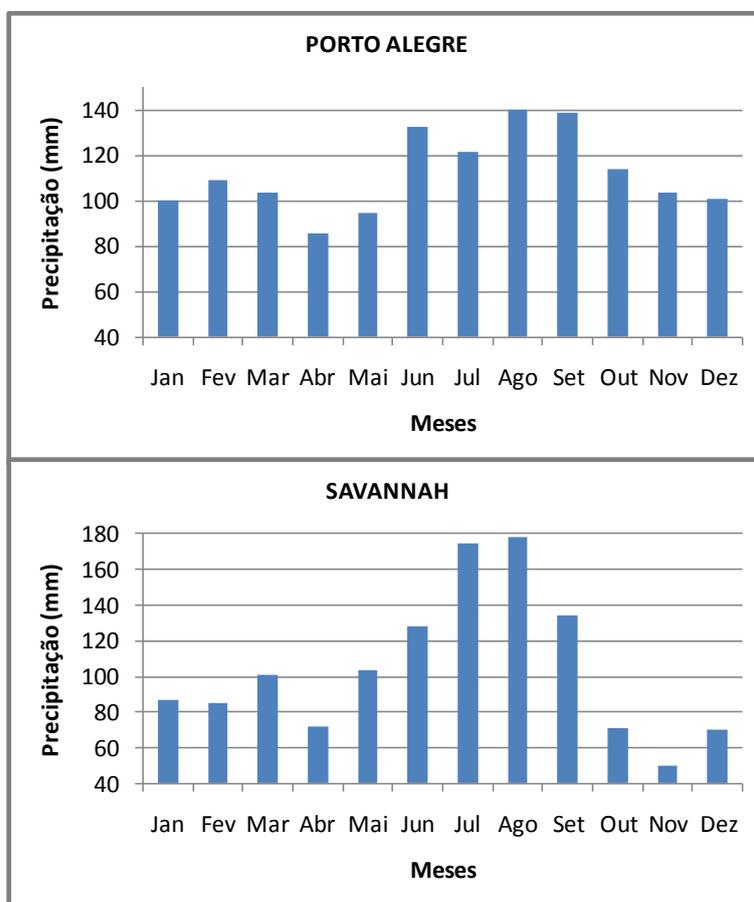
Figura 36 - Comparativo entre a temperatura de Porto Alegre e Savannah



Fonte: adaptado INMET, 2016 e AASHTO, 2014.

A pluviometria entre Porto Alegre e Savannah também são bem semelhantes como demonstra a Figura 37, uma distribuição com certa semelhança, a diferença de precipitação acumulada durante o ano fica em 92 mm, ou seja, se dividido uniformemente por todos os meses a diferença não atinge 8 mm em cada mês.

Figura 37 - Comparativo entre a precipitação em Porto Alegre e Savannah



Fonte: adaptado INMET, 2016 e AASHTO, 2014.

E por fim para montagem da estrutura do pavimento, se procede da seguinte forma: um clique sobre a ilustração, na área do pavimento e se opta por adicionar uma nova camada. Como mostra na Figura 38, é possível então selecionar onde será inserida esta nova camada e também que tipo de camada será esta.

Após escolhido o tipo de camada é realizado então a escolha do material que irá compor como mostra na Figura 39, destacado pela seta. Em sequência é possível efetuar a modificação dos índices que compõem a camada, no local circulado, onde é possível inserir valores como coeficiente de Poisson, espessura, módulo de resiliência.

Figura 38 - Tela de entrada com estrutura do pavimento

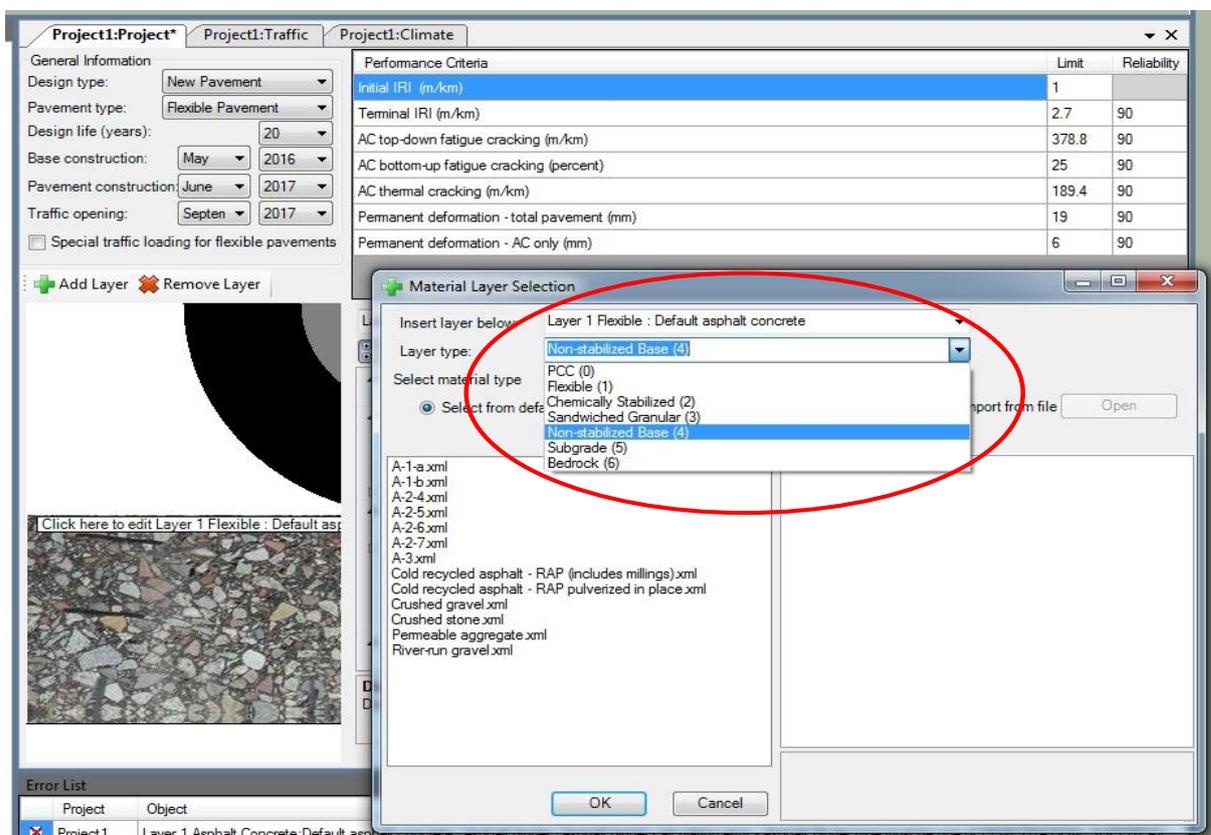
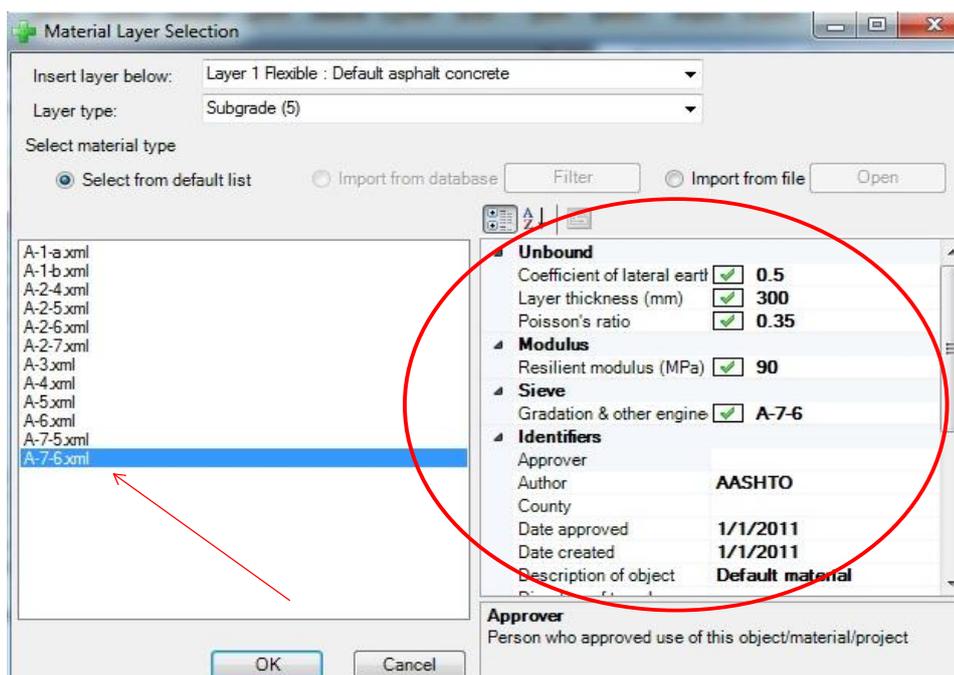


Figura 39 - Escolha do material e suas características



Por meio do acesso ao “*Gradation & other engineering properties*” é possível fazer modificações nas camadas, referentes ao percentual granulométrico de cada diâmetro de material, índices de Atterberg, coeficiente hidráulico e compactação da camada (Figura 40). No trabalho foram utilizados os dados referentes às camadas contidos no software, apenas informou-se que as camadas foram compactadas.

E para finalizar a estrutura, como foram mencionadas anteriormente, as camadas foram consideradas como não aderidas, para inserir no software é preciso ir à aba que está indicada na Figura 41, escolher a opção “*AC layer properties*” onde ficará disponível a aba circulada, no item “*Layer interface*” e determinar como as camadas adjacentes terão sua ligação, sendo que o software considera que o valor 1 é totalmente aderido e o valor 0 é sem aderência.

Figura 40 - Entrada dos limites de Atterberg e percentuais de material passante em cada peneira

Sieve Size	Percent Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
0.075mm	8.7
0.150mm	
0.180mm	12.9
0.250mm	
0.300mm	
0.425mm	20
0.600mm	
0.850mm	
1.18mm	
2.0mm	33.8
2.36mm	
4.75mm	44.7
9.5mm	57.2
12.5mm	63.1
19.0mm	72.7
25.0mm	78.8
37.5mm	85.8
50.0mm	91.6
63.0mm	
75.0mm	
90.0mm	97.6

Parameter	Value
Liquid Limit	6
Plasticity Index	1
Maximum dry unit weight (kgf/m ³)	2038.2
Saturated hydraulic conductivity (m/hr)	1.54e-02
Specific gravity of solids	2.7
Optimum gravimetric water content (%)	7.4

Identifier	Value
af	7.25549682996034
bf	1.33282181654764
cf	0.824220751940721
hr	117.4

Identifiers

Display name: _____

Description: _____

Approver: _____

Date approved: 1/1/2011

Author: AASHTO

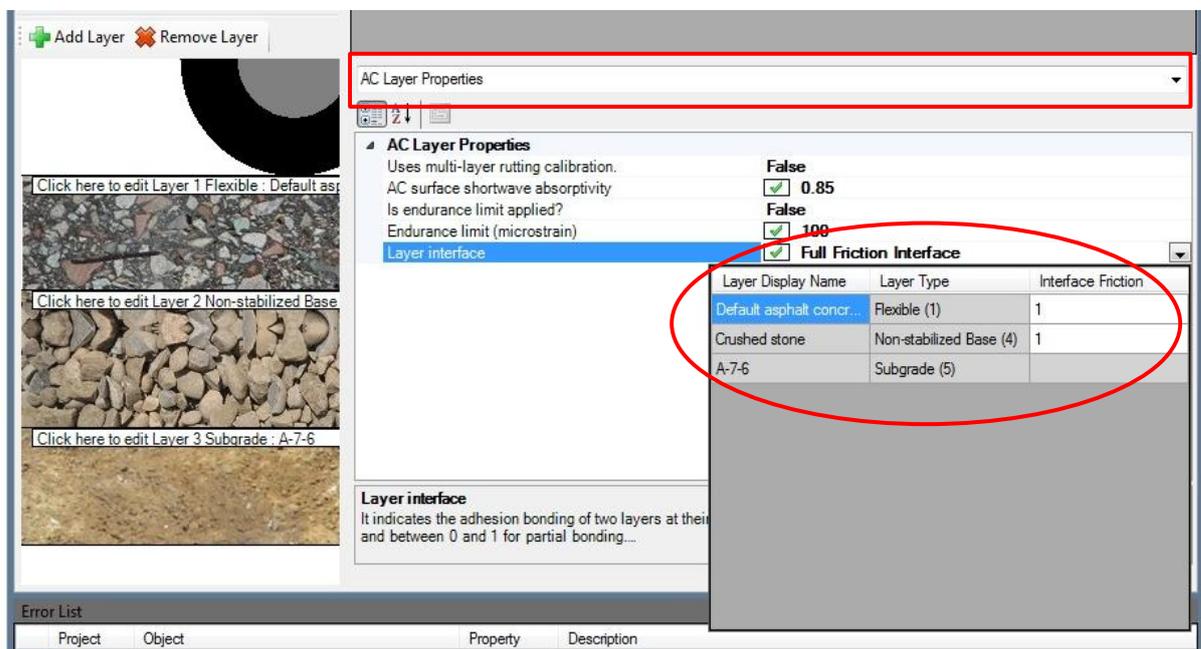
Date created: 1/1/2011

County: _____

Gradation & other engineering properties

Enter the gradation, Atterberg limits and saturated hydraulic conductivity of the unbound materials and subgrade.

Figura 41 - Interface de aderência entre camadas



3.6 CÁLCULO DO CUSTO DO PAVIMENTO

O custo unitário do pavimento foi realizado com base nas tabelas desenvolvidas nos estudos de Ribas (2014), atualizadas por meio dos custos de serviços e materiais de referência do SICRO 2 de julho de 2015 e materiais betuminosos da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis no ano de referência 2015.

Ribas (2014) na determinação do custo unitário de transporte dos materiais betuminosos utilizou a metodologia apresentada na instrução de serviço DNIT-IS/DG nº 02 de 18 de janeiro de 2011, que define as equações tarifárias para o cálculo do custo base de transporte para materiais betuminosos a quente e a frio em diferentes condições de superfície. Foi atualizado por meio do índice de reajustamento de obras rodoviárias da fundação Getúlio Vargas (FGV) na data base de dezembro de 2015, e mantido o adicional de ICMS referente ao estado do Rio Grande do Sul (17%). A Tabela 23 demonstra as distâncias que foram utilizadas para fins de construção de referência dos cálculos de custos.

Tabela 23 – Distância média de transporte para levantamento de custos

Descrição	Origem	Destino	Distância média de transporte (km)	Condição de superfície
Mat. bet. a quente	Refinaria	Usina	300	Pavimentado
Mat. bet. a frio	Distribuidora	Usina	300	Pavimentado
Areia/brita comercial	Jazida	Usina	10	Não pavimentado
Areia/brita comercial	Jazida	Pista	70	Não pavimentado
Concreto Asfáltico	Usina	Pista	60	Não pavimentado
Brita graduada	Jazida	Pista	70	Não pavimentado
Macadame seco	Jazida	Pista	70	Não pavimentado
Bloqueio	Jazida	Pista	70	Não pavimentado

Fonte: RIBAS, 2014.

A Tabela 24 demonstra a obtenção do custo unitário por tonelada para o transporte de materiais betuminosos. Já na Tabela 25 têm-se os valores dos materiais betuminosos obtidos por meio da ANP no mês de referência de dezembro de 2015 para o estado do Rio Grande do Sul com 17% de ICMS.

Tabela 24 – Custo transporte materiais betuminosos

Com base na IS/DG nº 02 de 18 de janeiro de 2011							
Custo base (R\$ / t)		Índice de pavimentação FGV		Custo corrigido (R\$ / t)		Custo final (R\$ / t) com acréscimo ICMS 17%	
A quente: Cb = 24,715 + 0,247 x D	A frio: Cb = 22,244 + 0,223 x D	Janeiro de 2010	Dezembro de 2015	A quente	A frio	A quente	A frio
98,82	89,14	222,272	298,334	132,63	119,65	159,79	144,16
		Fator de correção:	1,3422				

Nota: D representa a distância média de transporte definida.

Fonte: adaptado de RIBAS, 2014.

Nas Tabelas 26, 27, 28, 29, 30, 31 e 32 estão as composições de custo unitário dos serviços e materiais, do Concreto Asfáltico, Pintura de Ligação, Imprimação, Brita Graduada Simples, Macadame Seco, Camada de Bloqueio e Tratamento Superficial Duplo, respectivamente.

Tabela 25 – Custo materiais betuminosos

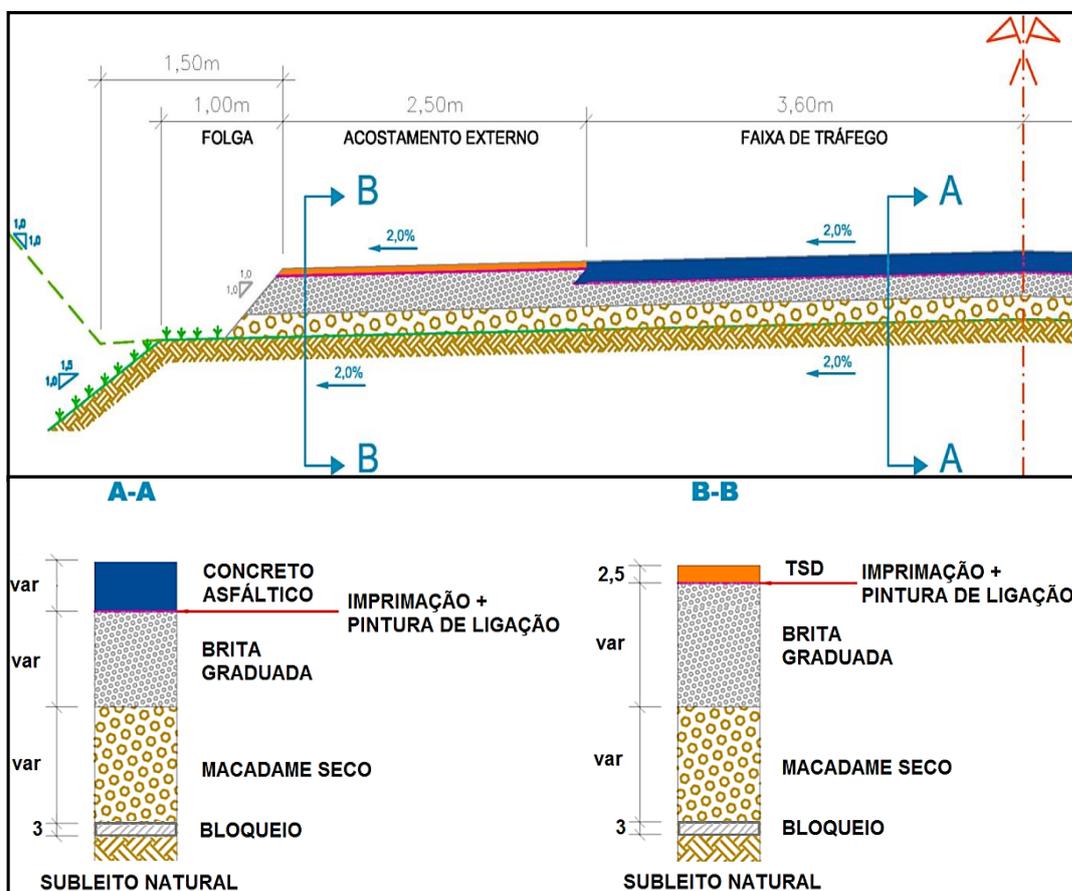
Código Sicro	Descrição	Rio Grande do Sul		Custo final com acréscimo de ICMS 17%	
		R\$/kg	R\$/ton	R\$/kg	R\$/ton
M101	Cimento asfáltico CAP 50/70	1,3576	1357,5645	1,6356	1635,62
M103	Asfalto diluído CM-30	2,2480	2247,9706	2,7084	2708,40
M104	Emulsão asfáltica RR-1C	1,3303	1330,3039	1,6028	1602,78
M105	Emulsão asfáltica RR-2C	1,1109	1110,9476	1,3385	1338,49

A Figura 42 demonstra o modelo de pavimento utilizado como referência para levantamento dos valores de custo final do pavimento conforme as dimensões, sendo o mesmo utilizado no estudo de Klamt (2014) para pavimentos novos, desta forma explica a existência e local de aplicação das camadas de bloqueio, imprimação, pintura de ligação, bem como o tratamento superficial duplo, que no caso deste pavimento de referência é relativo ao acostamento.

Tabela 26 – Composição custo CBUQ

2 S 02 540 51 - CBUQ - capa de rolamento AC/BC			PE (t/h):	75
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)	
A	Equipamentos	-	529,76	
B	Mão de obra	-	135,76	
C	Execução (A+B / PE)	-	8,87	
D	Atividades auxiliares	1 A 01 390 52	64,87	
E	Transp. mat. produzidos/comerciais	1 A 00 001 05 / 1 A 00 001 91	46,50	
F	Materiais betuminosos: <i>Aquisição</i> <i>Transporte</i>	-	89,96	
		-	8,79	
Custo unitário (C+D+E)			120,25	
Preço unitário (LDI: 29,98%)			156,30	
Custo unitário materiais betuminosos (F)			98,75	
Preço unitário materiais betuminosos (LDI: 15,00%)			113,56	
Preço unitário final/t			269,86	
Preço unitário final/m³ (D = 2,425)			654,40	

Figura 42 - Estrutura do pavimento de referência e composição das camadas



Fonte: adaptado de KLAMT, 2014.

Tabela 27 – Composição custo pintura de ligação

2 S 02 400 00 - Pintura de ligação		PE (m ² /h):	1687
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)
A	Equipamentos	-	200,50
B	Mão de obra	-	79,12
C	Execução (A+B / PE)	-	0,17
E	Materiais <i>Aquisição</i>	-	0,64
	betuminosos: <i>Transporte</i>	-	0,06
Custo unitário (C)			0,17
Preço unitário (LDI: 29,98%)			0,22
Custo unitário materiais betuminosos (E)			0,70
Preço unitário materiais betuminosos (LDI: 15,00%)			0,80
Preço unitário final/m²			1,02

Tabela 28 – Composição custo imprimação

2 S 02 300 00 - Imprimação			PE (m²/h):	1125
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)	
A	Equipamentos	-	195,29	
B	Mão de obra	-	82,55	
C	Execução (A+B / PE)	-	0,25	
E	Materiais <i>Aquisição</i>	-	3,25	
	betuminosos: <i>Transporte</i>	-	0,17	
Custo unitário (C)			0,25	
Preço unitário (LDI: 29,98%)			0,32	
Custo unitário materiais betuminosos (E)			3,42	
Preço unitário materiais betuminosos (LDI: 15,00%)			3,94	
Preço unitário final/m²			4,26	

Tabela 29 – Composição custo camada BGS

2 S 02 230 50 - Base de brita graduada BC			PE (m³/h):	121
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)	
A	Equipamentos	-	1002,80	
B	Mão de obra	-	79,12	
C	Execução (A+B / PE)	-	8,94	
D	Atividades auxiliares	1 A 01 395 51	91,92	
E	Transp. mat. produzidos/comerciais	1 A 00 001 91	90,72	
Custo unitário total/m ³ (C+D+E)			191,58	
Preço unitário final/m³ (LDI: 29,98%)			249,02	

Tabela 30 – Composição custo camada MS

2 S 02 231 50 - Base de macadame BC			PE (m³/h):	136
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)	
A	Equipamentos	-	865,19	
B	Mão de obra	-	79,12	
C	Execução (A+B / PE)	-	6,94	
D	Atividades auxiliares	1 A 00 717 00	82,42	
E	Transp. mat. produzidos/comerciais	1 A 00 001 91	85,05	
Custo unitário total/m ³ (C+D+E)			174,41	
Preço unitário final/m³ (LDI: 29,98%)			226,70	

Tabela 31 – Composição custo camada bloqueio

2 S 04 999 07 - Bloqueio		PE (m³/h): 3	
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)
A	Equipamentos	-	17,80
B	Mão de obra	-	8,85
C	Execução (A+B / PE)	-	8,88
D	Atividades auxiliares	1 A 01 200 01	31,80
E	Transp. mat. produzidos/comerciais	1 A 00 001 91	85,05
Custo unitário total/m³ (C+D+E)			125,73
Preço unitário final/m³ (LDI: 29,98%)			163,43

Tabela 32 – Composição custo camada TSD

2 S 02 501 01 - Trat. sup. duplo c/ emulsão		PE (m²/h): 343	
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)
A	Equipamentos	-	448,34
B	Mão de obra	-	135,76
C	Execução (A+B / PE)	-	1,70
D	Atividades auxiliares	1 A 00 717 00	1,41
E	Transp. mat. produzidos/comerciais	1 A 01 200 01	2,05
F	Materiais betuminosos: <i>Aquisição</i>	-	4,02
		-	0,43
Custo unitário (C+D+E)			5,16
Preço unitário (LDI: 29,98%)			6,71
Custo unitário materiais betuminosos (E)			4,45
Preço unitário materiais betuminosos (LDI: 15,00%)			5,12
Preço unitário final/m²			11,83

O custo unitário final do pavimento está resumido na Tabela 33, com as respectivas unidades de mensuração.

Tabela 33 – Custo unitário final para pavimento

CA (m³)	PL (m²)	IP (m²)	BGS (m³)	MS (m³)	BL (m³)	TSD (m²)
R\$ 654,40	R\$ 1,02	R\$ 4,26	R\$ 249,02	R\$ 226,70	R\$ 163,43	R\$ 11,83

Legenda: CA: concreto asfáltico; PL: pintura de ligação; IP: imprimação; BGS: brita graduada simples; MS: macadame seco; BL: bloqueio; TSD: tratamento superficial duplo

3.7 SOFTWARE STATISTICA

O STATISTICA auxilia a entender melhor o que acontece em cada processo realizado. Saber por que determinado processo está acontecendo e tentar antecipar movimentos futuros são conhecimentos altamente recomendáveis para determinados processos e projetos. Desta forma, as ferramentas do software são de uso fácil e de alta tecnologia, com acesso a banco de dados, consultas, relatórios e algoritmos. (STATSOFT, 2016).

Bueno (2014) define como um software de métodos estatísticos, aquele que possui um conjunto de ferramentas para análises estatísticas, bem como ter várias ferramentas de gestão e visualização de bases de dados e Data Mining, com mecanismos de modelação preditiva, agrupamentos e ferramentas exploratórias utilizando em seu trabalho a regressão múltipla que é um processo estatístico realizado para analisar a influência das variáveis independentes nas variáveis dependentes através do método de variância ANOVA (Analysis of Variance).

No presente estudo as variáveis dependentes foram os critérios de desempenho definidos pelo software AASHTOWare, como IRI, trincamento do revestimento (térmico, top-down e bottom-up), deformação permanente do pavimento e do revestimento. As variáveis independentes foram o volume de tráfego (N), espessuras das camadas (revestimento, base e sub-base) e módulos de resiliência (base, sub-base e subleito). Sendo que as variáveis independentes foram relacionadas diretamente com as variáveis dependentes, bem como os efeitos de 2ª e 3ª ordem (produto das variáveis) das variáveis independentes.

4 RESULTADOS

4.1 DIMENSIONAMENTO

4.1.1 Dimensionamento pelo Método DNIT

Para o dimensionamento pelo método do DNIT, foram utilizadas as espessuras mínimas previstas conforme mostra a Tabela 34, para cada valor de N (USACE) aplicado como carregamento imposto ao pavimento.

Tabela 34 – Espessuras do pavimento

N	2,5x10 ⁶			7,5x10 ⁶			2,5x10 ⁷			7,5x10 ⁷			1,0x10 ⁸		
(%) CBR Subleito	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
E_{rev} (cm)	5	5	5	7,5	7,5	7,5	10	10	10	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
E_{bas} (cm)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
E_{sub} (cm)	34	16	16	34	16	16	32	16	-	32	16	-	32	16	-

Para o caso do N de 2,5x10⁶ a espessura do revestimento e base se mantém a mesma, apenas varia a espessura da sub-base, sendo que entre o CBR de 10% e 15% não ocorreram modificações. Bem como para N de 7,5x10⁶ que não varia entre o CBR de 10% e 15%. Existe apenas no CBR de 5% uma variação significativa que acontece na espessura da sub-base com 34 cm.

É possível observar que com o aumento na espessura de revestimento para o N de 2,5x10⁷ a camada de sub-base diminui 2 cm, bem como no caso em que o CBR do subleito é 15%, que acaba por dispensar o uso de sub-base. Para o N de 7,5x10⁷ as espessuras das camadas de base e sub-base se mantiveram iguais as do N de 2,5x10⁷, visto que a espessura do revestimento aumentou em 2,5 cm.

A manutenção da espessura do revestimento a partir de N 7,5x10⁷ se dá devido o método do DNIT levar em consideração as faixas até chegar em N>5x10⁷, onde a partir deste volume de tráfego a espessura mínima é de 12,5 cm de revestimento, os dois últimos volumes de tráfego mantiveram o mesmo formato de perfil de pavimento.

4.1.2 Dimensionamento pelo SisPavBR

Para o dimensionamento por meio do SisPavBR a capacidade de suporte do subleito é dada em MPa (módulo de resiliência) e as camadas de base e sub-base se mantiveram as mesmas das obtidas pelo dimensionamento do DNIT (referência), variando a espessura do revestimento como mostra nas Tabelas 35 a 39, para uma confiabilidade de 50%. A variação do revestimento aconteceu baseada nos estudos de Ribas (2014) que mostram como sendo a camada que causa maior impacto no desempenho do pavimento.

Tabela 35 – Espessuras do Pavimento para N de $2,5 \times 10^6$ pelo SisPavBR

N	$2,5 \times 10^6$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124
E_{rev} (cm)	6,3	6,9	6,8
E_{bas} (cm)	15	15	15
E_{sub} (cm)	34	16	16

Observando a referência (DNIT), a espessura do revestimento pelo SisPavBR para o N mostrado na Tabela 35, variou para os três MR numa ordem menor que 2 cm, ou seja, um aumento em torno de 35%.

Tabela 36 – Espessuras do Pavimento para N de $7,5 \times 10^6$ pelo SisPavBR

N	$7,5 \times 10^6$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124
E_{rev} (cm)	9,9	10,3	10,1
E_{bas} (cm)	15	15	15
E_{sub} (cm)	34	16	16

Para este caso nota-se também que o aumento na espessura do revestimento seguiu a mesma ordem, visto que a maior espessura foi obtida para um módulo de resiliência de 110 MPa, com um ganho de 2,8 cm, cerca de 37% com relação a referência.

Tabela 37 – Espessuras do Pavimento para N de $2,5 \times 10^7$ pelo SisPavBR

N	$2,5 \times 10^7$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124
E_{rev} (cm)	14,1	13,9	13,8
E_{bas} (cm)	15	15	15
E_{sub} (cm)	32	16	-

Com uma ordem de grandeza mais elevada de volume de tráfego o dimensionamento chegou a um aumento de 41% na espessura do revestimento para o subleito com módulo de resiliência de 53 MPa.

Tabela 38 – Espessuras do Pavimento para N de $7,5 \times 10^7$ pelo SisPavBR

N	$7,5 \times 10^7$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124
E_{rev} (cm)	18,4	17,7	17,4
E_{bas} (cm)	15	15	15
E_{sub} (cm)	32	16	-

No caso mostrado na Tabela 38 se manteve o maior aumento na espessura do revestimento para o subleito com MR de 53 MPa, porém passou de 41% o aumento para em torno de 47% com relação a referência. Para o subleito com MR de 110 e 124 MPa o aumento na espessura do revestimento ficou próximo a 40%.

Tabela 39 – Espessuras do Pavimento para N de $1,0 \times 10^8$ pelo SisPavBR

N	$1,0 \times 10^8$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124
E_{rev} (cm)	19,5	18,7	18,5
E_{bas} (cm)	15	15	15
E_{sub} (cm)	32	16	-

Para o volume de tráfego de 10^8 , o SisPavBR chegou a um aumento de 7 cm na espessura do revestimento em relação ao método do DNIT, ou seja, 56% de aumento.

Desta forma, o percentual de aumento na espessura do revestimento para os volumes de tráfego na ordem de 10^6 foi maior para o módulo de resiliência do subleito de 110 MPa, onde ficou em torno de 37%, que pode ser relacionado com a diminuição na camada de sub-base em relação ao MR do subleito de 53 MPa e, o aumento da capacidade de suporte do subleito para o MR de 124 MPa. Visto que desta maneira, a deformação da camada de sub-base é evitada, bem como as tensões no topo do subleito são melhores absorvidas, resultados que o SisPavBR avalia em seu conjunto de modelos de previsão de deformação das camadas e tensões no subleito.

Já no caso de volumes de tráfego mais elevados a necessidade de espessura maior começa a ser onde o módulo do subleito é menor, visto que se chega ao subleito com maior tensão e conseqüentemente uma maior deformação, assim a variação de espessura ficou entre 32% e 56%. A maior espessura de revestimento foi obtida para maior solicitação, ou seja, N de 10^8 e módulo de resiliência do subleito com menor capacidade de suporte (53 MPa).

Com o SisPavBR fazendo uso de uma confiabilidade de 90%, foi possível rever as espessuras do pavimento para os volumes de tráfego de $2,5 \times 10^6$; $7,5 \times 10^6$ e $2,6 \times 10^7$ (Tabelas 40, 41 e 42); para os casos de $7,5 \times 10^7$ e $1,0 \times 10^8$ as espessuras atingiram o limite previsto pelo software.

Tabela 40 – Estrutura pavimento para N de $2,5 \times 10^6$ confiabilidade 90%

N	2,5x10 ⁶			
	MR Subleito (MPa)	53	110	124
E _{rev} (cm)		8,6	9,0	8,8
E _{bas} (cm)		15	15	15
E _{sub} (cm)		34	16	16

Ao aumentar a confiabilidade de 50% para 90% o SisPavBR aumenta a espessura do revestimento em torno de 35% para o volume de tráfego de $2,5 \times 10^6$,

com a confiabilidade de 50% o maior aumento de espessura acontece para o subleito com MR de 110 MPa.

No volume de tráfego exposto na Tabela 41 a variação de espessuras para o revestimento entre os subleitos é de 2 mm, ou seja, praticamente a mesma espessura de revestimento satisfaz os três casos. Em relação à confiabilidade de 50%, para este caso aconteceu um aumento na espessura em torno de 2,3 cm, cerca de 23%.

Tabela 41 – Estrutura do pavimento para N de $7,5 \times 10^6$ confiabilidade 90%

N	$7,5 \times 10^6$		
	MR Subleito (MPa)	53	110
E_{rev} (cm)	12,3	12,4	12,2
E_{bas} (cm)	15	15	15
E_{sub} (cm)	34	16	16

Para o N de $2,5 \times 10^7$ (Tabela 42) com confiabilidade de 90%, o aumento de espessura do revestimento se manteve um valor próximo a 2,3 cm com relação à confiabilidade de 50%, ou seja, um aumento de aproximadamente 17%.

Tabela 42 – Estrutura do pavimento para N de $2,5 \times 10^7$ confiabilidade 90%

N	$2,5 \times 10^7$		
	MR Subleito (MPa)	53	110
E_{rev} (cm)	16,7	16,3	16,1
E_{bas} (cm)	15	15	15
E_{sub} (cm)	32	16	-

O aumento que se dá na camada de revestimento quando a confiabilidade passa de 50% para 90%, pode ser entendido como Franco (2007, p. 217) definiu em seus estudos onde a confiabilidade pode ser “a medida da probabilidade da serventia do pavimento permanecer em um nível adequado através da vida de serviço”. Ou seja, se é necessário maior segurança de que o pavimento irá

responder positivamente, então é preciso que o pavimento esteja com melhor arranjo para suportar os esforços que irão ser impostos.

A variação de espessura do revestimento pelo SisPavBR com confiabilidade de 90% em relação a referência variou da seguinte forma: para subleito com módulo de resiliência de 53 MPa em torno de 4 cm; para MR 110 MPa em média 5 cm e para MR de 124 MPa ficou próximo a 7 cm.

4.1.3 Dimensionamento pelo Método da AASHTO

Para o dimensionamento pelo método da AASHTO, foram utilizadas as espessuras previstas pelo método do DNIT nas camadas de base e sub-base, variando apenas a espessura do revestimento conforme mostram as Tabelas 43 à 46, para cada valor de N aplicado como carregamento imposto ao pavimento. Por este método a capacidade de suporte do subleito é medido em MPa, por ser levado em consideração o módulo de resiliência e não mais o CBR como é feito no método do DNIT.

Tabela 43 – Espessuras do Pavimento N de $2,5 \times 10^6$ - AASHTO confiabilidade 50%

N	2,5x10 ⁶		
	MR Subleito (MPa)	53	110
E_{rev} (cm)	15	7,5	7,5
E_{bas} (cm)	15	15	15
E_{sub} (cm)	34	16	16

Em relação ao método do DNIT, o dimensionamento pela AASHTO triplicou a espessura do revestimento com um MR de 53 MPa e para os casos de MR de 110 e 124 MPa a variação foi menor, um aumento de 50%, ou seja, 2,5 cm de revestimento a mais para suportar a passagem dos veículos médios diários.

Para o N de $7,5 \times 10^6$ o dimensionamento da AASHTO mantém a espessura do revestimento igual para o MR de 53 e 110 MPa, variando para o MR de 124 MPa onde ocorre uma redução de 2,5 cm na espessura do revestimento devido ao ganho no subleito (Tabela 44).

Tabela 44 – Espessuras do Pavimento N de $7,5 \times 10^6$ - AASHTO confiabilidade 50%

N	$7,5 \times 10^6$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124
E_{rev} (cm)	22,5	22,5	20
E_{bas} (cm)	15	15	15
E_{sub} (cm)	34	16	16

No caso mostrado na Tabela 45 é possível observar que o aumento na camada de revestimento passa de 22,5 cm em N de $7,5 \times 10^6$, para 32,5 cm para o N de $2,5 \times 10^7$, um ganho de 10 cm, ou seja, a espessura mínima prevista para este caso quando dimensionado pelo método do DNIT. Para os MR do subleito de 110 e 124 MPa a espessura do revestimento se manteve, do mesmo modo que aconteceu no dimensionamento do DNIT, elevando na ordem de 225% a espessura.

Tabela 45 – Espessuras do Pavimento N de $2,5 \times 10^7$ - AASHTO confiabilidade 50%

N	$2,5 \times 10^7$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124
E_{rev} (cm)	32,5	27,5	27,5
E_{bas} (cm)	15	15	15
E_{sub} (cm)	32	16	-

Para o N de $7,5 \times 10^7$ (Tabela 46) ocorreu tanto para o subleito com MR de 53, 110 e 124 MPa um aumento na camada de revestimento de 7,5 cm com relação ao N de $2,5 \times 10^7$. Com o método da AASHTO a sensibilidade dos modelos de desempenho no que se refere ao módulo de resiliência do subleito, visto que para todos os casos as maiores espessuras do revestimento se deram no subleito com MR de 53 MPa, também é significativa a importância da espessura do revestimento, pois mesmo dobrando a espessura sub-base em relação a um subleito com MR de 110 MPa, mantêm-se a necessidade de maiores espessuras de revestimento.

Tabela 46 – Espessuras do Pavimento para N de $7,5 \times 10^7$ pela AASHTO

N	$7,5 \times 10^7$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124
E_{rev} (cm)	40	35	35
E_{bas} (cm)	15	15	15
E_{sub} (cm)	32	16	-

Para o N de $1,0 \times 10^8$ não foi possível realizar o dimensionamento do revestimento, bem como do pavimento, pois foi realizada a verificação da estrutura do pavimento com alterações nas camadas de base e sub-base, onde atendeu um critério de desempenho não atendendo os demais. Foi também realizado o teste com camadas de base rígida e base asfáltica e nenhuma resultou em uma estrutura capaz de suportar o volume de tráfego imposto, o que pode indicar que seja necessário o dimensionamento de um pavimento com placas de concreto de cimento Portland para atender as necessidades.

No entanto, a estrutura acabava por não atender a deformação total do pavimento. Ou seja, a partir do N de $1,0 \times 10^8$ com confiabilidade de 50% e os casos com confiabilidade de 90% não foram realizados os dimensionamentos pelo método da AASHTO. Este fato pode ter acontecido devido à severidade que a composição do tráfego com 80% em carga máxima legal e 20% vazios.

Não foi possível realizar o dimensionamento com confiabilidade de 90% por meio do método da AASHTO e para o método proposto por FRANCO não foi possível dimensionar uma espessura de revestimento para N de $7,5 \times 10^7$ e $1,0 \times 10^8$, pois o sistema acusou que o dimensionamento ultrapassou a espessura máxima de revestimento. Ou seja, para estes casos pode-se entender que o pavimento de comportamento flexível não seja a melhor solução.

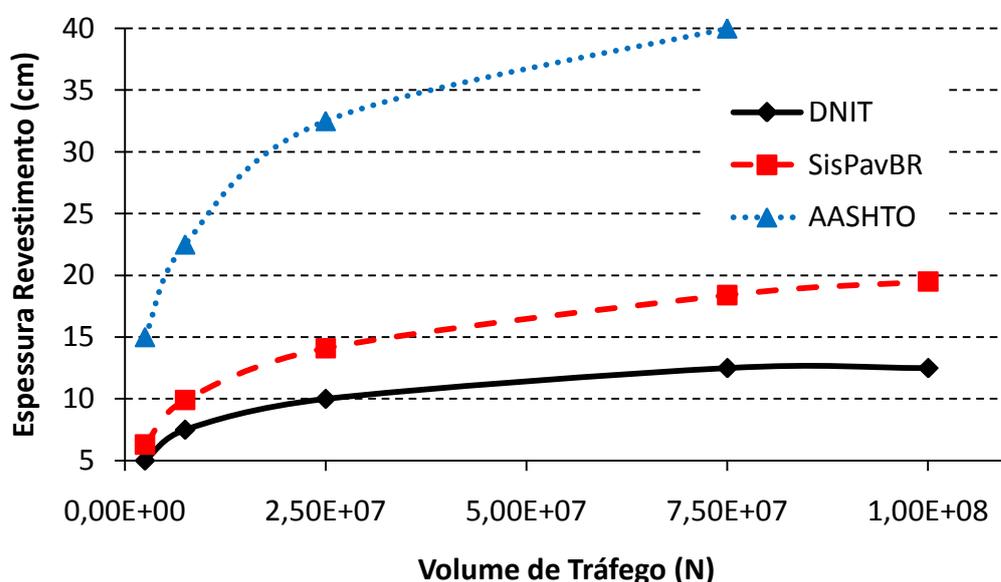
Em uma análise entre o método da AASHTO e o SisPavBR, o método americano mostra-se bem mais rigoroso quanto ao desempenho satisfatório de seus pavimentos. Desta forma, a execução dos pavimentos não representa ligação direta ao fator econômico em relação aos pavimentos brasileiros, no entanto, conforme será demonstrado em sequência e também com um refinamento do estudo econômico pode se definir que o pavimento da AASHTO e SisPavBR seja mais viável no ponto de vista de durabilidade.

Nota-se que a diferença de espessura do revestimento aumenta conforme o tráfego é mais alto, que se deve ao fato do método ter sua calibração na década de 60, ou seja, as modificações e atualizações nos projetos se mostram necessária.

4.1.4 Comparativo entre as espessuras de revestimento e custos executivos

Nas Figuras 43 à 45 estão os gráficos que relacionam o comportamento da espessura do revestimento conforme o volume de tráfego imposto ao pavimento. Para cada gráfico variou-se o módulo de resiliência do subleito. Como demonstra em todos os gráficos para N de 10^8 não consta espessura de revestimento para o dimensionamento pela AASHTO e ilustra o aumento significativo na espessura do revestimento, no entanto, as espessuras mais delgadas são para o dimensionamento por meio do método do DNIT e em sequência o dimensionamento realizado pelo SisPavBR.

Figura 43 - Espessura revestimento para subleito com MR de 53 MPa



Para o subleito com módulo de resiliência de 110 MPa e 124 MPa, com volume de tráfego de $2,5 \times 10^6$; os resultados obtidos pelo SisPavBR e AASHTO foram muito semelhantes, acontecendo variação significativa para os demais valores de N . Porém, é possível notar a semelhança do comportamento na evolução das

espessuras do revestimento entre o SisPavBR e o DNIT, este fato pode acontecer devido o trabalho desenvolvido por Franco ser mais focado aos pavimentos Brasileiros, ou seja, com calibração dos coeficientes por meio de estudo dos solos e materiais do próprio país.

Figura 44 - Espessura revestimento para subleito com MR de 110 MPa

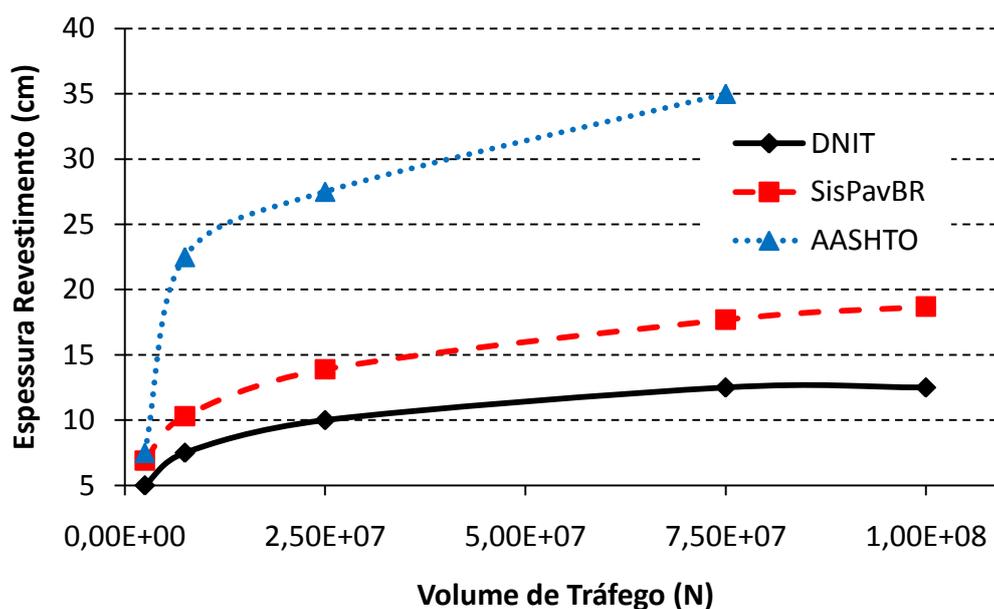
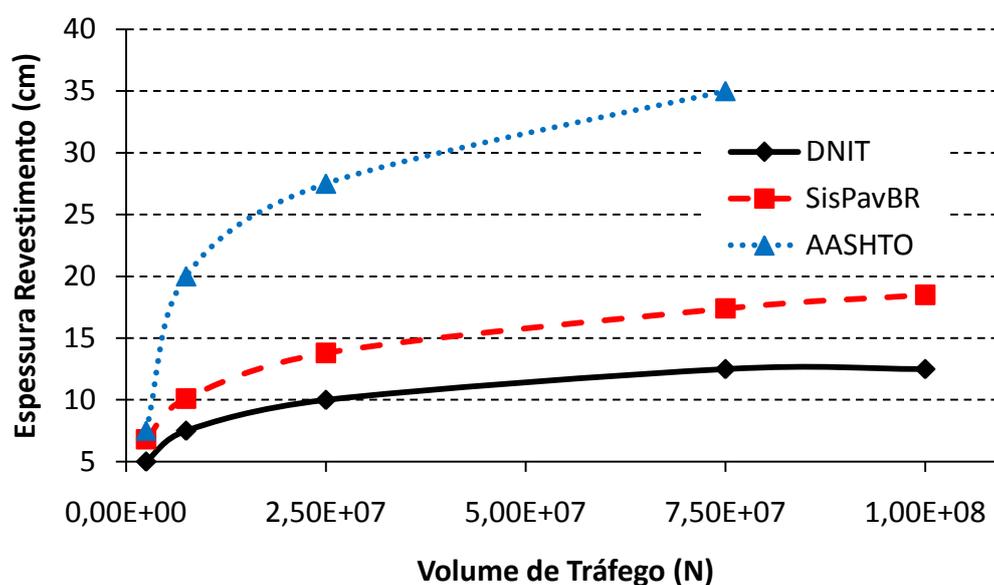


Figura 45 - Espessura revestimento para subleito com MR de 124 MPa



A metodologia utilizada para o cálculo do custo do pavimento foi a descrita no item 3.6, sendo o modelo de pavimento composto pela mesma estrutura de camadas, configuração de execução, variando apenas a espessura do revestimento conforme cada método de dimensionamento utilizado.

Para o levantamento do custo foi considerado a construção de 1 km de pavimento para cada método de dimensionamento. Nas Tabelas 47 a 51, está o custo para execução do pavimento (material e serviços), a diferença de valores em relação à referência (DNIT), bem como o percentual de aumento no custo em relação ao dimensionamento do DNIT. Estes valores de custo variam conforme o módulo de resiliência do subleito.

A Tabela 47, mostra que o custo de construção do pavimento dimensionado por meio do método da AASHTO é o mais elevado, sendo que se destaca o caso em que o MR do subleito é de 53 MPa, pois o aumento de custo em relação ao do DNIT ultrapassa meio milhão de reais, enquanto o dimensionamento por meio do SisPavBR fica próximo a 80 mil reais de aumento. Para o subleito com MR de 53 MPa a variação de custo vai de 4% com o SisPavBR para próximo à 32% com a AASHTO, uma diferença em torno de 450 mil reais.

Tabela 47 – Custo do km do pavimento para N de $2,5 \times 10^6$

	MR Subleito	53 MPa	110 MPa	124 MPa
Método	DNIT	R\$ 1.905.426,21	R\$ 1.383.103,40	R\$ 1.383.103,40
	SisPavBR	R\$ 1.983.835,56	R\$ 1.497.701,67	R\$ 1.491.670,18
	AASHTO	R\$ 2.508.575,02	R\$ 1.533.890,60	R\$ 1.533.890,60
(+) DNIT/SisPavBR	R\$ 78.409,35	R\$ 114.598,27	R\$ 108.566,79	
(+) DNIT/AASHTO	R\$ 603.148,81	R\$ 150.787,20	R\$ 150.787,20	
↑ (%) DNIT/SisPavBR	4,12%	8,29%	7,85%	
↑ (%) DNIT/AASHTO	31,65%	10,90%	10,90%	

A Tabela 48 traz os valores do custo do pavimento para N de $7,5 \times 10^6$, bem como os percentuais de aumento do custo conforme a referência do DNIT.

Para o volume de tráfego de $7,5 \times 10^6$ o valor de construção de 1 km de pavimento ultrapassa 2 milhões de reais para subleito com MR de 53 MPa, sendo que o pavimento dimensionado pela AASHTO chegou muito próximo aos 3 milhões de reais. No método da AASHTO para os três tipos de pavimentos o custo

ultrapassa 2 milhões de reais, uma diferença de custo acima de 900 mil reais para subleito com MR de 53 e 110 MPa e para MR de 124 MPa fica acima de 750 mil reais o aumento de custo.

Tabela 48 – Custo do km do pavimento para N de $7,5 \times 10^6$

	MR Subleito	53 MPa	110 MPa	124 MPa
Método	DNIT	R\$ 2.056.213,41	R\$ 1.533.890,60	R\$ 1.533.890,60
	SisPavBR	R\$ 2.200.969,13	R\$ 1.702.772,27	R\$ 1.690.709,29
	AASHTO	R\$ 2.960.936,63	R\$ 2.438.613,81	R\$ 2.287.826,61
	(+) DNIT/SisPavBR	R\$ 144.755,71	R\$ 168.881,67	R\$ 156.818,69
	(+) DNIT/AASHTO	R\$ 904.723,21	R\$ 904.723,21	R\$ 753.936,01
	↑ (%) DNIT/SisPavBR	7,04%	11,01%	10,22%
	↑ (%) DNIT/AASHTO	44,00%	58,98%	49,15%

Com N de $2,5 \times 10^7$ (Tabela 49), o custo de 1 km de pavimento pelo dimensionamento da AASHTO para subleito com MR de 53 MPa passa de aproximadamente 2 milhões e 100 mil reais para valor superior a 3,5 milhões de reais. Sendo que o aumento de custo pela AASHTO fica superior a 1 milhão de reais enquanto pelo SisPavBR o aumento nos três casos fica próximo a 230 mil reais. Ou seja, a variação de diferença de custo com relação à referência gira de 11% a 18% com o dimensionamento por meio do SisPavBR e varia de 63% a 86% para a AASHTO, cerca de 800mil reais a mais de custo para cada km.

Tabela 49 – Custo do km do pavimento para N de $2,5 \times 10^7$

	MR Subleito	53 MPa	110 MPa	124 MPa
Método	DNIT	R\$ 2.148.964,75	R\$ 1.655.659,87	R\$ 1.220.390,86
	SisPavBR	R\$ 2.396.255,76	R\$ 1.890.887,90	R\$ 1.449.587,40
	AASHTO	R\$ 3.506.049,57	R\$ 2.711.170,28	R\$ 2.275.901,27
	(+) DNIT/SisPavBR	R\$ 247.291,01	R\$ 235.228,04	R\$ 229.196,55
	(+) DNIT/AASHTO	R\$ 1.357.084,82	R\$ 1.055.510,42	R\$ 1.055.510,42
	↑ (%) DNIT/SisPavBR	11,51%	14,21%	18,78%
	↑ (%) DNIT/AASHTO	63,15%	63,75%	86,49%

Para o volume de tráfego apresentado na Tabela 50, o valor do km chega próximo a 4 milhões de reais para um subleito com MR de 53 MPa no

dimensionamento realizado pela AASHTO. O custo adicional em relação a referência passa de 1 milhão e 600 mil reais. Para os MR do subleito de 110 MPa e 124 MPa o adicional de custo fica acima de 1 milhão e 300 mil reais, enquanto no pavimento obtido por meio do SisPavBR o aumento fica em torno de 300 mil reais.

Tabela 50 – Custo do km do pavimento para N de $7,5 \times 10^7$

	MR Subleito	53 MPa	110 MPa	124 MPa
Método	DNIT	R\$ 2.299.751,95	R\$ 1.806.447,07	R\$ 1.371.178,06
	SisPavBR	R\$ 2.655.609,75	R\$ 2.120.084,45	R\$ 1.666.720,98
	AASHTO	R\$ 3.958.411,18	R\$ 3.163.531,89	R\$ 2.728.262,88
	(+) DNIT/SisPavBR	R\$ 355.857,80	R\$ 313.637,38	R\$ 295.542,92
	(+) DNIT/AASHTO	R\$ 1.658.659,23	R\$ 1.357.084,82	R\$ 1.357.084,82
	↑ (%) DNIT/SisPavBR	15,47%	17,36%	21,55%
	↑ (%) DNIT/AASHTO	72,12%	75,12%	98,97%

No volume de tráfego de N $1,0 \times 10^8$ não foi possível obter uma espessura de revestimento asfáltico que satisfizesse todos os critérios de desempenho para o dimensionamento pela AASHTO, assim a Tabela 51 apresenta apenas os valores do custo do pavimento para o DNIT e FRANCO, onde o aumento no custo para construção do pavimento que atenda este volume de tráfego é de cerca de 360 mil reais.

Tabela 51 – Custo do km do pavimento para N de $1,0 \times 10^8$

	MR Subleito	53 MPa	110 MPa	124 MPa
Método	DNIT	R\$ 2.299.751,95	R\$ 1.806.447,07	R\$ 1.371.178,06
	SisPavBR	R\$ 2.721.956,12	R\$ 2.180.399,33	R\$ 1.733.067,34
	(+) DNIT/SisPavBR	R\$ 422.204,17	R\$ 373.952,26	R\$ 361.889,29
	↑ (%) DNIT/SisPavBR	18,36%	20,70%	26,39%

Por meio do dimensionamento realizado pelo SisPavBR, todos os tipos de pavimentos analisados necessitam de uma camada mais espessa de revestimento asfáltico, bem como o dimensionamento da AASHTO, no entanto as espessuras que são propostas aos pavimentos são de grandeza bem menor, o que resulta em

um custo mais próximo ao do DNIT. Este fator de grandeza do custo entre os três dimensionamentos pode ser observado por meio das Figuras 46 à 48.

Figura 46 - Custo do pavimento para subleito com MR de 53 MPa

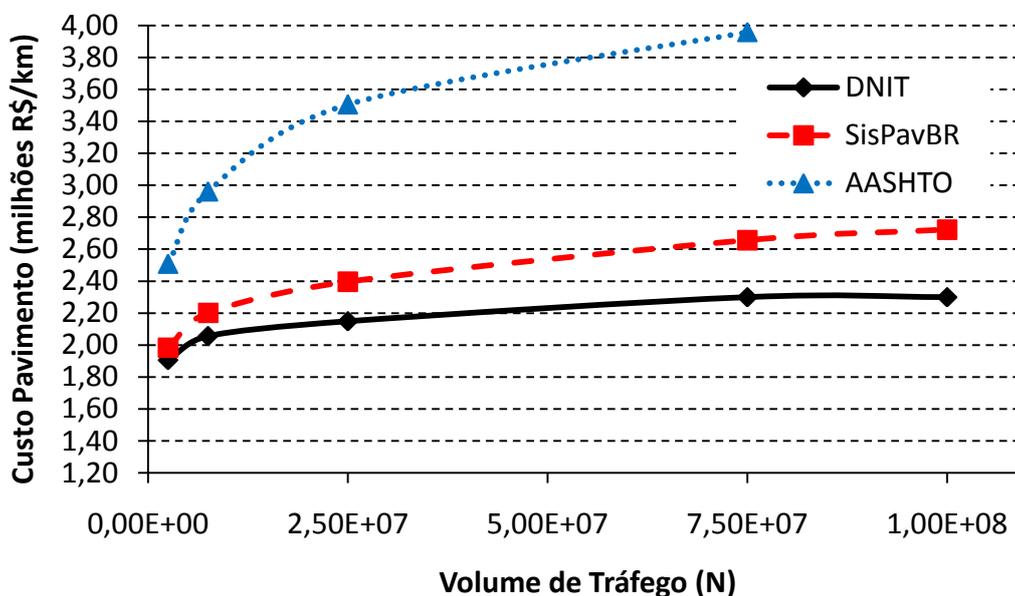


Figura 47 - Custo do pavimento para um subleito com MR de 110 MPa

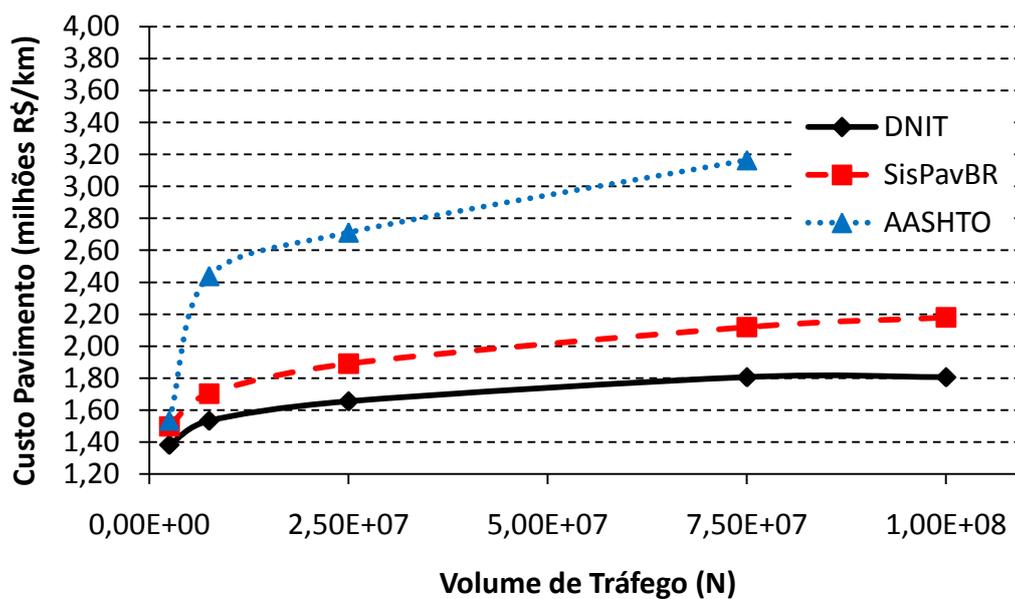
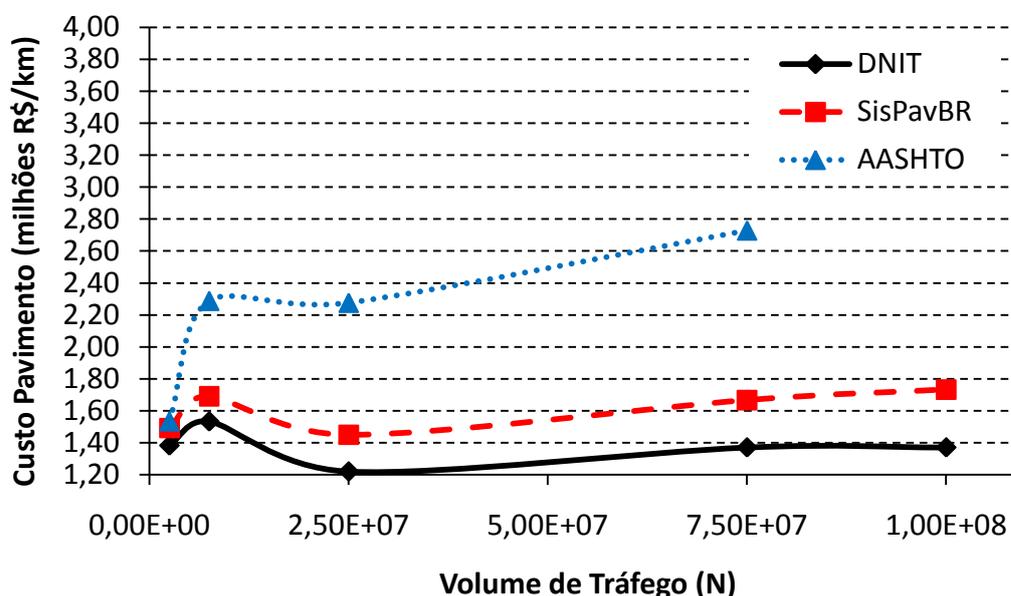


Figura 48 - Custo do pavimento para subleito com MR de 124 MPa



Nas figuras fica evidente, que quanto maior a capacidade do subleito, menor o custo de execução do pavimento, bem como ao ser imposto maior volume de tráfego maior são os custos. Isto se dá devido ao aumento da espessura do revestimento, onde estão os materiais mais caros, como o ligante e também o processo executivo, mostrado no item 3.6. Por este estudo o custo com o concreto asfáltico representa entre 17% a 32% do custo final do pavimento para o DNIT, 15% a 33% para o SisPavBR e de 23% a 47% para a AASHTO.

Para o subleito com módulo de resiliência de 124 MPa, existe uma queda na curva que demonstra o custo conforme o aumento de volume de tráfego no pavimento, isto se dá devido a retirada da camada de sub-base para valores de N a partir de $2,5 \times 10^7$, o que ocasiona a diminuição deste custo para execução do pavimento.

4.2 ANÁLISE DESEMPENHO DO PAVIMENTO PELO SISPAVBR E AASHTO

Nesta etapa foram realizadas as análises do desempenho dos pavimentos dimensionados pelo método do DNIT (referência), ou seja, por meio dos softwares AASHTOWare Pavement e SisPavBR. Determinando a vida útil do pavimento e o critério de desempenho não atendido para confiabilidade 50%.

4.2.1 Análise do pavimento por meio do SisPavBR

O método proposto por FRANCO (2007) o software do SisPavBR determina o tempo de vida útil do pavimento por meio do dano crítico (%), conforme mostra nas Tabelas 52 à 56, que leva em consideração a deformação e fadiga, bem como a tensão no topo do subleito.

Tabela 52 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $2,5 \times 10^6$ pelo SisPavBR

N		$2,5 \times 10^6$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124	
Avaliação				
Critério	DN	DN	DN	
desempenho (falha)	143,81	175,29	167,88	
Vida Útil do Pavimento				
Anos	7,0	5,7	6,0	
DN: Dano Crítico (%)				

Para N de $2,5 \times 10^6$, a vida útil do pavimento com subleitos de módulo de resiliência de 110 MPa e 124 MPa, ficou muito próximo entre 5,7 anos e 6 anos, uma diminuição de aproximadamente 40% na duração do pavimento em relação a referência.

Do mesmo modo do volume de tráfego mostrado na Tabela 53, o pavimento submetido ao N de $7,5 \times 10^6$ avaliado pelo SisPavBR tem a vida útil mais elevada para um subleito de MR 53 MPa, e com certa igualdade para o pavimento com subleito com MR 110 e 124 MPa (Tabela 53).

Tabela 53 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $7,5 \times 10^6$ pelo SisPavBR

N		$7,5 \times 10^6$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124	
Avaliação				
Critério	DN	DN	DN	
desempenho (falha)	205,31	248,43	235,05	
Vida Útil do Pavimento				
Anos	4,9	4,0	4,3	
DN: Dano Crítico (%)				

Na Tabela 54 está a vida útil do pavimento para N de $2,5 \times 10^7$ avaliado pelo SisPavBR.

Tabela 54 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $2,5 \times 10^7$ pelo SisPavBR

N		$2,5 \times 10^7$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124	
Avaliação				
Critério	DN	DN	DN	
desempenho (falha)	329,46	355,58	346,29	
Vida Útil do Pavimento				
Anos	3,0	2,8	2,9	
DN: Dano Crítico (%)				

Com o N de $2,5 \times 10^7$ o tempo de vida útil do pavimento ficou praticamente o mesmo, variando apenas cerca de 2 meses e mantendo como maior tempo de duração o pavimento com módulo de resiliência do subleito de 53 MPa. A avaliação do SisPavBR demonstra que o pavimento projetado pelo método do DNIT teria vida útil em torno de 30%.

Como mostra a Tabela 55, o volume de tráfego de $7,5 \times 10^7$, avaliado pelo SisPavBR a vida útil do pavimento chega a pouco mais de 2 anos para os três módulos de resiliência do subleito, ou seja, o pavimento dimensionado pelo DNIT para uma vida de projeto de 10 anos, mais 10% em relação ao N de $2,5 \times 10^7$.

Tabela 55 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $7,5 \times 10^7$ pelo SisPavBR

N		$7,5 \times 10^7$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124	
Avaliação				
Critério		DN	DN	DN
desempenho (falha)		470,10	467,46	446,44
Vida Útil do Pavimento				
Anos		2,1	2,1	2,2
DN: Dano Crítico (%)				

No caso em que N é de grandeza na ordem de 10^8 , a vida útil do pavimento chega a pouco mais de 1,5 anos não apresentando variação significativa em os MR do subleito. O dano crítico neste caso chega aproximadamente a 600% (Tabela 56).

Tabela 56 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $1,0 \times 10^8$ pelo SisPavBR

N		$1,0 \times 10^8$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124	
Avaliação				
Critério		DN	DN	DN
desempenho (falha)		627,45	623,94	595,88
Vida Útil do Pavimento				
Anos		1,6	1,6	1,7
DN: Dano Crítico (%)				

A semelhança entre a vida de projeto e dano crítico dos pavimentos que possuem o módulo de resiliência de 110 MPa e 124 MPa, pode ser explicada pelas considerações no cálculo da tensão admissível no subleito, pois conforme está nos estudos de Guimarães (2014), o módulo de resiliência contribui 0,6% o que ocasiona em uma parcela muito próxima, ou seja, uma diferença na ordem de 0,08 MPa.

A vida de projeto ser maior para o pavimento com subleito de módulo de resiliência de 53 MPa, para N de $2,5 \times 10^6$ e $7,5 \times 10^6$, pode ser entendida devido a camada de sub-base ser até o dobro da espessura dos outros perfis, assim este esforço acaba sendo absorvido parcialmente até chegar ao subleito.

4.2.2 Análise do pavimento por meio da AASHTO

Com uma confiabilidade de 50% foram obtidos o tempo de vida útil do pavimento e o critério de desempenho que não foi atendido, conforme mostra as Tabelas 57 à 61.

Tabela 57 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $2,5 \times 10^6$ pela AASHTO

N	$2,5 \times 10^6$		
MR Subleito (MPa)	53	110	124
Avaliação			
Critério desempenho (falha)	DT	-	DT
	27,46	-	19,51
Vida Útil do Pavimento			
Anos	2,3	10	9,5
DT : Deformação total pavimento (mm)			

O pavimento que satisfaz o tempo de projeto de 10 anos foi onde o subleito tem MR de 110 MPa e muito próximo de atingir esta idade foi quando MR foi de 124 MPa, no entanto, para MR de 53 MPa, a estrutura ficou longe de atender e a deformação total do pavimento foi o critério de desempenho não atendido, ficando em 27,46 mm de deformação e o limite avaliado pelo método é de 19 mm, ultrapassou em aproximadamente 45% o limite.

Com o volume de tráfego mais elevado (Tabela 58) conseqüentemente a vida útil do pavimento para um subleito com MR de 53 MPa caiu de 2,3 anos para 1,8 anos excedendo o limite da deformação total permanente do pavimento. Para o MR de 110 e 124 MPa, a vida útil também reduziu, porém o critério de desempenho não atendido foi o trincamento no revestimento de cima para baixo, onde o MR de 110 MPa ultrapassou o limite de 378,8 m/km em aproximadamente 45% e para o MR de 124 MPa o limite foi ultrapassado em mais de 140%.

Tabela 58 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $7,5 \times 10^6$ pela AASHTO

N		$7,5 \times 10^6$	
MR Subleito (MPa)	53	110	124
Avaliação			
Critério desempenho (falha)	DT	AC TD	AC TD
	30,4	549,24	922,35
Vida Útil do Pavimento			
Anos	1,8	7,8	4,8
DT: Deformação total pavimento (mm)			
AC TD : Trincamento top-down revestimento (m/km)			

Para volume de tráfego na casa de 10^7 o pavimento não chega a atingir a vida útil de 1 ano com o subleito de MR 124 MPa e o critério de desempenho não atendido para este módulo e o de 110 MPa é o trincamento do pavimento de cima para baixo, no caso do MR de 53 MPa a deformação total do pavimento não é satisfeita. Sendo que a deformação ultrapassa o limite em 87% e o trincamento em 360% (Tabela 59).

Tabela 59 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $2,5 \times 10^7$ pela AASHTO

N		$2,5 \times 10^7$	
MR Subleito (MPa)	53	110	124
Avaliação			
Critério desempenho (falha)	DT	AC TD	AC TD
	35,66	1702,65	1837,12
Vida Útil do Pavimento			
Anos	1,1	1,2	0,8
DT : Deformação total pavimento (mm)			
AC TD : Trincamento top-down revestimento (m/km)			

Com N de $7,5 \times 10^7$ (Tabela 60) os critérios de desempenho não atendidos para cada MR do subleito foram os mesmos do volume de tráfego de $2,5 \times 10^7$, no entanto, o tempo de vida útil do pavimento caiu bruscamente chegando ao nível da maior expectativa de vida útil do pavimento foi para MR de 53 MPa com pouco mais de 6 meses. O trincamento de cima para baixo ultrapassou o limite em 410%, ou seja, uma vida útil de aproximadamente 2,5 meses.

Tabela 60 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $7,5 \times 10^7$ pela AASHTO

N		$7,5 \times 10^7$	
MR Subleito (MPa)	53	110	124
Avaliação			
Critério desempenho (falha)	DT	AC TD	AC TD
	41,48	1931,82	1969,7
Vida Útil do Pavimento			
Anos	0,6	0,3	0,2
DT : Deformação total pavimento (mm)			
AC TD : Trincamento top-down revestimento (m/km)			

Para o caso demonstrado na Tabela 61, observa-se que não foram atendidos os mesmos critérios de desempenho do N de $7,5 \times 10^7$ e o percentual ultrapassado em cada estrutura de pavimento também foram próximos, no entanto, a vida útil do pavimento não ultrapassou há 2,5 meses.

Demonstra que o pavimento dimensionado pelo método do DNIT tem durabilidade menor a cada momento em que o N é aumentado.

Tabela 61 – Vida útil e desempenho do pavimento para N de $1,0 \times 10^8$ pela AASHTO

N		$1,0 \times 10^8$	
MR Subleito (MPa)	53	110	124
Avaliação			
Critério desempenho (falha)	DT	AC TD	AC TD
	45,87	1950,76	1969,7
Vida Útil do Pavimento			
Anos	0,2	0,2	0,1
DT : Deformação total pavimento (mm)			
AC TD : Trincamento top-down revestimento (m/km)			

A deformação total do pavimento pode estar acontecendo em subleitos de MR de 53 MPa devido a baixa capacidade de suporte. O aparecimento do trincamento *top-down* no revestimento se explica por meios dos estudos de Nuñez (2011) em valores de N a partir de $7,5 \times 10^6$, pois constatou comum e relevante para cargas mais elevadas o surgimento de esforços de cisalhamento do concreto asfáltico.

No trabalho de Matos (2011) onde fez a avaliação do surgimento de trincamento no revestimento asfáltico, foi determinado que 78% dos pavimentos

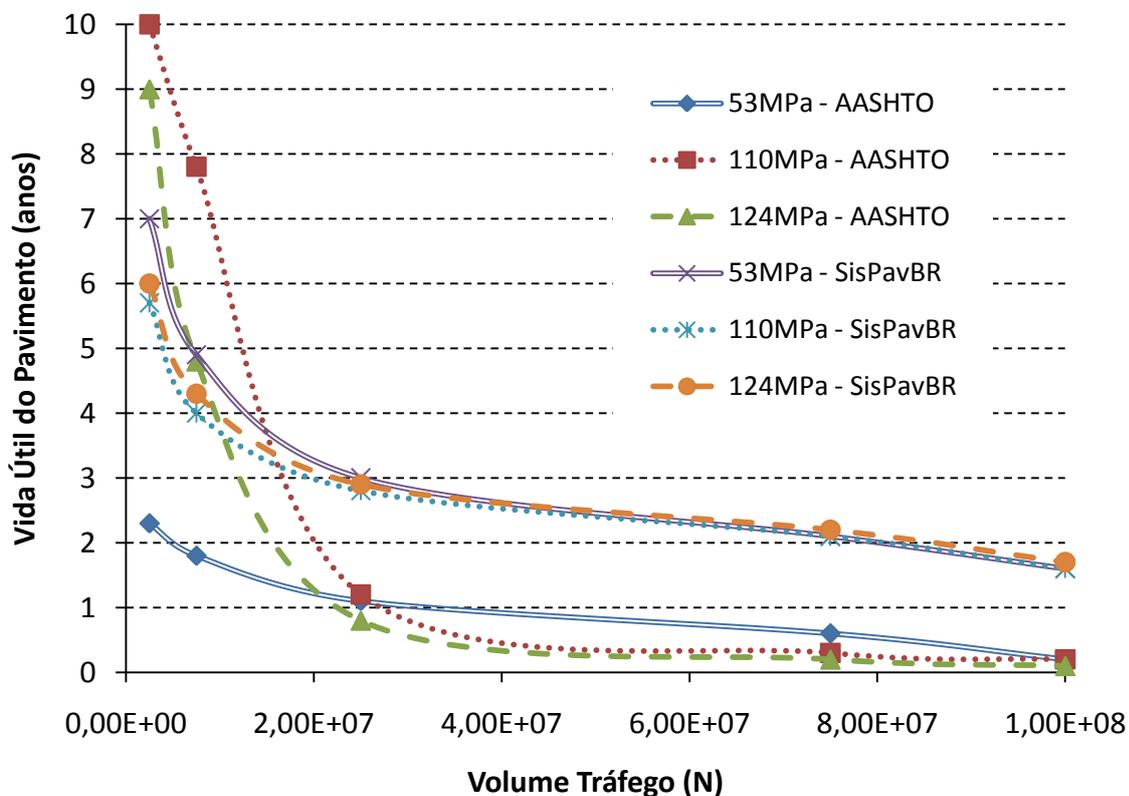
avaliados obtiveram trincamento *top-down*, mostrando a relevância de se considerar este tipo de mecanismo de deterioração. Outro fator determinado nos estudos foi que surgimento do trincamento *top-down* está relacionado com a rigidez da camada de base.

Desta forma, o surgimento do trincamento *top-down* nos casos de estudos do trabalho podem estar relacionados com a rigidez das camadas inferiores ao revestimento, em específico o subleito, visto que pode ser melhor entendido por meio da análise apresentada no item 4.3, onde mostra na Tabela 66 os coeficientes obtidos por regressão linear para o trincamento *top-down* onde o volume de tráfego e o módulo do subleito colaboram com o desenvolvimento da deterioração do pavimento.

Com a formação da equação 31 é possível verificar que com o aumento do MR do subleito, o trincamento *top-down* irá se desenvolver com maior intensidade. Também fica evidente que a espessura do revestimento é que tem menor influência neste critério, visto que com o aumento de espessura existente uma tendência maior ao cisalhamento do revestimento segundo os estudos de Kern (2014)

Na Figura 49 está a evolução da vida útil dos pavimentos avaliados por meio do SisPavBR e AASHTO, variando em função do volume de tráfego. É possível observar que a avaliação realizada pelo SisPavBR demonstra uma semelhança no formato das curvas, o que pode ser reflexo de uma calibração dos modelos mais eficazes, visto que todas evoluem da mesma maneira.

Figura 49 - Vida útil do pavimento dimensionado pelo DNIT e avaliado seu desempenho pelo SisPavBR e AASHTO



Para avaliação realizada pela AASHTO nota-se que existe certa variabilidade, visto que para os volumes de tráfego de $2,5 \times 10^6$ e $7,5 \times 10^6$ o gráfico demonstra uma evidente variação na vida de útil, bem como a partir destes volumes de tráfego os pavimentos alternam-se, passando o subleito com menor capacidade de suporte ter vida útil mais elevada.

O pavimento com módulo de resiliência de 53 MPa, ter maior vida útil em alguns casos, pode ser devido a camadas de sub-base serem mais espessas, assim transmitindo menores tensões ao subleito. No caso da avaliação da AASHTO chegar a uma vida útil maior no subleito de módulo de resiliência de 110 MPa do que no pavimento com MR de 124 MPa, pode ser devido as características do solos que são considerados nas avaliações, bem como nos procedimentos de execução dos pavimentos.

Com a expectativa de vida do pavimento e considerando verdade que o pavimento dimensionado pelo DNIT de forma empírica não tem a durabilidade que

diz os dimensionamentos mecanístico-empírico da AASHTO e SisPavBR. O pavimento pode ser relacionado com os valores de custo obtidos no item 4.1.4 e estimar o custo deste pavimento para uma durabilidade de 10 anos, desta forma foi construída a Tabela 62, considerando a execução de reparos a cada ciclo de vida do pavimento segundo o SisPavBR e AASHTO.

Para isto, foi considerada a execução de recuperação do pavimento de uma camada de tratamento superficial duplo, imprimação e pintura de ligação, com valores de R\$85.161,66; R\$30.654,25 e R\$7.337,02 (km); respectivamente.

Vale lembrar que o desenvolvimento da Tabela 62 é de caráter ilustrativo, visto que a aplicação de tratamento superficial duplo não pode ser considerada uma solução generalizada, dependendo de uma avaliação da estrutura. Foi adotado este valor devido ser mediano entre um microrevestimento e um recapeamento, ou seja, sendo um valor de custo médio para a solução de forma geral.

O ciclo de reaplicação da recuperação não foi avaliado, pois ao ser aplicado o tratamento superficial duplo a estrutura deveria ser novamente submetida ao tráfego e determinar a nova estimativa de vida. Também não foi trazido o valor do custo para o presente líquido, que gera um custo pouco menor, no entanto o objetivo é fazer uma simples avaliação se existe diferença de custo significativa, como também mostrar que é possível que o pavimento que está se demonstrando mais econômico pode não ser real ao ser levado em consideração mais variáveis.

Desta forma os valores e condições utilizadas para montagem da Tabela 62 provavelmente estão inferiores à realidade de custo que será necessário para desenvolver a recuperação do pavimento, pois além de não ser possível aplicar em grande maioria o TSD como solução, deverá ser realizada em muitos locais a fresagem do pavimento para aplicação de uma nova camada de revestimento. Bem como o ciclo de aplicação da recuperação que em alguns casos pode parecer pequeno, em algumas situações poderá ser necessária a aplicação de TSD em ciclos ainda menores. Ou seja, existe uma grande probabilidade da realidade de custo de recuperação dos pavimentos estudados ser maior que o exposto na tabela.

Tabela 62 – Custo Pavimento DNIT para durabilidade 10 anos conforme SisPavBR e AASHTO

N	MR	53 MPa	110 MPa	124 MPa
2,50E+06	DNIT/ SisPavBR	Custo / Km R\$ 2.081.358,96	R\$ 1.599.161,16	R\$ 1.588.358,27
		VM (anos) 7	5,7	6
2,50E+06	DNIT/ AASHTO	Custo / Km R\$ 2.440.873,71	R\$ 1.506.256,32	R\$ 1.519.939,98
		VM (anos) 2,3	10	9
7,50E+06	DNIT/ SisPavBR	Custo / Km R\$ 2.307.545,91	R\$ 1.841.772,91	R\$ 1.820.292,75
		VM (anos) 4,9	4	4,3
7,50E+06	DNIT/ AASHTO	Custo / Km R\$ 2.740.396,32	R\$ 1.691.778,96	R\$ 1.790.459,19
		VM (anos) 1,8	7,8	4,8
2,50E+07	DNIT/ SisPavBR	Custo / Km R\$ 2.559.474,49	R\$ 2.095.491,74	R\$ 1.645.056,11
		VM (anos) 3	2,8	2,9
2,50E+07	DNIT/ AASHTO	Custo / Km R\$ 3.268.536,78	R\$ 2.681.934,24	R\$ 2.759.802,41
		VM (anos) 1,1	1,2	0,8
7,50E+07	DNIT/ SisPavBR	Custo / Km R\$ 2.886.194,45	R\$ 2.392.889,57	R\$ 1.930.964,08
		VM (anos) 2,1	2,1	2,2
7,50E+07	DNIT/ AASHTO	Custo / Km R\$ 4.352.300,68	R\$ 5.911.544,54	R\$ 7.528.824,26
		VM (anos) 0,6	0,3	0,2
1,00E+08	DNIT/ SisPavBR	Custo / Km R\$ 3.069.457,73	R\$ 2.576.152,85	R\$ 2.095.607,02
		VM (anos) 1,6	1,6	1,7
1,00E+08	DNIT/ AASHTO	Custo / Km R\$ 8.457.398,15	R\$ 7.964.093,28	R\$ 13.686.470,47
		VM (anos) 0,2	0,2	0,1

VM: Vida Manutenção - tempo que o pavimento necessitará reparos

Com os valores de custos da Tabela 62, o custo de execução do pavimento dimensionado pelo DNIT passa a ser mais elevado, mesmo para os casos em que o volume de tráfego é menor, pois a comparação com um N de 10^8 pode ocasionar em um preço super elevado, visto que os ciclos de manutenção conforme obtido pelos softwares é muito pequeno.

Desta forma, indica que o pavimento dimensionado pelo DNIT de forma empírica resulta em um pavimento que pode estar causando uma ideia equivocada de economicidade, enquanto na verdade este pavimento causa gasto mais elevado, bem como a insatisfação do usuário da rodovia.

Assim, outros métodos de dimensionamento podem se mostrar mais atraentes para realidade atual do tráfego brasileiro, da mesma forma que

pavimentos rígidos para determinadas rodovias, visto que em longo prazo o retorno financeiro e satisfação do usuário sejam melhores atendidos.

4.3 ESTUDO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS DO AASHTOWARE PAVEMENT

No estudo realizado por meio do software de análise estatística, foram obtidos por meio de regressão linear múltipla com confiabilidade de 95% os resultados que se mostra nas Tabelas 63 à 67 para os critérios de desempenho avaliados pelo AASHTOWare Pavement, estes dados levaram em consideração a relação de dependência dos critérios de desempenho com o volume de tráfego, espessuras das camadas e módulo de resiliência das camadas. Nas Figuras 50 à 54 mostram o agrupamento destes valores, para relação entre os valores previstos e os valores obtidos pelo software.

Vale lembrar que os coeficientes contidos nas tabelas marcados de vermelho, determinam as variáveis que o software identifica como com maior influência para determinação dos critérios de desempenho (variáveis dependentes). Também deve ser considerado que o software analisa as variáveis independentes com a mesma amplitude de variação, ou seja, os valores devem ser parametrizados para que exista a identificação da influência causada por cada variável.

Desta forma, as variáveis independentes devem ser parametrizadas por meio das equações 21 à 27, antes dos valores serem inseridos nas equações obtidas para determinação dos critérios de desempenho do pavimento.

$$N_p = -1,05 + 2,05 \times 10^{-8} N \quad (21)$$

$$E_{rev_p} = -1,67 + 13 \times 10^{-3} E_{rev} \quad (22)$$

$$E_{bas_p} = -4 + 2 \times 10^{-2} E_{bas} \quad (23)$$

$$E_{sub_p} = -3 + 13 \times 10^{-3} E_{sub} \quad (24)$$

$$M_{bas_p} = -3 + 2 \times 10^{-2} M_{bas} \quad (25)$$

$$M_{sub_p} = -2 + 1 \times 10^{-2} M_{sub} \quad (26)$$

$$M_{sl_p} = -2,59 + 29 \times 10^{-3} M_{sl} \quad (27)$$

Onde:

N_p, N = Volume de tráfego parametrizado e volume de tráfego real;

E_{rev_p}, E_{rev} = Espessura revestimento parametrizado e espessura revestimento real;

E_{bas_p}, E_{bas} = Espessura base parametrizado e espessura base real;

E_{sub_p}, E_{sub} = Espessura sub-base parametrizado e espessura sub-base real;

M_{bas_p}, M_{bas} = MR da base parametrizado e MR da base real;

M_{sub_p}, M_{sub} = MR da sub-base parametrizado e MR da sub-base real;

M_{sl_p}, M_{sl} = MR do subleito parametrizado e MR do subleito real;

Tabela 63 – Coeficientes obtidos para regressão linear dos valores do IRI

Regression Summary for Dependent Variable: IRI		
R= 0,93630147 R ² = 0,87666045 Adjusted R ² = 0,87639332		
F(7,3232)=3281,7 p<0,0000 Std.Error of estimate: 0,18523		
	b	Std. Err. of b
Intercept	2,189215	0,003406
N	0,454667	0,004098
E _{rev}	-0,373157	0,004366
E _{bas}	-0,018532	0,003985
E _{sub}	-0,018130	0,003829
Mr _{bas}	-0,083046	0,003985
Mr _{sub}	-0,042333	0,003985
Mr _{sl}	-0,171139	0,003254

A equação 28 determina o IRI por meio dos coeficientes contidos na Tabela 63.

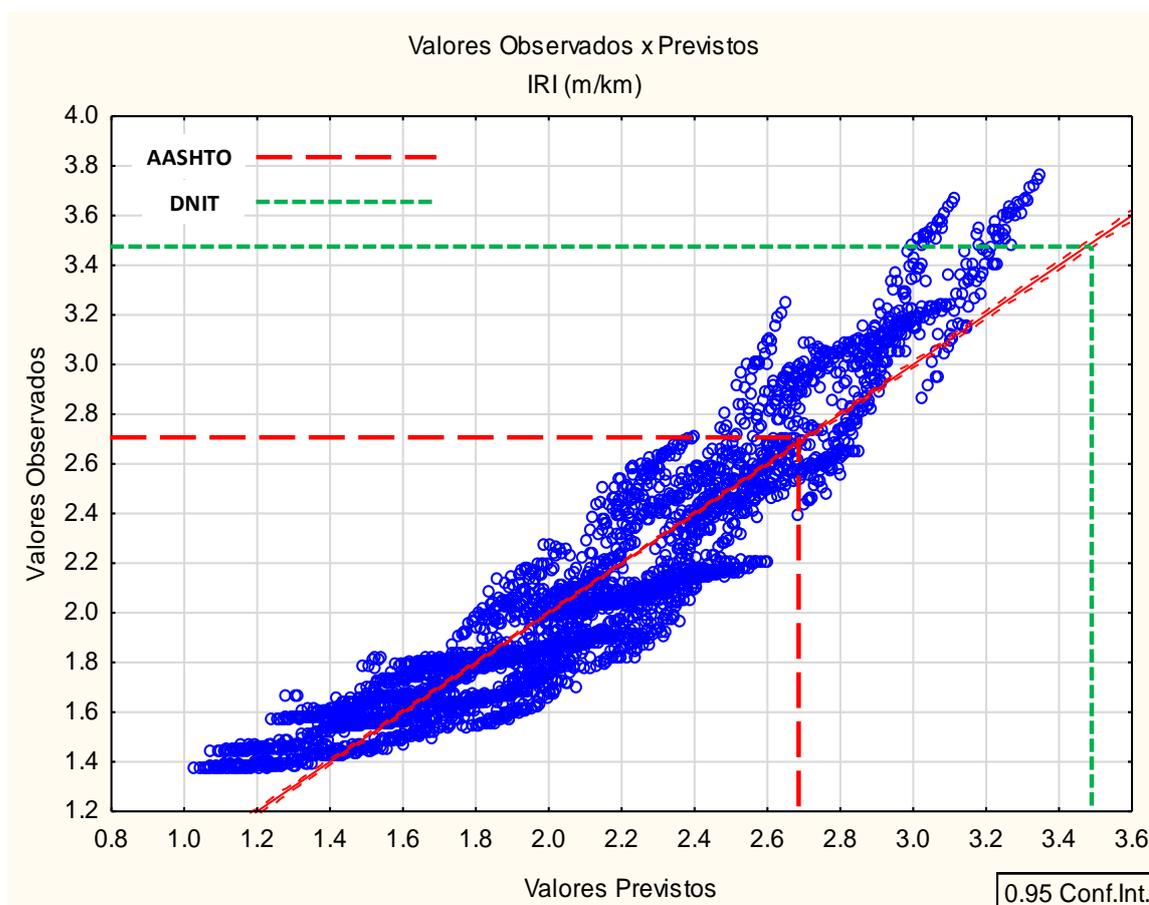
$$IRI = 2,189 + 0,454.N - 0,373.E_{rev} - 0,0185.E_{bas} - 0,0181.E_{sub} - 0,083.Mr_{bas} - 0,042.Mr_{sub} - 0,171.Mr_{sl} \quad (28)$$

A Tabela 63 demonstra que o nível de significância das variáveis são todas expressivas para determinação do IRI, sendo que o N causa aumento no valor do IRI, bem como as espessuras e módulos de resiliência das camadas que evitam a formação de irregularidades no pavimento. Porém, a espessura do revestimento e módulo de resiliência do subleito tem maior influência para inibir o desenvolvimento do IRI no pavimento.

Nos gráficos que relacionam os valores previstos e os obtidos por meio da análise estatística, estão demarcados os limites que devem ser atendidos pela AASHTO (vermelho) e pelo DNIT (verde), sendo que os limites desenvolvidos pelo DNIT estão demonstrados no item 3.5 do trabalho, que foram obtidos por meio das considerações contidas no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos de 2006.

Na Figura 50, está o limite do DNIT para IRI conforme Manual de Restauração, o que indica que os pavimentos analisados estão quase em sua totalidade dentro deste limite, ou seja, a utilização desta equação para determinação deste critério em um dimensionamento de pavimento regular é de índice satisfatório significativo.

Figura 50 - Valores obtidos x previstos para IRI



Na deformação total permanente do pavimento, mantêm-se a mesma influência das variáveis N, causando aumento na deformação, as espessuras e

módulos ajudando a inibir o desenvolvimento de deformações, porém as espessuras da base e sub-base neste caso causam menor influência e resultado segundo a avaliação.

Na Tabela 64 estão os coeficientes obtidos por regressão linear para deformação total permanente do pavimento.

Tabela 64 – Coeficientes obtidos para regressão linear dos valores da Deformação Total Pavimento

Regression Summary for Dependent Variable: Def. Total Pavimento		
R= 0,95092181 R ² = 0,90425229 Adjusted R ² = 0,90404492		
F(7,3232)=4360,5 p<0,0000 Std.Error of estimate: 4,0975		
	b	Std. Err. of. b
Intercept	31,93536	0,075348
N	10,69071	0,090656
E _{rev}	-9,64488	0,096580
E _{bas}	-0,08641	0,088165
E _{sub}	-0,09112	0,084706
Mr _{bas}	-1,55781	0,088165
Mr _{sub}	-0,96457	0,088165
Mr _{sl}	-5,67279	0,071986

A equação 29 determina a Deformação total pavimento por meio dos coeficientes contidos na Tabela 64.

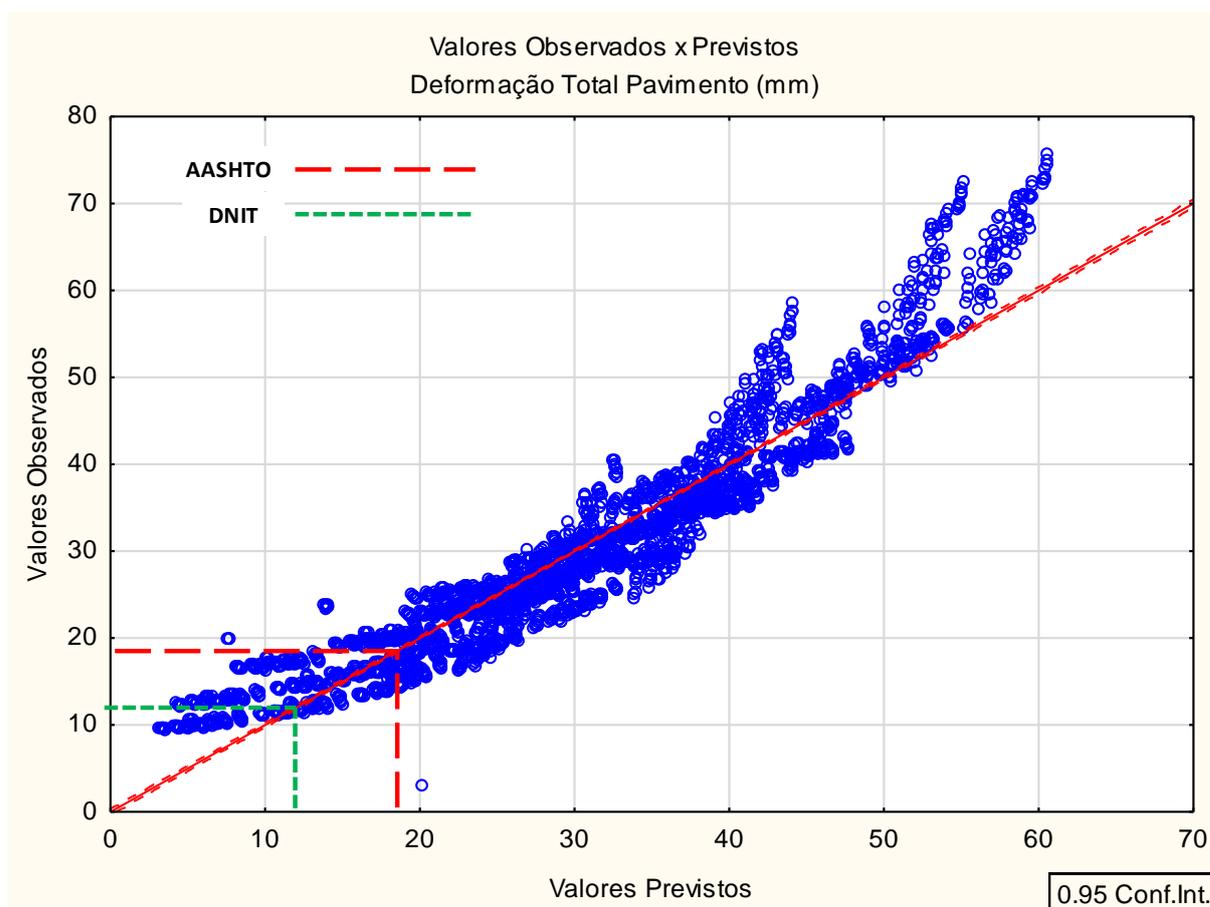
$$Dtp = 31,935 + 10,69 \cdot N - 9,644 \cdot E_{rev} - 0,086 \cdot E_{bas} - 0,091 \cdot E_{sub} - 1,557 \cdot Mr_{bas} - 0,964 \cdot Mr_{sub} - 5,672 \cdot Mr_{sl} \quad (29)$$

Se considerado ambos os limites descrito pelo DNIT e AASHTO para deformação permanente total do pavimento ficam os valores obtidos por meio da regressão linear para determinação deste critério com grande parte dos valores fora do limite, no entanto a equação da deformação total do pavimento tem boa aceitabilidade para utilização como dimensionamento do pavimento.

Observando os gráficos das Figuras 50 e 51, é possível verificar que os valores tendem a ficarem mais próximos da reta de ajuste, com uma tendência linear com valores de R² entre 0,85 a 0,9; com um percentual de convergência dos valores superior a 85%. No entanto, para o trincamento *bottom-up* e *top-down* é fácil verificar

que acontece uma queda na convergência dos valores, visto que o caso mostrado na figura 53 apresenta o R^2 de 0,73; onde mostra que os valores apresentam uma pequena dispersão nos valores intermediários.

Figura 51 - Valores obtidos x previstos para deformação total pavimento



A Tabela 65 indica que o volume de tráfego incide no desenvolvimento de trincas de baixo para cima e da mesma forma que os demais critérios, as espessuras e módulos das camadas evitam esta ocorrência, porém a variável mais significativa neste caso é a espessura revestimento, ou seja, quanto maior espessura menor será a incidência de trincas *bottom-up*.

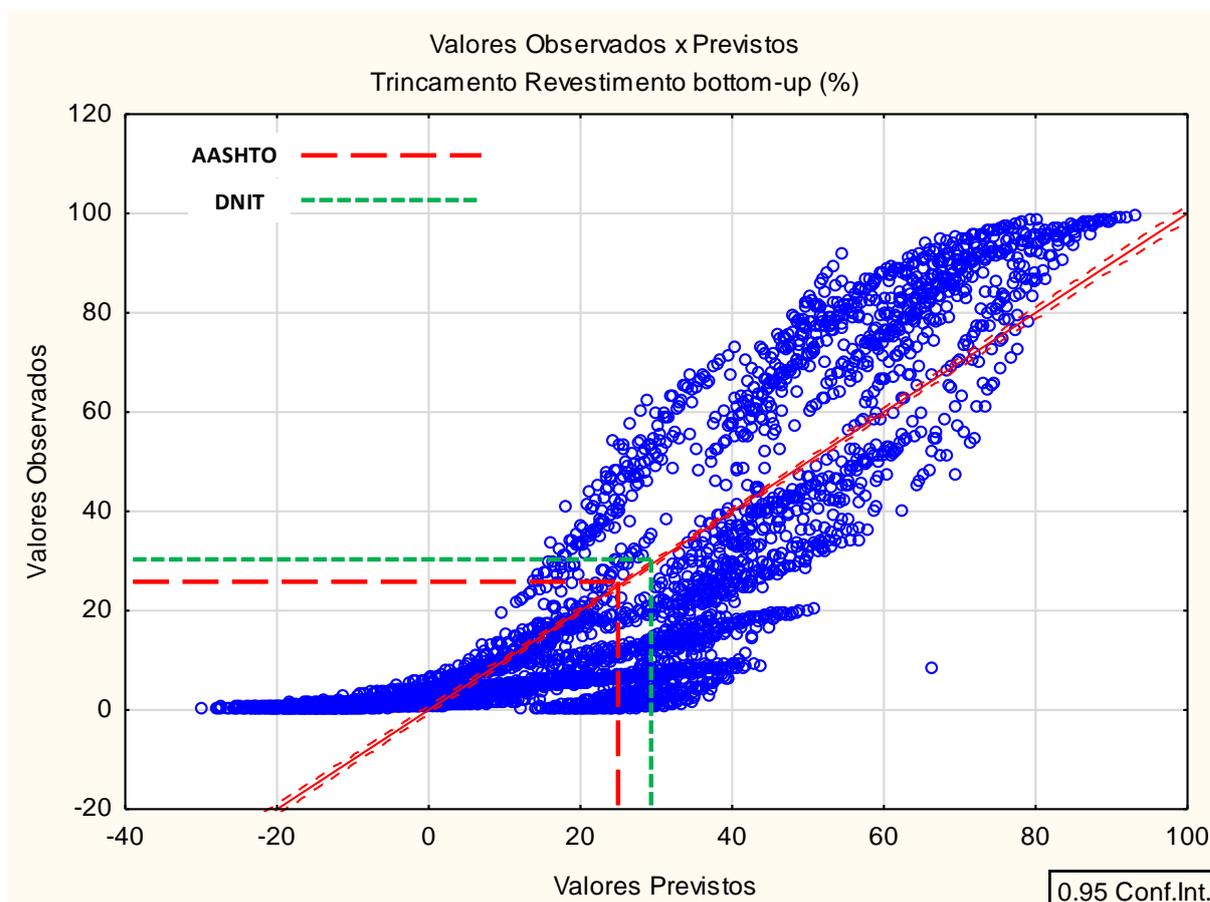
Tabela 65 – Coeficientes obtidos para regressão linear dos valores do trincamento no revestimento de baixo para cima

Regression Summary for Dependent Variable: Trinc. bottom-up Revest.		
R= 0,85622483 R ² = 0,73312096 Adjusted R ² = 0,73254295		
F(7,3232)=1268,3 p<0,0000 Std.Error of estimate: 15,843		
	b	Std. Err. of b
Intercept	31,5983	0,291333
N	25,1203	0,350524
E _{rev}	-21,0887	0,373429
E _{bas}	-1,9171	0,340892
E _{sub}	-1,7792	0,327519
Mr _{bas}	-5,7402	0,340892
Mr _{sub}	-2,2858	0,340892
Mr _{sl}	-3,5600	0,278337

A equação 30 determina o trincamento *bottom-up* no revestimento por meio dos coeficientes contidos na Tabela 65.

$$Tbc = 31,598 + 25,12 \cdot N - 21,08 \cdot E_{rev} - 1,917 \cdot E_{bas} - 1,779 \cdot E_{sub} - 5,77 \cdot Mr_{bas} - 2,28 \cdot Mr_{sub} - 3,56 \cdot Mr_{sl} \quad (30)$$

Na Figura 52 que trata do trincamento do revestimento *bottom-up* os valores analisados se afastam dos limites da AASHTO e DNIT, ficando com um percentual maior de resultados que não atendem os limites previstos para um pavimento com condições regulares de uso, porém ainda permanece com a maioria dos resultados analisados dentro da região de valores satisfatórios, visto que existe uma concentração de valores na faixa inicial da reta, próximo ao limite da AASHTO de 25%.

Figura 52 - Valores obtidos x previstos para trincamento no revestimento *bottom-up*

No caso do trincamento no revestimento de cima para baixo (Tabela 66) o R^2 cai para 0,4 onde os valores ficam em uma nuvem, ou seja, com uma dispersão significativa entre os resultados. Onde os valores centrais (intermediários) tendem a se afastarem da reta de ajuste dos valores.

A equação 31 determina o trincamento no revestimento de *top-down* por meio dos coeficientes contidos na Tabela 66.

$$Tcb = 955,4 + 550,44.N - 12,1.E_{rev} - 69,46.E_{bas} - 90,28.E_{sub} - 147,75.Mr_{bas} - 80,13.Mr_{sub} + 99,65.Mr_{sl} \quad (31)$$

Tabela 66 – Coeficientes obtidos para regressão linear dos valores do trincamento no revestimento de cima para baixo

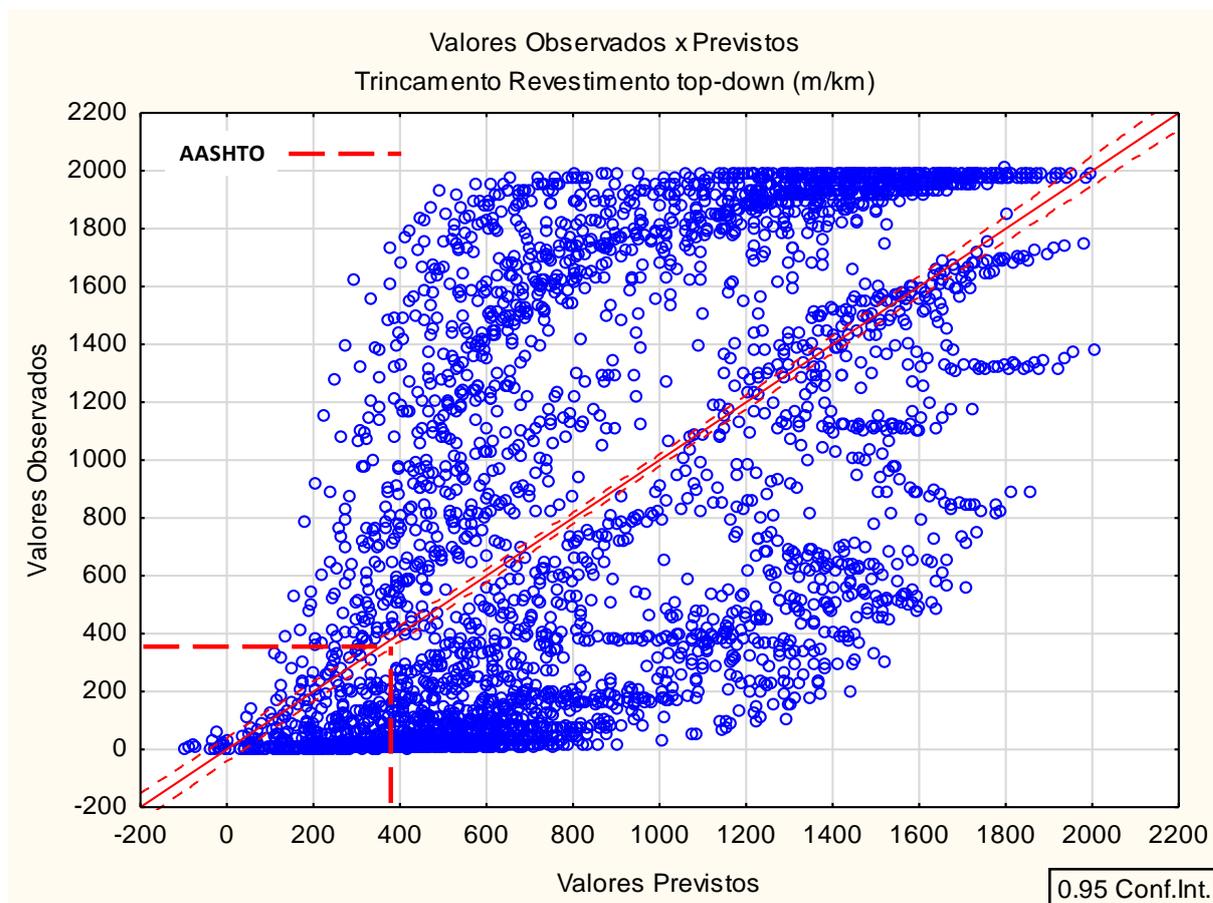
Regression Summary for Dependent Variable: Trinc. top-down Revest.		
R= 0,63695810 R ² = 0,40571562 Adjusted R ² =0,40442849		
F(7,3232)=315.21 p<0.0000 Std.Error of estimate: 579,88		
	b	Std. Err. of b
Intercept	955,405	10,66309
N	550,443	12,82954
E _{rev}	-12,108	13,66788
E _{bas}	-69,462	12,47701
E _{sub}	-90,280	11,98752
Mr _{bas}	-147,759	12,47701
Mr _{sub}	-80,138	12,47701
Mr _{sl}	99,659	10,18744

Por meio dos coeficientes contidos na Tabela 66, verifica-se que possuem valores altos (em módulo), porém o valor da constante é bem superior chegando a aproximadamente o dobro do valor do coeficiente do volume de tráfego, apontando a não convergência dos valores, bem como a estimativa de erro passa a ser elevada.

Também define como menor fator de influência para o trincamento de cima para baixo a espessura do revestimento, bem como o módulo de resiliência do subleito colabora para o surgimento deste trincamento, ou seja, quanto mais elevado o módulo do subleito maior será a probabilidade do surgimento de trincas.

Para este critério de desempenho do pavimento não é aconselhável definir uma equação linear para descrever o comportamento do trincamento do revestimento quando ocorrido de cima para baixo, a dispersão dos valores obtidos não definem uma equação de ajuste por meio da regressão levando em consideração o volume de tráfego, espessuras das camadas e módulo de resiliência das mesmas. Observando o limite da AASHTO, verifica-se que a grande maioria dos pavimentos analisados está com trincamento do tipo *top-down* em uma vasta extensão do pavimento (Figura 53).

Figura 53 - Valores obtidos x previstos para trincamento revestimento *top-down*



Na Tabela 67, o N demonstra que auxilia no aumento da deformação do revestimento, juntamente com a espessura da base, no entanto, a espessura da base com valor bem menor, ou seja, a grande carga de deformação vem do volume de tráfego.

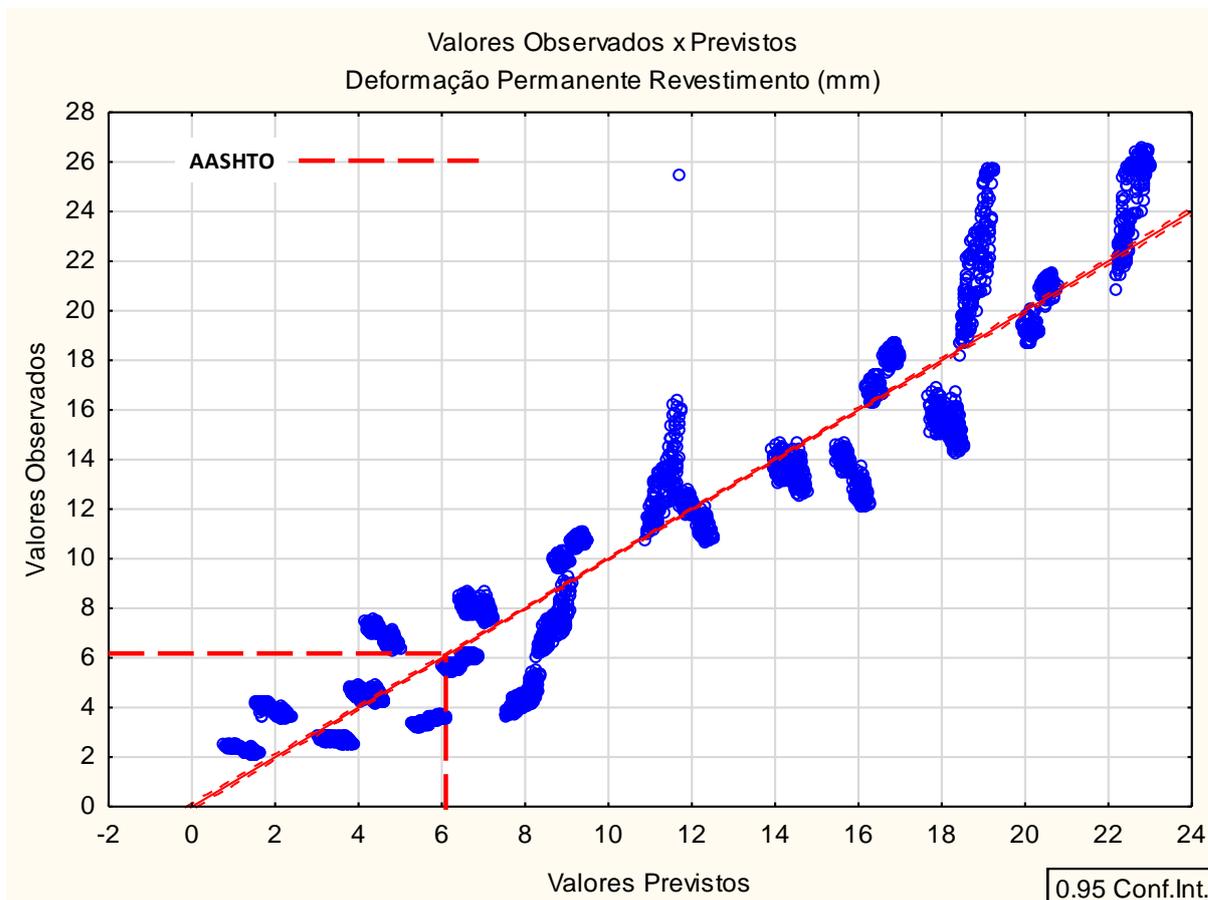
Já a espessura do revestimento e módulo de resiliência são as variáveis que causam menor incidência de deformação no revestimento. A espessura da sub-base e os módulos de resiliência da base e sub-base tem influência muito baixa para sobre a determinação da deformação do revestimento.

Tabela 67 – Coeficientes obtidos para regressão linear dos valores da deformação do revestimento

Regression Summary for Dependent Variable: Defor. Revestimento		
R= 0,95457891 R ² = 0,91122089 Adjusted R ² = 0,91102861		
F(7,3232)=4739,0 p<0,0000 Std.Error of estimate: 1,9819		
	b	Std. Err. of b
Intercept	11,91647	0,036445
N	7,32744	0,043849
E _{rev}	-3,36967	0,046714
E _{bas}	0,10596	0,042644
E _{sub}	-0,02471	0,040971
Mr _{bas}	-0,05951	0,042644
Mr _{sub}	-0,02371	0,042644
Mr _{sl}	-0,21103	0,034819

A Figura 54 mostra os valores agrupados em intervalos, porém sua grande maioria em torno da reta de ajuste. Em relação ao limite da AASHTO os valores ficam com uma quantidade significativa fora do limite, no entanto o R² descreve boa confiabilidade para o uso da equação da deformação permanente do revestimento.

Figura 54 - Valores obtidos x previstos para deformação permanente do revestimento



Devido à dispersão dos valores em relação à reta de ajuste, com o percentual de convergência dos valores em um caso inferior até mesmo a 50%, foram realizadas análises dos critérios de desempenho dos pavimentos por meio da interação de 2ª e 3ª ordem das variáveis independentes, volume de tráfego, espessura das camadas e módulo de resiliência das camadas do pavimento como pode ser observado nas Tabelas 68 à 72.

Tabela 68 – Coeficientes de regressão linear do IRI

Regression Summary for Dependent Variable: IRI
R= 0,98738369 R²= 0,97492656 Adjusted R²= 0,97450145
F(54,3185)=2293,4 p<0,0000 Std.Error of estimate: 0,08413

	b	Std. Err. of. b		b	Std. Err. of. b
Intercept	2,328875	0,006209			
N	0,444496	0,001906	E _{sub} xMr _{sub}	-0,015622	0,002130
E _{rev}	-0,405974	0,002075	E _{sub} xMr _{sl}	0,015821	0,001739
E _{bas}	-0,018280	0,001895	Mr _{bas} xMr _{bas}	0,022435	0,003135
E _{sub}	-0,019043	0,001857	Mr _{bas} xMr _{sub}	-0,001930	0,002259
Mr _{bas}	-0,086411	0,001895	Mr _{bas} xMr _{sl}	0,000754	0,001845
Mr _{sub}	-0,046662	0,001895	Mr _{sub} xMr _{sub}	0,013880	0,003135
Mr _{sl}	-0,176907	0,001547	Mr _{sub} xMr _{sl}	0,004965	0,001845
NxN	-0,223639	0,004407	E _{rev} xE _{bas} xE _{sub}	-0,008626	0,002858
NxE _{rev}	-0,192568	0,002497	E _{rev} xE _{bas} xMr _{bas}	0,019433	0,002974
NxE _{bas}	-0,004944	0,002280	E _{rev} xE _{bas} xMr _{sub}	-0,013546	0,002974
NxE _{sub}	-0,005302	0,002190	E _{rev} xE _{bas} xMr _{sl}	-0,009297	0,002429
NxMr _{bas}	-0,017235	0,002280	E _{rev} xE _{sub} xMr _{bas}	-0,000917	0,002858
NxMr _{sub}	-0,009089	0,002280	E _{rev} xE _{sub} xMr _{sub}	0,010509	0,002858
NxMr _{sl}	-0,044296	0,001861	E _{rev} xE _{sub} xMr _{sl}	-0,015349	0,002333
E _{rev} xE _{rev}	-0,027021	0,003325	E _{rev} xMr _{bas} xMr _{sub}	-0,002842	0,002974
E _{rev} xE _{bas}	0,019310	0,002475	E _{rev} xMr _{bas} xMr _{sl}	-0,002533	0,002429
E _{rev} xE _{sub}	0,022329	0,002333	E _{rev} xMr _{sub} xMr _{sl}	-0,003544	0,002429
E _{rev} xMr _{bas}	0,090992	0,002475	E _{bas} xE _{sub} xMr _{bas}	0,001446	0,002609
E _{rev} xMr _{sub}	0,039157	0,002475	E _{bas} xE _{sub} xMr _{sub}	0,002338	0,002609
E _{rev} xMr _{sl}	0,057636	0,002021	E _{bas} xE _{sub} xMr _{sl}	-0,004468	0,002130
E _{bas} xE _{bas}	-0,001662	0,003135	E _{bas} xMr _{bas} xMr _{sub}	0,001729	0,002715
E _{bas} xE _{sub}	0,007143	0,002130	E _{bas} xMr _{bas} xMr _{sl}	0,002347	0,002217
E _{bas} xMr _{bas}	-0,019954	0,002259	E _{bas} xMr _{sub} xMr _{sl}	-0,001257	0,002217
E _{bas} xMr _{sub}	0,011105	0,002259	E _{sub} xMr _{bas} xMr _{sub}	-0,001165	0,002609
E _{bas} xMr _{sl}	0,007797	0,001845	E _{sub} xMr _{bas} xMr _{sl}	-0,000530	0,002130
E _{sub} xE _{sub}	-0,000802	0,004351	E _{sub} xMr _{sub} xMr _{sl}	0,002733	0,002130
E _{sub} xMr _{bas}	-0,000568	0,002130	Mr _{bas} xMr _{sub} xMr _{sl}	-0,002208	0,002217

Com os valores da Tabela 68, foi construída a equação 33 que determina o valor do IRI com a ampliação da interação entre as variáveis.

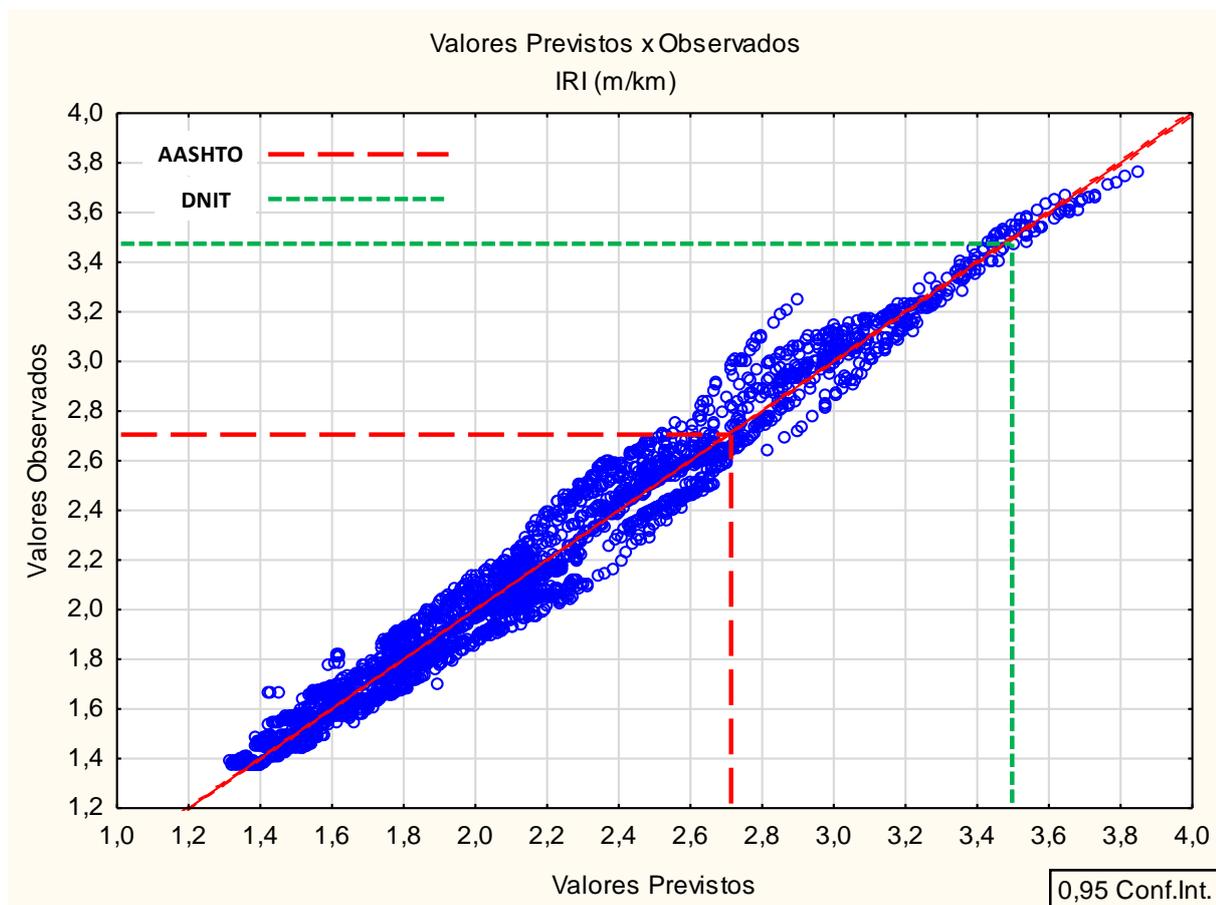
$$\begin{aligned}
IRI = & 2,3289 + 0,4445N - 0,406E_{rev} - 0,2236N^2 - 0,1926N \cdot E_{rev} - \\
& 0,1769Mr_{sl} + 0,091E_{rev} \cdot Mr_{bas} - 0,0864Mr_{bas} + 0,0576E_{rev} \cdot Mr_{sl} - 0,0467Mr_{sub} - \\
& 0,0443N \cdot Mr_{sl} + 0,0392E_{rev} \cdot Mr_{sub} - 0,027E_{rev}^2 + 0,0224Mr_{bas}^2 + 0,0223E_{rev} \cdot E_{sub} - \\
& 0,02E_{bas} \cdot Mr_{bas} + 0,0194E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{bas} + 0,0193E_{rev} \cdot E_{bas} - 0,019E_{sub} - \\
& 0,0183E_{bas} - 0,0172N \cdot Mr_{bas} + 0,0158E_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,0156E_{sub} \cdot Mr_{sub} - \\
& 0,0153E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sl} + 0,0139Mr_{sub}^2 - 0,0135E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{sub} + 0,0111E_{bas} \cdot Mr_{sub} + \\
& 0,0105E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sub} - 0,0093E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{sl} - 0,0091N \cdot Mr_{sub} - \\
& 0,0086E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot E_{sub} + 0,0078E_{bas} \cdot Mr_{sl} + 0,0071E_{bas} \cdot E_{sub} - 0,0053N \cdot E_{sub} + \\
& 0,005Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,0049N \cdot E_{bas} - 0,0045E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,0035E_{rev} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - \\
& 0,0028E_{rev} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} + 0,0027E_{sub} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,0025E_{rev} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} + \\
& 0,0023E_{bas} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} + 0,0023E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sub} - 0,0022Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - \\
& 0,0019Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} + 0,0017E_{bas} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} - 0,0017E_{bas}^2 + \\
& 0,0014E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{bas} - 0,0013E_{bas} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,0012E_{sub} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} - \\
& 0,0009E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{bas} - 0,0008E_{sub}^2 + 0,0008Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} - 0,0006E_{sub} \cdot Mr_{bas} - \\
& 0,0005E_{sub} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} \quad (33)
\end{aligned}$$

Na Tabela 68 é observado que o valor de R² chega 0,97 aumentando em aproximadamente 10% em relação à equação composta apenas com os critérios de desempenho, porém nota-se que algumas interações são de pouca interferência nos resultados visto que os coeficientes são de ordem 10⁻⁴.

Com a análise dos valores da Tabela 68 e a construção da equação 33 que está em ordem de maior grandeza de influência dos valores sobre o IRI e, demonstrou que o volume de tráfego tem maior relação com o aumento das irregularidades do pavimento, a espessura do revestimento e módulo de resiliência do subleito diminuem a existência ou desenvolvimento do IRI.

Os gráficos que trazem a relação entre os valores previstos e observados estão nas Figuras 55 à 59, sendo que consta a inclusão das interações de 2ª e 3ª ordem das variáveis independentes. Nos mesmos gráficos encontram-se os limites considerados pela AASHTO e DNIT para um pavimento em condições regulares de trafegabilidade.

Figura 55 - Valores observados x previstos do IRI (3ª ordem)



Na Figura 50 os valores do IRI somente com a interação dos critérios de desempenho do pavimento mostram uma linearidade no comportamento dos valores, porém no início e final da reta de ajuste ocorre uma pequena dispersão nos valores, onde compreende um volume de tráfego baixo e elevado. No entanto, com a Figura 55 do gráfico dos valores com as correlações de 3ª ordem os resultados ficam praticamente lineares, todos sobre a reta de ajuste ou envoltos, sem dispersão de dados, o que ocasiona em uma convergência dos dados de aproximadamente 97% dos resultados.

Os resultados obtidos com maior interação dos resultados também demonstram que os valores observados permanecem em praticamente sua totalidade dentro dos limites de pavimentos aceitáveis.

Para a deformação total do pavimento o R^2 passou de 0,90 para 0,98; um aumento menor que o ocorrido no IRI, no entanto, este critério já estava com uma convergência dos dados mais precisa e com estes resultados passa a ter uma

precisão bem maior nos resultados da deformação. Pois se observados os coeficientes obtidos, verifica-se que os valores não possuem uma variação muito elevada, bem como coeficientes de ordem muito pequena, neste caso apresentou apenas um coeficiente na casa de 10^{-3} , o restante dos coeficientes de dimensão pequena variaram em torno de 10^{-1} e 10^{-2} , desta forma a estimativa de erro é reduzida.

Tabela 69 – Coeficientes de regressão linear deformação total pavimento

Regression Summary for Dependent Variable: Def. Total Pavimento					
R= 0,99179050 R ² = 0,98364839 Adjusted R ² = 0,98337116					
F(54,3185)=3548,1 p<0,0000 Std.Error of estimate: 1,7058					
	b	Std. Err. of. b		b	Std. Err. of. b
Intercept	32,8793	0,125885			
N	10,4766	0,038637	E _{sub} xMr _{sub}	0,2068	0,045807
E _{rev}	-10,1793	0,042083	E _{sub} xMr _{sl}	0,1504	0,037401
E _{bas}	-0,0601	0,038416	Mr _{bas} xMr _{bas}	-0,0426	0,088221
E _{sub}	-0,0963	0,037657	Mr _{bas} xMr _{sub}	0,0180	0,043188
Mr _{bas}	-1,5858	0,038416	Mr _{bas} xMr _{sl}	-0,3461	0,043188
Mr _{sub}	-1,0573	0,038416	Mr _{sub} xMr _{sub}	0,2755	0,035262
Mr _{sl}	-5,9065	0,031367	Mr _{sub} xMr _{sl}	0,5801	0,063570
NxN	-4,9430	0,089364	E _{rev} xE _{bas} xE _{sub}	0,0088	0,045807
NxE _{rev}	-3,2445	0,050633	E _{rev} xE _{bas} xMr _{bas}	0,0368	0,037401
NxE _{bas}	0,0314	0,046221	E _{rev} xE _{bas} xMr _{sub}	0,4171	0,063570
NxE _{sub}	-0,0531	0,044408	E _{rev} xE _{bas} xMr _{sl}	0,1148	0,037401
NxMr _{bas}	-0,1636	0,046221	E _{rev} xE _{sub} xMr _{bas}	-0,1532	0,057942
NxMr _{sub}	-0,1850	0,046221	E _{rev} xE _{sub} xMr _{sub}	0,4337	0,060308
NxMr _{sl}	-1,4738	0,037739	E _{rev} xE _{sub} xMr _{sl}	-0,3166	0,060308
E _{rev} xE _{rev}	3,1052	0,067426	E _{rev} xMr _{bas} xMr _{sub}	-0,2149	0,049241
E _{rev} xE _{bas}	0,3160	0,050179	E _{rev} xMr _{bas} xMr _{sl}	-0,0948	0,057942
E _{rev} xE _{sub}	0,4871	0,047310	E _{rev} xMr _{sub} xMr _{sl}	0,3187	0,057942
E _{rev} xMr _{bas}	1,8001	0,050179	E _{bas} xE _{sub} xMr _{bas}	-0,4145	0,047310
E _{rev} xMr _{sub}	1,0355	0,050179	E _{bas} xE _{sub} xMr _{sub}	-0,1614	0,060308
E _{rev} xMr _{sl}	1,7723	0,040971	E _{bas} xE _{sub} xMr _{sl}	-0,1649	0,049241
E _{bas} xE _{bas}	-0,0706	0,063570	E _{bas} xMr _{bas} xMr _{sub}	-0,0873	0,049241
E _{bas} xE _{sub}	0,1219	0,043188	E _{bas} xMr _{bas} xMr _{sl}	0,0396	0,052894
E _{bas} xMr _{bas}	-0,3281	0,045807	E _{bas} xMr _{sub} xMr _{sl}	0,0279	0,052894
E _{bas} xMr _{sub}	0,2068	0,045807	E _{sub} xMr _{bas} xMr _{sub}	-0,0622	0,043188
E _{bas} xMr _{sl}	32,8793	0,125885	E _{sub} xMr _{bas} xMr _{sl}	0,0221	0,055053
E _{sub} xE _{sub}	10,4766	0,038637	E _{sub} xMr _{sub} xMr _{sl}	0,0570	0,044951
E _{sub} xMr _{bas}	-10,1793	0,042083	Mr _{bas} xMr _{sub} xMr _{sl}	-0,0352	0,044951

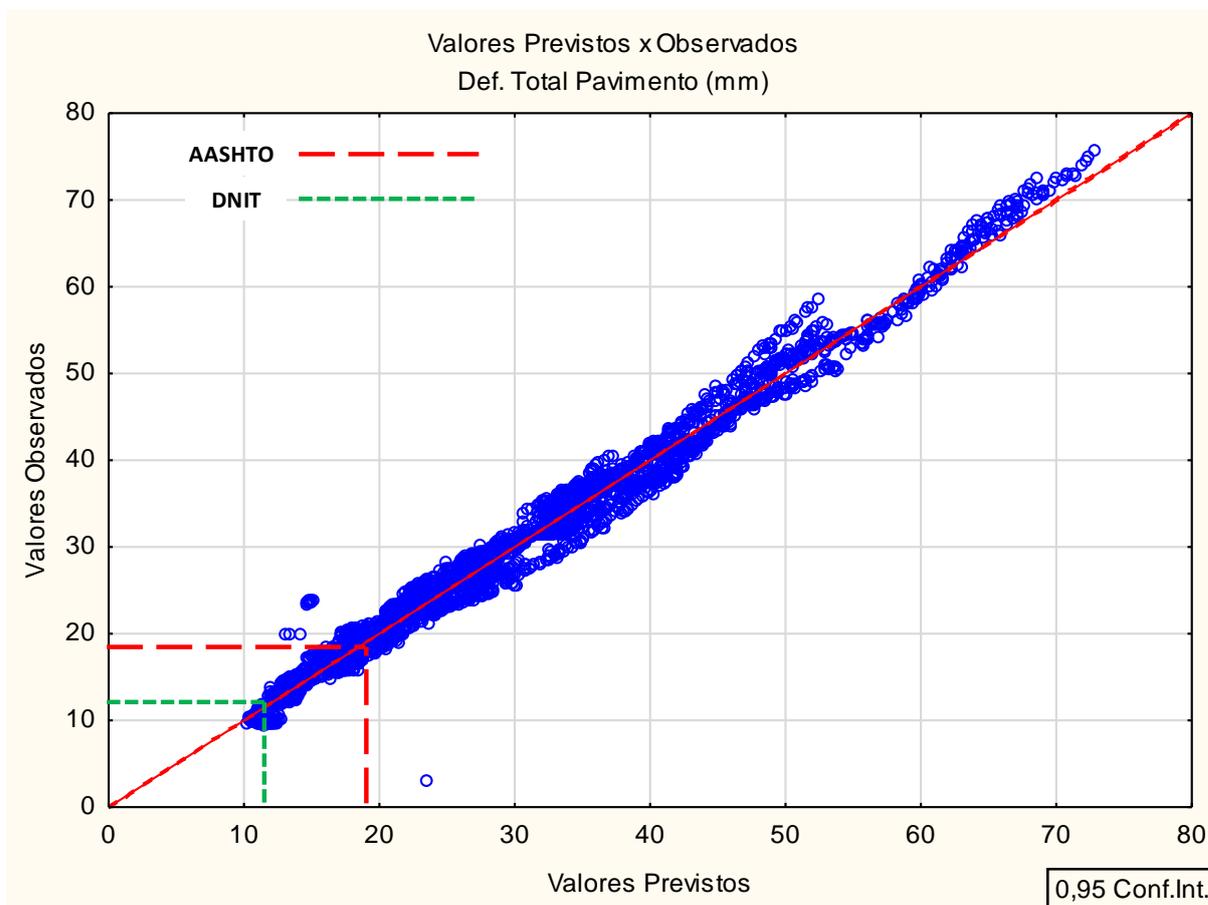
Com os valores da Tabela 69, foi construída a equação 34 para determinação da deformação permanente total do pavimento.

$$\begin{aligned}
 Dtp = & 32,8793 + 32,8793E_{bas} \cdot Mr_{sl} + 10,4766N + 10,4766E_{sub}^2 - \\
 & 10,1793E_{rev} - 10,1793E_{sub} \cdot Mr_{bas} - 5,9065Mr_{sl} - 4,943N^2 - 3,2445N \cdot E_{rev} + \\
 & 3,1052E_{rev}^2 + 1,8001E_{rev} \cdot Mr_{bas} + 1,7723E_{rev} \cdot Mr_{sl} - 1,5858Mr_{bas} - 1,4738N \cdot Mr_{sl} - \\
 & 1,0573Mr_{sub} + 1,0355E_{rev} \cdot Mr_{sub} + 0,5801Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} + 0,4871E_{rev} \cdot E_{sub} + \\
 & 0,4337E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sub} + 0,4171E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{sub} - 0,4145E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{bas} - \\
 & 0,3461Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} - 0,3281E_{bas} \cdot Mr_{bas} + 0,3187E_{rev} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - \\
 & 0,3166E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sl} + 0,316E_{rev} \cdot E_{bas} + 0,2755Mr_{sub}^2 - 0,2149E_{rev} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} + \\
 & 0,2068E_{bas} \cdot Mr_{sub} + 0,2068E_{sub} \cdot Mr_{sub} - 0,185N \cdot Mr_{sub} - 0,1649E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sl} - \\
 & 0,1636N \cdot Mr_{bas} - 0,1614E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sub} - 0,1532E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{bas} + \\
 & 0,1504E_{sub} \cdot Mr_{sl} + 0,1219E_{bas} \cdot E_{sub} + 0,1148E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{sl} - 0,0963E_{sub} - \\
 & 0,0948E_{rev} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} - 0,0873E_{bas} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} - 0,0706E_{bas}^2 - \\
 & 0,0622E_{sub} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} - 0,0601E_{bas} + 0,057E_{sub} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,0531N \cdot E_{sub} - \\
 & 0,0426Mr_{bas}^2 + 0,0396E_{bas} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} + 0,0368E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{bas} - \\
 & 0,0352Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} + 0,0314N \cdot E_{bas} + 0,0279E_{bas} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} + \\
 & 0,0221E_{sub} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} + 0,018Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} + 0,0088E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot E_{sub} \quad (34)
 \end{aligned}$$

A Figura 56 demonstra a linearidade e a convergência entre os valores previstos e os obtidos para a deformação total do pavimento, os valores todos envolvidos a reta de ajuste. Sendo que o gráfico que demonstrava os valores apenas com os critérios de desempenho do pavimento mostrou um comportamento semelhante ao do IRI, uma dispersão para os valores no início e final da reta, porém com a interação de mais valores, os resultados se aproximam mais da reta, assim aumentando a confiabilidade dos coeficientes obtidos para formação da equação que descreve o comportamento do pavimento em relação à deformação total do pavimento.

Com as interações os valores apenas ajustaram-se com maior proximidade a reta de ajuste, assim mantendo também os resultados em grande parte dentro da área de aceitabilidade, principalmente pelas recomendações do DNIT, pois pela AASHTO os pavimentos já estariam em sua maioria com deformação excessiva.

Figura 56 - Valores observados x previstos deformação total pavimento (3ª ordem)



Com o acréscimo de mais variáveis para determinação do trincamento do revestimento de baixo para cima passa de R^2 de 0,73 para 0,91; ou seja, com as interações de 2ª e 3ª ordem a precisão na convergência dos valores aumenta em 18%, aumenta significativamente a precisão dos resultados (Tabela 70).

Nos coeficientes obtidos pela regressão linear para o trincamento no revestimento de baixo para cima, verifica-se que as variáveis independentes resultantes - diretas do volume de tráfego, espessuras e módulo de resiliência das camadas do pavimento possuem maior influência no resultado, ou seja, para as interações de 2ª ordem cai a influência e nas de 3ª ordem diminui mais a influência sobre o resultado.

Para o trincamento de baixo para cima continuam sendo os principais fatores que influenciam no aparecimento ou não de trincas no pavimento, o volume de tráfego e a espessura do revestimento, respectivamente.

Tabela 70 – Coeficientes de regressão linear truncamento de baixo-cima revestimento

Regression Summary for Dependent Variable: Trinc. bottom-up Revest.
 R= 0,95843026 R²= 0,91858857 Adjusted R²= 0,91720828
 F(54,3185)=665,51 p<0,0000 Std.Error of estimate: 8,8148

	b	Std. Err. of. b		b	Std. Err. of. b
Intercept	42,9012	0,650526			
N	24,5027	0,199660	E _{sub} xMr _{sub}	-0,8509	0,223176
E _{rev}	-24,2659	0,217466	E _{sub} xMr _{sl}	0,9759	0,182223
E _{bas}	-1,9939	0,198519	Mr _{bas} xMr _{bas}	0,9296	0,328507
E _{sub}	-1,9143	0,194597	Mr _{bas} xMr _{sub}	-0,2023	0,236714
Mr _{bas}	-6,1184	0,198519	Mr _{bas} xMr _{sl}	-0,0699	0,193276
Mr _{sub}	-2,6042	0,198519	Mr _{sub} xMr _{sub}	0,4712	0,328507
Mr _{sl}	-3,7746	0,162090	Mr _{sub} xMr _{sl}	0,1472	0,193276
NxN	-12,2572	0,461796	E _{rev} xE _{bas} xE _{sub}	-0,5419	0,299422
NxE _{rev}	-18,1417	0,261650	E _{rev} xE _{bas} xMr _{bas}	1,5284	0,311649
NxE _{bas}	-0,8405	0,238853	E _{rev} xE _{bas} xMr _{sub}	-0,8300	0,311649
NxE _{sub}	-0,6518	0,229482	E _{rev} xE _{bas} xMr _{sl}	-0,3694	0,254460
NxMr _{bas}	-1,8503	0,238853	E _{rev} xE _{sub} xMr _{bas}	0,1958	0,299422
NxMr _{sub}	-0,9306	0,238853	E _{rev} xE _{sub} xMr _{sub}	0,6236	0,299422
NxMr _{sl}	-1,9879	0,195022	E _{rev} xE _{sub} xMr _{sl}	-0,7036	0,244477
E _{rev} xE _{rev}	-7,6259	0,348434	E _{rev} xMr _{bas} xMr _{sub}	0,2199	0,311649
E _{rev} xE _{bas}	1,8901	0,259307	E _{rev} xMr _{bas} xMr _{sl}	0,2634	0,254460
E _{rev} xE _{sub}	1,5909	0,244477	E _{rev} xMr _{sub} xMr _{sl}	-0,0058	0,254460
E _{rev} xMr _{bas}	6,7359	0,259307	E _{bas} xE _{sub} xMr _{bas}	0,1568	0,273334
E _{rev} xMr _{sub}	2,1968	0,259307	E _{bas} xE _{sub} xMr _{sub}	0,1985	0,273334
E _{rev} xMr _{sl}	0,9234	0,211724	E _{bas} xE _{sub} xMr _{sl}	-0,2458	0,223176
E _{bas} xE _{bas}	-0,0362	0,328507	E _{bas} xMr _{bas} xMr _{sub}	0,0912	0,284495
E _{bas} xE _{sub}	0,4963	0,223176	E _{bas} xMr _{bas} xMr _{sl}	0,0864	0,232289
E _{bas} xMr _{bas}	-1,4999	0,236714	E _{bas} xMr _{sub} xMr _{sl}	0,0383	0,232289
E _{bas} xMr _{sub}	0,8026	0,236714	E _{sub} xMr _{bas} xMr _{sub}	-0,1428	0,273334
E _{bas} xMr _{sl}	0,4731	0,193276	E _{sub} xMr _{bas} xMr _{sl}	0,0221	0,223176
E _{sub} xE _{sub}	0,0996	0,455894	E _{sub} xMr _{sub} xMr _{sl}	0,1684	0,223176
E _{sub} xMr _{bas}	-0,1625	0,223176	Mr _{bas} xMr _{sub} xMr _{sl}	0,0189	0,232289

Nos casos onde as variáveis com interações de 3^a ordem ainda causam influências significativas, segundo a análise estatística é onde a variável independente da espessura do revestimento está envolvida, ou seja, confirmando a importância que a espessura do revestimento representa para o pavimento.

Com os valores da Tabela 70, foi construída a equação 35 para determinação do trincamento de baixo para cima no revestimento.

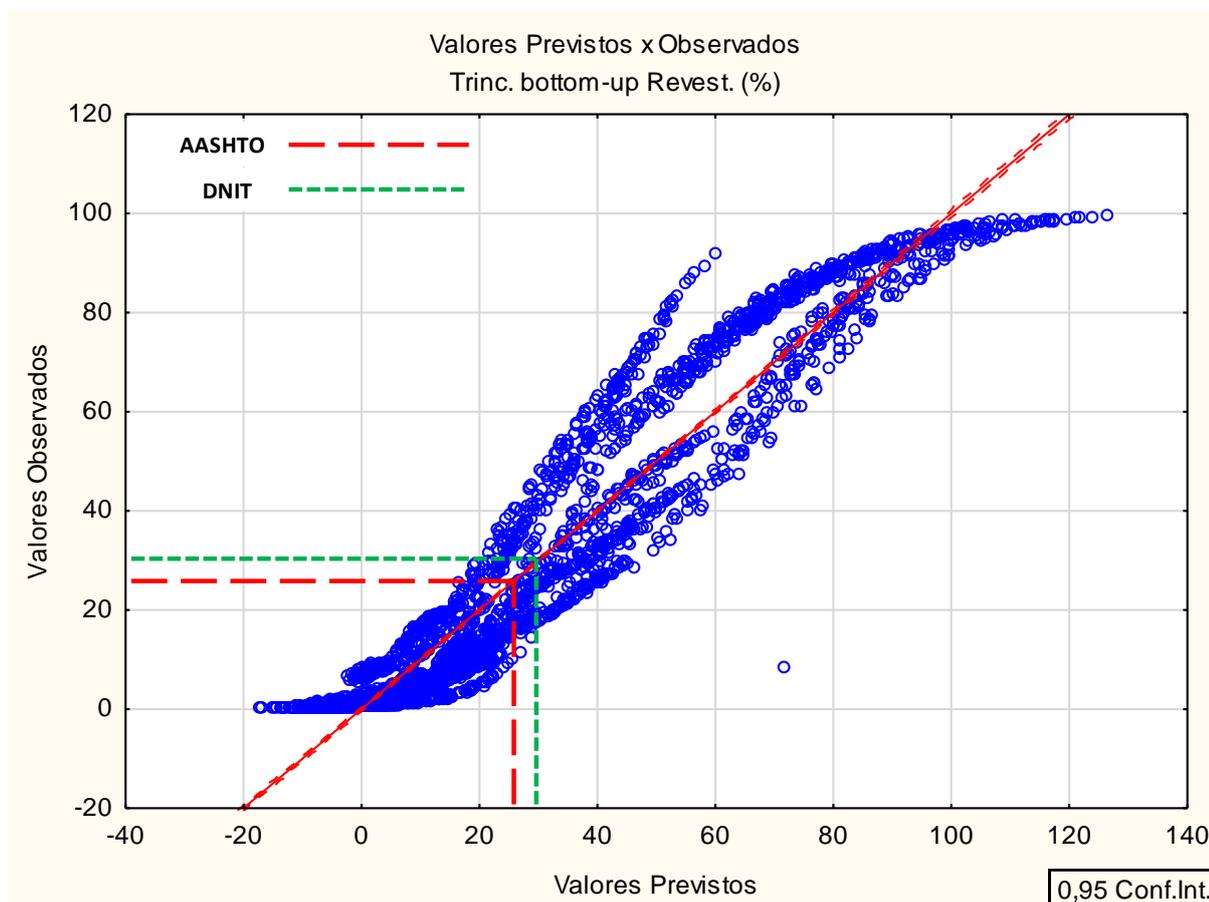
$$\begin{aligned}
Tbc = & 42,9012 + 24,5027N - 24,2659E_{rev} - 18,1417N \cdot E_{rev} - 12,2572N^2 - \\
& 7,6259E_{rev}^2 + 6,7359E_{rev} \cdot Mr_{bas} - 6,1184Mr_{bas} - 3,7746Mr_{sl} - 2,6042Mr_{sub} + \\
& 2,1968E_{rev} \cdot Mr_{sub} - 1,9939E_{bas} - 1,9879N \cdot Mr_{sl} - 1,9143E_{sub} + 1,8901E_{rev} \cdot E_{bas} - \\
& 1,8503N \cdot Mr_{bas} + 1,5909E_{rev} \cdot E_{sub} + 1,5284E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{bas} - 1,4999E_{bas} \cdot Mr_{bas} + \\
& 0,9759E_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,9306N \cdot Mr_{sub} + 0,9296Mr_{bas}^2 + 0,9234E_{rev} \cdot Mr_{sl} - \\
& 0,8509E_{sub} \cdot Mr_{sub} - 0,8405N \cdot E_{bas} - 0,83E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{sub} + 0,8026E_{bas} \cdot Mr_{sub} - \\
& 0,704E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,6518N \cdot E_{sub} + 0,6236E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sub} - \\
& 0,5419E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot E_{sub} + 0,4963E_{bas} \cdot E_{sub} + 0,4731E_{bas} \cdot Mr_{sl} + 0,4712Mr_{sub}^2 - \\
& 0,3694E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{sl} + 0,2634E_{rev} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} - 0,246E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sl} + \\
& 0,2199E_{rev} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} - 0,202Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} - 0,1985E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sub} + \\
& 0,1958E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{bas} + 0,1684E_{sub} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,163E_{sub} \cdot Mr_{bas} + \\
& 0,1568E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{bas} + 0,1472Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,143E_{sub} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} + 0,0996E_{sub}^2 - \\
& 0,0912E_{bas} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} + 0,0864E_{bas} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} - 0,07Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} + \\
& 0,0383E_{bas} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,036E_{bas}^2 + 0,0221E_{sub} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} + \\
& 0,0189Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,006E_{rev} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} \quad (35)
\end{aligned}$$

Na Figura 57 está demonstrada à aproximação dos valores para reta de ajuste, no entanto, é possível perceber a existência de uma pequena dispersão nos valores próximos aos valores centrais.

No entanto, os valores avaliados ficam cerca de 50% dos valores dentro dos limites previstos pelo DNIT, pois pela AASHTO o pavimento tem grande número com condições não satisfatórias para o surgimento de trincas, mesmo que o gráfico apresente uma condensação de valor próximo aos dados iniciais.

Nas Figuras 56 e 57, é possível verificar a existência de, em cada caso, um ponto disperso do restante dos pontos, isto pode ser devido a algum problema de avaliação que o software possa ter realizado, bem como, alguma informação descrita de forma equivocada, no entanto, estes pontos não podem ser considerados como influenciadores visto que a nuvem de dados envolvidos nesta avaliação com interações de 3ª ordem são de 246240 pontos.

Figura 57 - Valores observados x previstos trincamento revestimento de baixo para cima (3ª ordem)



No trincamento do revestimento de cima para baixo, com a interação das variáveis em 2ª e 3ª ordem o valor de R^2 variou de 0,40 para 0,85; ou seja, com essa avaliação dos critérios de desempenho, ocorre um aumento em mais de 100% de valores convergindo para linearidade, para a equação de ajuste determinada pelo Statistica.

No entanto, a constante da equação linear é de valor bem elevado, gerando cerca de 2 km de trincamento inicial, ou seja, sem levar em consideração o volume de tráfego, espessuras e módulos de resiliência dos materiais que compõem o pavimento. Este elevado valor da constante pode ocasionar um significativo fator de erro na convergência dos valores para equação linear que melhor descreve o comportamento do pavimento sobre os critérios de desempenho.

Tabela 71 – Coeficientes de regressão linear trincamento de cima para baixo revestimento

Regression Summary for Dependent Variable: Trinc. top-down Revestimento
R= 0,92417825 R²= 0,85410543 Adjusted R²= 0,85163187
F(54,3185)=345,29 p<0,0000 Std.Error of estimate: 289,43

	b	Std. Err. of. b		b	Std. Err. of. b
Intercept	1788,18	21,35968			
N	533,22	6,55575	$E_{sub} \times Mr_{sub}$	-29,75	7,32788
E_{rev}	-4,33	7,14040	$E_{sub} \times Mr_{sl}$	46,85	5,98319
E_{bas}	-65,41	6,51827	$Mr_{bas} \times Mr_{bas}$	27,25	10,78635
E_{sub}	-89,46	6,38951	$Mr_{bas} \times Mr_{sub}$	-8,23	7,77239
Mr_{bas}	-153,89	6,51827	$Mr_{bas} \times Mr_{sl}$	5,83	6,34613
Mr_{sub}	-81,65	6,51827	$Mr_{sub} \times Mr_{sub}$	13,30	10,78635
Mr_{sl}	122,97	5,32214	$Mr_{sub} \times Mr_{sl}$	14,60	6,34613
$N \times N$	-427,88	15,16285	$E_{rev} \times E_{bas} \times E_{sub}$	-11,18	9,83139
$N \times E_{rev}$	46,13	8,59114	$E_{rev} \times E_{bas} \times Mr_{bas}$	-8,15	10,23283
$N \times E_{bas}$	1,39	7,84260	$E_{rev} \times E_{bas} \times Mr_{sub}$	-9,56	10,23283
$N \times E_{sub}$	3,27	7,53493	$E_{rev} \times E_{bas} \times Mr_{sl}$	-22,58	8,35507
$N \times Mr_{bas}$	-24,35	7,84260	$E_{rev} \times E_{sub} \times Mr_{bas}$	-5,66	9,83139
$N \times Mr_{sub}$	18,17	7,84260	$E_{rev} \times E_{sub} \times Mr_{sub}$	-23,39	9,83139
$N \times Mr_{sl}$	81,71	6,40346	$E_{rev} \times E_{sub} \times Mr_{sl}$	-21,48	8,02729
$E_{rev} \times E_{rev}$	-1029,80	11,44065	$E_{rev} \times Mr_{bas} \times Mr_{sub}$	-6,68	10,23283
$E_{rev} \times E_{bas}$	-0,76	8,51423	$E_{rev} \times Mr_{bas} \times Mr_{sl}$	-9,27	8,35507
$E_{rev} \times E_{sub}$	-5,83	8,02729	$E_{rev} \times Mr_{sub} \times Mr_{sl}$	-23,22	8,35507
$E_{rev} \times Mr_{bas}$	59,23	8,51423	$E_{bas} \times E_{sub} \times Mr_{bas}$	2,88	8,97479
$E_{rev} \times Mr_{sub}$	-8,81	8,51423	$E_{bas} \times E_{sub} \times Mr_{sub}$	5,25	8,97479
$E_{rev} \times Mr_{sl}$	135,44	6,95184	$E_{bas} \times E_{sub} \times Mr_{sl}$	-17,62	7,32788
$E_{bas} \times E_{bas}$	-6,69	10,78635	$E_{bas} \times Mr_{bas} \times Mr_{sub}$	3,55	9,34125
$E_{bas} \times E_{sub}$	22,75	7,32788	$E_{bas} \times Mr_{bas} \times Mr_{sl}$	8,39	7,62710
$E_{bas} \times Mr_{bas}$	-44,71	7,77239	$E_{bas} \times Mr_{sub} \times Mr_{sl}$	-6,27	7,62710
$E_{bas} \times Mr_{sub}$	22,94	7,77239	$E_{sub} \times Mr_{bas} \times Mr_{sub}$	-10,32	8,97479
$E_{bas} \times Mr_{sl}$	28,44	6,34613	$E_{sub} \times Mr_{bas} \times Mr_{sl}$	1,02	7,32788
$E_{sub} \times E_{sub}$	-1,70	14,96905	$E_{sub} \times Mr_{sub} \times Mr_{sl}$	2,09	7,32788
$E_{sub} \times Mr_{bas}$	-9,07	7,32788	$Mr_{bas} \times Mr_{sub} \times Mr_{sl}$	-0,60	7,62710

Devido aos valores não terem uma convergência significativa, é possível observar que o valor da espessura do revestimento não é significativo para inibir o desenvolvimento de trincas do tipo *top-down*, no entanto, os efeitos de 2ª ordem da espessura do revestimento apresentam maior influência para evitar as trincas.

Com os valores da Tabela 71, foi construída a equação 36 para determinação do trincamento de cima para baixo no revestimento.

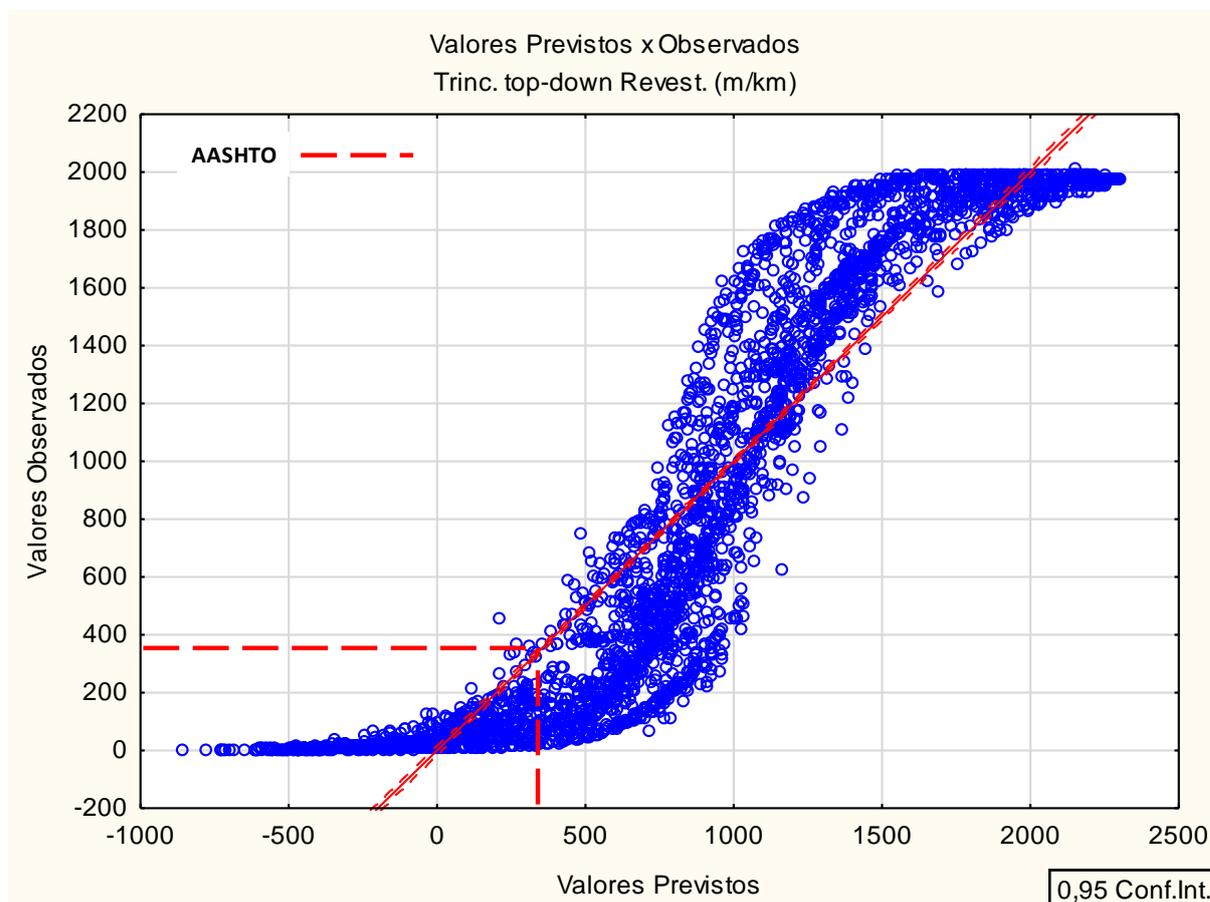
$$\begin{aligned}
Tcb = & 1788,18 - 1029,8E_{rev}^2 + 533,22N - 427,88N^2 - 153,89Mr_{bas} + \\
& 135,44E_{rev} \cdot Mr_{sl} + 122,97Mr_{sl} - 89,46E_{sub} + 81,71N \cdot Mr_{sl} - 81,65Mr_{sub} - 65,41E_{bas} + \\
& 59,23E_{rev} \cdot Mr_{bas} + 46,85E_{sub} \cdot Mr_{sl} + 46,13N \cdot E_{rev} - 44,71E_{bas} \cdot Mr_{bas} - \\
& 29,75E_{sub} \cdot Mr_{sub} + 28,44E_{bas} \cdot Mr_{sl} + 27,25Mr_{bas}^2 - 24,35N \cdot Mr_{bas} - \\
& 23,39E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sub} - 23,22E_{rev} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} + 22,94E_{bas} \cdot Mr_{sub} + 22,75E_{bas} \cdot E_{sub} - \\
& 22,58E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{sl} - 21,48E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sl} + 18,17N \cdot Mr_{sub} - 17,62E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sl} + \\
& 14,6Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} + 13,3Mr_{sub}^2 - 11,18E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot E_{sub} - 10,32E_{sub} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} - \\
& 9,56E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{sub} - 9,27E_{rev} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} - 9,07E_{sub} \cdot Mr_{bas} - 8,81E_{rev} \cdot Mr_{sub} + \\
& 8,39E_{bas} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} - 8,23Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} - 8,15E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{bas} - 6,69E_{bas}^2 - \\
& 6,68E_{rev} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} - 6,27E_{bas} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} + 5,83Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} - 5,83E_{rev} \cdot E_{sub} - \\
& 5,66E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{bas} + 5,25E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sub} - 4,33E_{rev} + 3,55E_{bas} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} + \\
& 3,27N \cdot E_{sub} + 2,88E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{bas} + 2,09E_{sub} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - 1,7E_{sub}^2 + 1,39N \cdot E_{bas} + \\
& 1,02E_{sub} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} - 0,76E_{rev} \cdot E_{bas} - 0,6Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} \quad (36)
\end{aligned}$$

Analisando graficamente os valores obtidos pela regressão linear dos valores para o trincamento do revestimento de cima para baixo, verifica-se que a nuvem de valores contidos na Figura 58 é condensada quando avaliado as interações entre as variáveis independentes. Porém, ainda é possível observar que os valores não apresentam um comportamento linear, os valores menores e maiores tem um comportamento constante e nos valores centrais a nuvem se condensou em torno da reta de ajuste, no entanto, ficando em partes sobre a reta e em outra parte abaixo da reta.

Vale lembrar que foi realizada também a tentativa de obter uma equação para o trincamento de cima para baixo no revestimento de forma não linear, com exponencial, no entanto, o ajuste com R^2 mais alto foi ainda na forma linear.

Os casos avaliados estão grande parte fora dos limites de aceitabilidade do pavimento para AASHTO. Pois observado a condensação de valor no topo da nuvem de dados, é possível notar que uma gama de pavimentos obteve valores em torno de 1500 a 2000 m/km de trincamento, um valor bem expressivo.

Figura 58 - Valores observados x previstos trincamento revestimento de cima para baixo (3ª ordem)



A equação da deformação do revestimento formada pelas variáveis independentes de primeira ordem já tinha uma linearidade considerável com R^2 de 0,91 e com a adição das variáveis de 3ª ordem (Tabela 72) passa para R^2 de 0,98.

Com as interações de 2ª e 3ª ordem a equação de ajuste não sofre muitas alterações, visto que os coeficientes com maior relevância para formação da equação são principalmente os valores de 1ª ordem, pois nas interações de 3ª ordem chega-se a valores na casa de 10^{-4} , ou seja, de pequena significância para o resultado final da deformação do revestimento, esta que tem como resultado de saída valores em mm.

Ocorre neste caso uma influência mais significativa nos coeficientes para equação da deformação permanente do revestimento, nas interações de 2ª ordem, porém ainda permanece como causador de ruína o volume de tráfego e a espessura

do revestimento como fator determinante para que não exista deformação excessiva do revestimento.

Tabela 72 – Coeficientes de regressão linear deformação do revestimento

Regression Summary for Dependent Variable: Defor. Revestimento					
R= 0,99319603 R ² = 0,98643836 Adjusted R ² = 0,98620842					
F(54,3185)=4290,2 p<0,0000 Std.Error of estimate: 0,78031					
	b	Std. Err. of. b		b	Std. Err. of. b
Intercept	13,35184	0,057587			
N	7,20617	0,017675	$E_{sub} \times Mr_{sub}$	0,00286	0,019756
E_{rev}	-3,77594	0,019251	$E_{sub} \times Mr_{sl}$	0,01231	0,016131
E_{bas}	0,12137	0,017574	$Mr_{bas} \times Mr_{bas}$	0,04387	0,029081
E_{sub}	-0,02367	0,017226	$Mr_{bas} \times Mr_{sub}$	0,01399	0,020955
Mr_{bas}	-0,05402	0,017574	$Mr_{bas} \times Mr_{sl}$	-0,00297	0,017110
Mr_{sub}	-0,02203	0,017574	$Mr_{sub} \times Mr_{sub}$	0,00077	0,029081
Mr_{sl}	-0,22686	0,014349	$Mr_{sub} \times Mr_{sl}$	0,00506	0,017110
$N \times N$	-2,93588	0,040880	$E_{rev} \times E_{bas} \times E_{sub}$	-0,05324	0,026506
$N \times E_{rev}$	-2,28519	0,023162	$E_{rev} \times E_{bas} \times Mr_{bas}$	0,12312	0,027588
$N \times E_{bas}$	0,06604	0,021144	$E_{rev} \times E_{bas} \times Mr_{sub}$	-0,07418	0,027588
$N \times E_{sub}$	0,00391	0,020315	$E_{rev} \times E_{bas} \times Mr_{sl}$	-0,04574	0,022526
$N \times Mr_{bas}$	0,02180	0,021144	$E_{rev} \times E_{sub} \times Mr_{bas}$	0,00407	0,026506
$N \times Mr_{sub}$	0,00631	0,021144	$E_{rev} \times E_{sub} \times Mr_{sub}$	0,08381	0,026506
$N \times Mr_{sl}$	-0,09424	0,017264	$E_{rev} \times E_{sub} \times Mr_{sl}$	-0,10305	0,021642
$E_{rev} \times E_{rev}$	0,88794	0,030845	$E_{rev} \times Mr_{bas} \times Mr_{sub}$	0,00634	0,027588
$E_{rev} \times E_{bas}$	-0,05746	0,022955	$E_{rev} \times Mr_{bas} \times Mr_{sl}$	0,01739	0,022526
$E_{rev} \times E_{sub}$	0,16396	0,021642	$E_{rev} \times Mr_{sub} \times Mr_{sl}$	-0,01325	0,022526
$E_{rev} \times Mr_{bas}$	0,48402	0,022955	$E_{bas} \times E_{sub} \times Mr_{bas}$	0,00499	0,024197
$E_{rev} \times Mr_{sub}$	0,22667	0,022955	$E_{bas} \times E_{sub} \times Mr_{sub}$	0,00137	0,024197
$E_{rev} \times Mr_{sl}$	0,62395	0,018743	$E_{bas} \times E_{sub} \times Mr_{sl}$	-0,00904	0,019756
$E_{bas} \times E_{bas}$	-0,03385	0,029081	$E_{bas} \times Mr_{bas} \times Mr_{sub}$	-0,00255	0,025185
$E_{bas} \times E_{sub}$	0,01725	0,019756	$E_{bas} \times Mr_{bas} \times Mr_{sl}$	0,00446	0,020563
$E_{bas} \times Mr_{bas}$	-0,00935	0,020955	$E_{bas} \times Mr_{sub} \times Mr_{sl}$	-0,00326	0,020563
$E_{bas} \times Mr_{sub}$	0,02423	0,020955	$E_{sub} \times Mr_{bas} \times Mr_{sub}$	0,00624	0,024197
$E_{bas} \times Mr_{sl}$	28,44	6,34613	$E_{sub} \times Mr_{bas} \times Mr_{sl}$	0,00156	0,019756
$E_{sub} \times E_{sub}$	-1,70	14,96905	$E_{sub} \times Mr_{sub} \times Mr_{sl}$	-0,00015	0,019756
$E_{sub} \times Mr_{bas}$	-9,07	7,32788	$Mr_{bas} \times Mr_{sub} \times Mr_{sl}$	0,01149	0,020563

Com os valores da Tabela 72, foi construída a equação 37 para determinação da deformação permanente do revestimento.

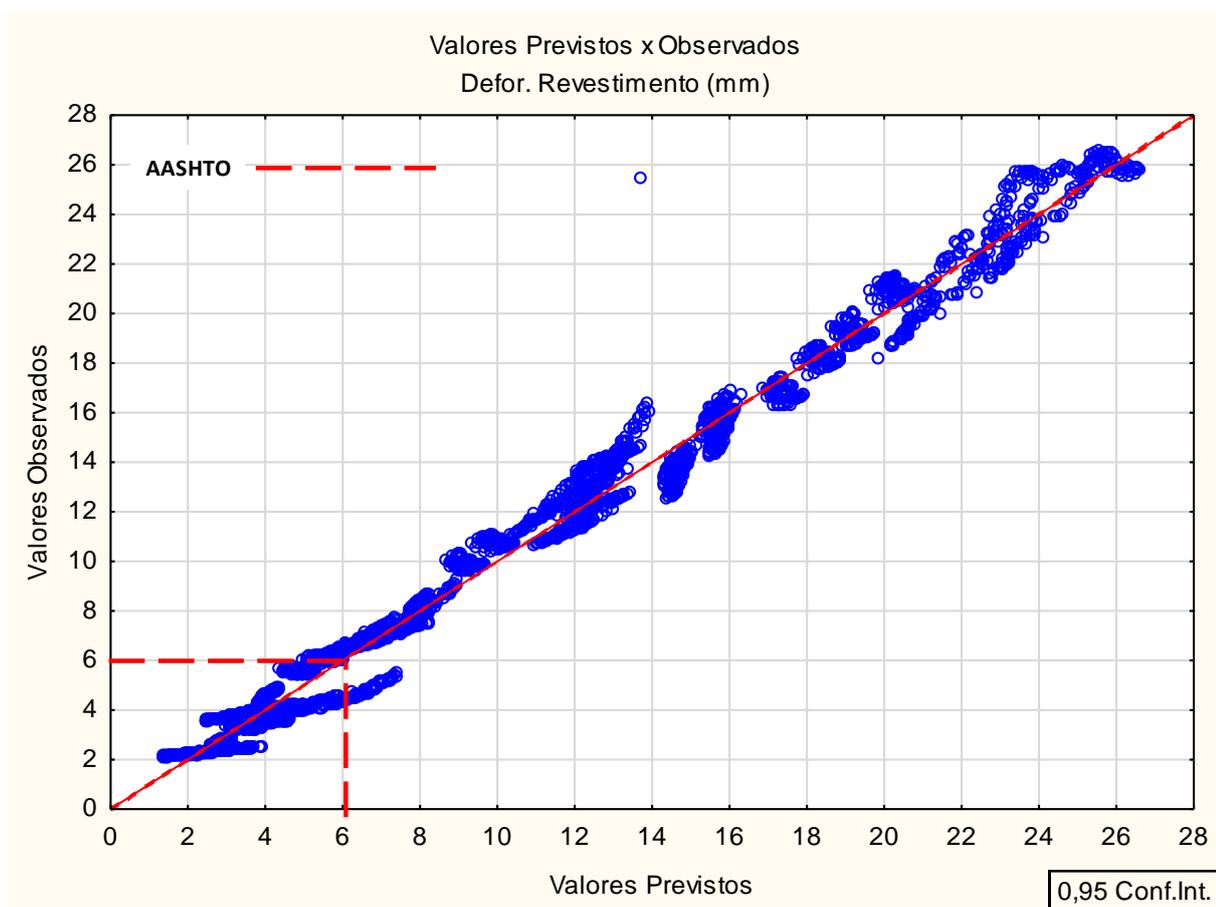
$$\begin{aligned}
Dpr = & 28,44E_{bas} \cdot Mr_{sl} + 13,3518 - 9,07E_{sub} \cdot Mr_{bas} + 7,20617N - \\
& 3,77594E_{rev} - 2,93588N^2 - 2,28519N \cdot E_{rev} - 1,7E_{sub}^2 + 0,88794E_{rev}^2 + \\
& 0,62395E_{rev} \cdot Mr_{sl} + 0,48402E_{rev} \cdot Mr_{bas} - 0,22686Mr_{sl} + 0,22667E_{rev} \cdot Mr_{sub} + \\
& 0,16396E_{rev} \cdot E_{sub} + 0,12312E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{bas} + 0,12137E_{bas} - 0,10305E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sl} - \\
& 0,09424N \cdot Mr_{sl} + 0,08381E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sub} - 0,07418E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{sub} + \\
& 0,06604N \cdot E_{bas} - 0,05746E_{rev} \cdot E_{bas} - 0,05402Mr_{bas} - 0,05324E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot E_{sub} - \\
& 0,04574E_{rev} \cdot E_{bas} \cdot Mr_{sl} + 0,04387Mr_{bas}^2 - 0,03385E_{bas}^2 + 0,02423E_{bas} \cdot Mr_{sub} - \\
& 0,02367E_{sub} - 0,02203Mr_{sub} + 0,0218N \cdot Mr_{bas} + 0,01739E_{rev} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} + \\
& 0,01725E_{bas} \cdot E_{sub} + 0,01399Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} - 0,01325E_{rev} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} + \\
& 0,01231E_{sub} \cdot Mr_{sl} + 0,01149Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,00935E_{bas} \cdot Mr_{bas} - \\
& 0,00904E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sl} + 0,00634E_{rev} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} + 0,00631N \cdot Mr_{sub} + \\
& 0,00624E_{sub} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} + 0,00506Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} + 0,00499E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{bas} + \\
& 0,00446E_{bas} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} + 0,00407E_{rev} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{bas} + 0,00391N \cdot E_{sub} - \\
& 0,00326E_{bas} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} - 0,00297Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} + 0,00286E_{sub} \cdot Mr_{sub} - \\
& 0,00255E_{bas} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sub} + 0,00156E_{sub} \cdot Mr_{bas} \cdot Mr_{sl} + 0,00137E_{bas} \cdot E_{sub} \cdot Mr_{sub} + \\
& 0,00077Mr_{sub}^2 - 0,00015E_{sub} \cdot Mr_{sub} \cdot Mr_{sl} \quad (37)
\end{aligned}$$

Com os resultados mais próximos da reta de ajuste, a dispersão dos resultados diminui, ocasionando uma estimativa de erro para deformação do revestimento baixa.

Em relação aos valores mostrados no gráfico com as variáveis de 1ª ordem, a deformação no revestimento, apresenta linearidade nos resultados, porém em intervalos pontuais, diferentemente do que aconteceu com os valores para resultados com interações de 2ª e 3ª ordem mostrados na figura 60. Os valores ficam mais lineares e também mais distribuídos ao longo da reta de ajuste.

No entanto, os resultados observados ficam com uma quantidade mais significativa de valores fora dos limites preconizados pela AASHTO, porém existe uma concentração de valores dentro destes limites, entretanto, a equação que descreve a deformação permanente do revestimento pode ser utilizada com boa convergência dos valores.

Figura 59 - Valores observados x previstos deformação revestimento



O quadro 7 traz um resumo das 5 primeiras variáveis que mais influenciam na determinação do valor de cada critério de desempenho, levando em consideração todas as interações entre as variáveis.

Quadro 7 - Variáveis com maior influência nos critérios de desempenho

Ordem de importância	(IRI) Irregularidade	(Dtp) Deformação Pavimento	(Tbc) Trincamento Bottom-up	(Tcb) Trincamento Top-down	(Dpr) Deformação Revestimento
1º	$+N$	$+E_{bas} \cdot Mr_{sl}$	$+N$	$-E_{rev}^2$	$+E_{bas} \cdot Mr_{sl}$
2º	$-E_{rev}$	$+N$	$-E_{rev}$	$+N$	$-E_{sub} \cdot Mr_{bas}$
3º	$-N^2$	$+E_{sub}^2$	$-N \cdot E_{rev}$	$-N^2$	$+N$
4º	$-N \cdot E_{rev}$	$-E_{rev}$	$-N^2$	$-Mr_{bas}$	$-E_{rev}$
5º	$-Mr_{sl}$	$-E_{sub} \cdot Mr_{bas}$	$-E_{rev}^2$	$+E_{rev} \cdot Mr_{sl}$	$-N^2$

O sinal à frente das variáveis indicam se este causa dano (+), ou seja, auxilia o desenvolvimento da deterioração do pavimento, ou no caso de inibir os mecanismos de deterioração do pavimento (-).

O que pode-se notar, concluir e enfatizar é que o volume de tráfego influencia em todos os critérios como principal ocasionador de deterioração aos pavimentos e o aumento da espessura do revestimento como sendo o principal fator que auxilia a não ocorrência de danos ao pavimento.

O valor de N como sendo o maior causador de danos, é um fato lógico ao se pensar que este é a única variável que está impondo esforços ao pavimento (exceto peso próprio das camadas), porém como as interações que são puramente matemáticas, ainda assim esta variável deixa evidente sua importância.

Da mesma forma, a espessura do revestimento destaca-se e demonstra sua superioridade sobre as demais camadas, isto pode ser evidenciado e afirmado devido ao fato do módulo de resiliência do pavimento ser de grandeza bem superior ao da maior camada de base e sub-base, ou seja, absorve e resiste à grande parte dos esforços impostos ao pavimento.

4.4 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Por meio das análises realizadas fica evidente que o método brasileiro do DNIT está com certa defasagem nas formas de dimensionamento, ou seja, os projetos atuais realizados no país por meio deste método com embasamento empírico não atendem as realidades que hoje constituem nosso tráfego, bem como a capacidade de carga que se desenvolve cada vez mais nos veículos. Pois, já tivemos alterações nos limites de carga e o método do DNIT nada alterou em termos destes carregamentos maiores em pavimentos sem considerações climáticas, pressão de inflação dos pneus, esforços entre eixos, tipos de ligantes, dentre outros.

O Método americano da AASHTO está em seus dimensionamentos prevendo cargas mais elevadas e uma amplitude de características básicas em seus projetos, como aderência entre camadas, compactação das camadas de base, granulometria dos materiais, vazios e teor de ligante, dentre outros. Bem como, tem considerações a respeito do limite de tráfego que pode ser imposto a um pavimento flexível, ou

seja, para determinados casos fica inviável solucionar uma demanda de tráfego por meio de pavimento flexível.

O software SisPavBR baseado em estudos brasileiros também demonstrou que o sistema atual de dimensionamento de pavimentos, precisa ser revisto para auxiliar a melhor elaboração dos projetos. É uma solução de dimensionamento que já está com considerações sobre os materiais e esforços nas camadas do pavimento, bem como demonstra a necessidade de se aumentar a espessura das camadas de revestimento, uma solução já aplicada no método americano.

Os mecanismos de deterioração dos pavimentos também devem ser estudados com maior profundidade, pois pode ser visto que os tipos de trincamento que se desenvolvem primeiro ou com maior intensidade tendem a ser o *top-down*. A solução para este mecanismo é dependente da configuração das camadas de base e sub-base, bem como a rigidez do subleito.

Ou seja, o dimensionamento de pavimentos flexíveis está precisando ser revisto e necessitando de um sistema de dimensionamento mais amplo, onde o projetista possa realizar configurações diversas, assim tendo que fazer uso de uma gama de informações sobre tráfego, solos, materiais, clima e os mecanismos de deterioração que mais afetam os pavimentos, para assim melhor desenvolver uma solução de projeto.

O tráfego atual do país também demonstra pelos sistemas da AASHTO e SisPavBR que os pavimentos flexíveis não podem ser adotados como solução generalizada para os pavimentos das rodovias brasileiras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Entre os dimensionamentos realizados pelo DNIT, SisPavBR e AASHTO, ficou evidente que os métodos empírico-mecanísticos são mais criteriosos, visto que estes métodos levam em consideração, os fatores como clima, módulo de resiliência das camadas, granulometria, dentre outros.

As maiores espessuras de revestimento obtidas para uma confiabilidade de 50% foi de 19,5 cm para N de 10^8 em um subleito de MR de 53 MPa pelo SisPavBR e 40 cm para um volume de tráfego de $7,5 \times 10^7$ com subleito de MR de 53 MPa pelo AASHTO.

Em relação ao método do DNIT o aumento de espessura do revestimento variou entre 32% a 56% para SisPavBR e superior a 200% para AASHTO.

O aumento no custo do pavimento em relação ao dimensionamento pelo DNIT variou entre 4% a pouco mais de 26% para o SisPavBR e aproximadamente 11% a 98% pela AASHTO, quando submetido a N de $1,0 \times 10^8$.

Porém, vale ressaltar que se o pavimento dimensionado pelo DNIT de forma empírica não tiver a durabilidade de 10 anos, o custo de manutenção pode ocasionar em valores mais elevados que a AASHTO e o SisPavBR. Ou seja, verificar os métodos de dimensionamento, refinar os projetos pode apresentar em longo prazo melhor retorno.

A análise dos pavimentos efetuada por meio do SisPavBR apresentou maior vida útil, sendo que estes valores ficaram o dobro ou o triplo e, ainda o tempo de utilização do pavimento em boas condições segundo a avaliação da AASHTO para N de $1,8 \times 10^8$ foi de pouco mais de 1 mês para o subleito com módulo de resiliência de 124 MPa.

Para valores de N elevados a AASHTO e SisPavBR mostraram que o pavimento flexível não ser a melhor solução. E o método do DNIT apresenta boa durabilidade quando submetido a valores de N baixos.

Num comparativo entre AASHTO e o SisPavBR, o método americano mostra-se bem mais criterioso quanto ao desempenho satisfatório de seus pavimentos. Porém, o SisPavBR pode estar mais adequado (calibrado) para as condições

climáticas do Brasil, bem como as propriedades dos solos, visto a classificação dos solos ser direcionada a solos do país (MCT). Ou seja, um ponto de partida para mudanças nos projetos brasileiros.

Nos estudos realizados com o software Statistica utilizando as interações de 2ª e 3ª ordem das variáveis independentes, os valores se agruparam de forma linear ao entorno da reta de ajuste, reduzindo a probabilidade de erros. No entanto, mesmo o trincamento *top-down* tendo refinado seus resultados, os gráficos mostraram certa dispersão nos valores, o que para certas situações pode acabar por conduzir a erros.

As duas variáveis que mostraram maior relevância para determinação dos mecanismos de deterioração dos pavimentos foram o volume de tráfego e espessura do revestimento, aumentando a propagação de ineficiência do pavimento e inibindo a deterioração, respectivamente.

5.2 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

Para os trabalhos futuros fica como sugestão:

- Dimensionamento de pavimentos com alterações nas camadas de base e sub-base;
- Utilizar em alguns casos a aderência entre as camadas do pavimento;
- Trabalhar com valores de pesagem dos veículos, para determinação da sobrecarga;
- Utilizar o software AASHTOWare, com os dados inseridos em sua totalidade por meio de valores de referência regional;
- Fazer uso da versão atualizada do SisPavBR;
- Efetuar um levantamento da durabilidade dos pavimentos brasileiros;
- Testar pavimentos rígidos como solução para os volumes de tráfego;
- Realizar estimativa de custos executivos de pavimentos rígidos;
- Fazer comparativo de vida útil dos pavimentos flexíveis e rígidos;
- Efetuar a previsão de vida útil dos pavimentos com reforço;
- Realizar estudo financeiro dos pavimentos do tempo presente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTOWare Pavement ME Design**. Informativo Software. Disponível em: <http://www.aashtoware.org/Pavement/Pages/default.aspx>. Acessado em 27/04/2015.

_____. **Guide for Design of Pavement Structures**. Washington D. C. American Association of State Highway Transportation Officials, 1993.

_____. **MEPDG-1 Mechanistic Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice**. Washington D. C. American Association of State Highway Transportation Officials, 2008.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Preços de Distribuição de Produtos Asfálticos**. Coordenadoria de Defesa da Concorrência, 2015. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/>. Acessado em: 18/01/2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207**: terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

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

BEZERRA NETO, R. S.; **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)**. Dissertação Mestrado Escola de Engenharia São Carlos. USP, São Carlos, SP, 2004.

BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; SANTOS, Luís Picado. **Pavimentos Rodoviários**. Almedina. Coimbra, Portugal, 2006.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Pesquisa CNT Rodovias 2014**. Relatório Gerencial. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Pesquisas.aspx>. Acessado em: 18/01/2015.

_____. **Pesquisa CNT Rodovias 2015**. Relatório Gerencial. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>. Acessado em: 13/07/2016.

BEVENIDES, S. A. S.; **Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos: Empírico do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Estado do Ceará**. Dissertação Mestrado COPPE. UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

BUENO, L. D. **Determinação do Potencial Destrutivo do Eixo Duplo Direcional no Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFSM, RS, 2014.

COMMITTEE OF TRANSPORT OFFICIALS SOUTH AFRICA – COTTO. **Guidelines for Network Level Measurement of Road Roughness**. V. 1. Cullinan, 2007.

COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de Pavimento Asfáltico: Comparação do Método do DNER com um Método Mecanístico - Empírico aplicada a um trecho**. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP, 2011.

DAROUS, J.; **Estudo Comparativo entre Sistemas de Cálculo de Tensões e Deformações utilizados em Dimensionamento de Pavimentos Novos**. Dissertação Mestrado COPPE. UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Rio de Janeiro, RJ, 1998.

DOMINGOS, P. M. G. **Reforço de Pavimentos Rígidos: Modelação do Comportamento Estrutural**. Instituto Superior Técnico. Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
PRO 009. Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos.
Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

_____. **Manual de Conservação Rodoviária.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

_____. **Manual de Pavimentação.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ, 2006a.

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ, 2006b.

_____. **Sistema de Custos Rodoviários - SICRO 2 – Região Sul.**
Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/sicro/sul>. Acessado em: 18/01/2016.

FATEMI, A.; YANG, T. ***Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials.*** Int. J. Fatigue. V. 20, No. 1, pp. 9-34, 1998.

FERREIRA, Felipe de Almeida. **Análise Do Dimensionamento De Pavimentos Asfálticos Utilizando O Programa SisPavBR.** Trabalho de Conclusão de Curso. Escola Politécnica / UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

FRANCO, F.A.C.P., **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav.** Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

GONÇALVES, F. P. **O Desempenho dos Pavimentos Flexíveis.** UPF. Passo Fundo, RS, 1999.

GUIMARÃES, A. C. R.; SILVA FILHO, J. C. **Considerações Sobre a Previsão das Tensões Admissíveis Atuantes em Camadas Inferiores do Pavimento Ferroviário**. Periódico do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável. UNDB. São Luís, MA, 2014. Disponível em: <http://www.undb.edu.br/ceds/revistadoceds/>. Acessado em: 01/03/2015.

HARTMANN, Diego Arthur. **Análise dos Defeitos e da Irregularidade de Pavimentos Flexíveis a partir do Guia da AASHTO de 2004**. Trabalho de conclusão de curso. UNIJUÍ, Ijuí, RS, 2009.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. Second Edition. Pearson Education, 2004.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, **Dados Meteorológicos**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acessado em: 06/06/2016.

KALOUSH, K. E.; RODEZNO, M. C. **Diretrizes para Implementação do Guia de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos (MEPDG) para a Concessionária NovaDutra**. Relatório para ANTT. ASU. Tempe, AZ, EUA, 2011.

KERN, Camila. **Análise de Tensões Cisalhantes em Pavimentos Asfálticos na Incidência de Trincamento Top-down**. Trabalho de Conclusão de Curso. UNISC. Santa Cruz do Sul, RS, 2014.

KLAMT, R. A. **Influência da Ação do Tráfego no Custo de Construção e Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Dissertação de mestrado PPGEC. UFSM. Santa Maria, RS, 2014.

LASTRAN (Laboratório de Sistemas de Transporte, do Departamento de Engenharia de Produção e Transportes da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul). **A Influência do Tráfego de Composição de Veículos de Carga – CVC's sobre os Pavimentos das Rodovias do Rio Grande**

do Sul. Relatório, v.1. DAER (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem). 2003.

MATTOS, João Rodrigo Guerreiro. **Monitoramento e Análise de Desempenho de Pavimentos Flexíveis da Ampliação da Rodovia BR – 290 / RS – A Implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul**. Tese de doutorado. PPGEC / UFRGS. Porto Alegre, RS, 2014.

MATOS, Gisnári de Fátima Alves. **Estudo do Trincamento Tipo Top-down em Pavimentos Flexíveis através do Método dos Elementos Finitos**. **Dissertação de Mestrado**. PPGMM / UNIJUÍ. Ijuí, RS, 2011.

MEDINA, J.; **Mecânica dos Pavimentos**. Editora UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª Ed. Editora Interciência. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

MOTTA, L.M.G., **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; PINTO, P. R. R. **Afinal porque Pavimentos Novos Estão Rompendo Precocemente? Um Estudo Sobre Causas de Degradações Prematuras na Superfície de Pavimentos Asfálticos**. Palestra CBRC & BRASVIAS. Foz do Iguaçu, PR, 2011.

O'NEILL, M. J. **A Review of Some Cumulative Damage Theories**. A.S.D. Aeronautic Reserarch Laboratory, Structure and Materials, June, 1970.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. **Pavement Design and Materials**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

PELISSON, Nayara Donelli; *et. al.* **Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis.** The Journal of Transport Literature. 20-24, 2015.

PEREIRA, A. M. **Análise crítica dos fatores de equivalência adotados pelo DNER e sua adequação às rodovias de tráfego pesado.** Curitiba, PR: Tese para concurso de Prof. Titular da Universidade Federal do Paraná, ABPv. 1985.

PREGO, Atahualpa Shmidtz da Silva. **A memória da pavimentação no Brasil,** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Pavimentação. 2001.

RIBAS, J. **Parâmetros Elásticos Típicos de Materiais de Pavimentos Flexíveis do Rio Grande do Sul e sua Aplicação em uma Análise de Custo/Benefício.** Dissertação Mestrado PPGEC. UFSM. Santa Maria, RS, 2014.

SALES, E. P.; SOBRINHO, J. J. S.; GONDIM, Y. C. **Pesagens de veículos no Norte e Nordeste – Análises e Recomendações.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 22. Anais... Maceió: Associação Brasileira de Pavimentação / ABPv, 1987.

SÁNCHEZ, L. H.; FERNANDES JR, J. L. **Análise Estrutural de Pavimentos Flexíveis através do Conceito de Confiabilidade e do Método de Elementos Finitos.** CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTES DA ANPET, 29. Ouro Preto: ANPET, MG, 2015.

SANTOS, C. R. G. **Avaliação das Influências do Tipo de Ligante e do Volume de Vazios na Vida de Fadiga de Algumas Misturas Asfálticas.** Dissertação de Mestrado EESC. USP. São Carlos, SP, 2005.

SANTOS, C. R. G. **Dimensionamento e Análise do Ciclo de Vida de Pavimentos Rodoviários: Uma Abordagem Probabilística.** Tese de Doutorado EP. USP. São Paulo, SP, 2011.

SAYERS, M.W.; KARAMIHAS, S.M. ***The Little Book of Profiling. Basis Information About Measuring and Interpreting Road Profiles.*** The regent of the University of Michigan. 1998.

SEVERO, L. E. P. *et. al.* **Utilização de Perfilômetro Laser para a Medida de Irregularidade Longitudinal e do Afundamento em Trilhas de Roda.** 9^o ENACOR. Natal, RS, 2004.

SOUZA, M. L. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. IPR. Rio de Janeiro, RJ, 1981.

STATSOFT SOUTH AMERICA. **Statistica.** Informativo software. Disponível em: <http://www.statsoft.com.br>. Acessado em: 20/05/2016.

WITCZAK, M. W.; MIRZA, M. W. **Development of Global aging System for Short and Long term aging of Asphalt Cements.** In: Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, v. 64, 1995.

YODER, E. J.; WITCZACK, M. W. **Principles of Pavement Design.** Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 1975.