

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

**INFLUÊNCIA DA AÇÃO DO TRÁFEGO NO CUSTO  
DE CONSTRUÇÃO E RESTAURAÇÃO DE  
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Rodrigo André Klamt**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2014**



# **INFLUÊNCIA DA AÇÃO DO TRÁFEGO NO CUSTO DE CONSTRUÇÃO E RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

**Rodrigo André Klamt**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia 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**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2014**

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

Klamt, Rodrigo André  
INFLUÊNCIA DA AÇÃO DO TRÁFEGO NO CUSTO DE CONSTRUÇÃO  
E RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS / Rodrigo André  
Klamt.-2014.  
172 p.; 30cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2014

1. Taxa de Crescimento de Tráfego 2. Dimensionamento  
de Pavimentos 3. Sobrecarga em Veículos Comerciais I.  
Specht, Luciano Pivoto II. Título.

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**INFLUÊNCIA DA AÇÃO DO TRÁFEGO NO CUSTO DE  
CONSTRUÇÃO E RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

elaborado por  
**Rodrigo André Klamt**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

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

---

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

---

**José Leomar Fernandes Jr., Dr. (USP)**

Santa Maria, 16 de dezembro de 2014.



*Dedico este trabalho a Deus que me deu sabedoria e paz de espírito. Aos meus pais, Walter e Marlene, pelo amor, companheirismo e dedicação de toda uma vida. Aos meus irmãos, Rafael e Carlos, pelo apoio. À minha noiva Luciéle, quem eu tanto amo e admiro.*





## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente a Deus pela oportunidade de viver e realizar este mestrado.

Em especial ao meu orientador, Luciano Pivoto Specht, pelo conhecimento, paciência, incentivo, atenção e disponibilidade dedicados durante todo o decorrer do trabalho.

Aos meus pais, pelo carinho, amor, incentivo e companheirismo, sem os quais esse trabalho não teria chegado ao fim.

À minha noiva Luciéle da Silva Knierim, por sua dedicação, paciência e companheirismo.

Aos meus irmãos, Rafael e Carlos, pela torcida e apoio.

Aos meus amigos e colegas de profissão Jaelson Budny e Magnos Baroni pelo companheirismo e apoio incessante prestado durante a realização desta pesquisa.

Ao professor Deividi da Silva Pereira pela participação na banca examinadora e orientações em algumas etapas da pesquisa.

Ao professor José Leomar Fernandes Jr. pela disponibilidade em compartilhar ideias e realizar a avaliação como membro da banca examinadora.

Aos colegas, pelo auxílio, amizade e companheirismo disseminados neste período.

Aos demais professores pelos ensinamentos passados ao longo do mestrado.

A todos os meus amigos e familiares.



## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### **INFLUÊNCIA DA AÇÃO DO TRÁFEGO NO CUSTO DE CONSTRUÇÃO E RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

**AUTOR: RODRIGO ANDRÉ KLAMT**

**ORIENTADOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT**

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 16 de dezembro de 2014.

Sabe-se que o tráfego no Brasil tem aumentado de forma significativa nos últimos anos devido à alta dependência do modo rodoviário. Além disso, os veículos comerciais surgem no mercado com novas configurações, com mais eixos e com maior capacidade de carga, em função também da legislação, que atualmente tolera sobrecarga por eixo de 10%, quando o veículo está dentro dos 5% de limite para o peso bruto total (PBT). Como consequência disso, tem-se um aumento considerável na degradação de nossa malha rodoviária. Neste âmbito, o presente estudo tem por objetivo avaliar efeitos provocados pela ação do tráfego no custo de pavimentos flexíveis, focando em aspectos relacionados a taxa de crescimento e excesso de carga. Assim, a projeção do volume de tráfego durante um dado período de tempo deverá exprimir os índices de crescimento atual da movimentação de cargas, portanto, dos veículos comerciais; procurou-se analisar, também, se tais índices se correlacionam com o PIB e com a venda de caminhões do país. Em outra etapa foi proposto um estudo de caso selecionando uma das praças do estudo para realizar o dimensionamento do pavimento pelo método do DNIT e por métodos empírico-mecanísticos a fim de analisar a influência da sobrecarga em veículos comerciais no dimensionamento e no custo da construção do pavimento. Para o mesmo estudo de caso foi realizado o dimensionamento e cálculo do custo de restauração do pavimento. Dessa forma, com este estudo, concluiu-se que a taxa de crescimento de tráfego real das regiões estudadas estão consideravelmente acima da proposta pelo DNIT, que é de 3,00%. A taxa de crescimento média global do estudo foi de 7,16%. A correlação entre a taxa de crescimento com o PIB e com a venda de caminhões foi fraca. A influência da sobrecarga no número N foi na ordem de 23,11% se comparados os cenários de menor para o maior carregamento. Quanto ao método do DNIT para diferentes valores de CBR de subleito (4%, 10% e 16%) a espessura de revestimento foi a mesma para todos os carregamentos, atingindo o limite superior do método em 12,5cm. Pela análise empírico-mecanística, a que se mostrou mais conservadora foi a comparação dos métodos FHWA x Asphalt Institute, com maiores valores de espessura de revestimento (até 16 cm) em função da fadiga e deformação permanente, apresentando também um maior custo de execução, o qual aumenta quanto maior a sobrecarga em veículos comerciais, sendo a diferença máxima de custo em função do carregamento na ordem de R\$ 158.231,00 (6,18%) por quilômetro de pavimento. Quanto às restaurações, foi possível perceber que o aumento da porcentagem de veículos comerciais e sobrecarga nestes veículos ocasiona diminuição da deflexão admissível e, como consequência, um aumento na espessura de reforço. Verificou-se a necessidade de reforço em todos os cenários de carregamento para todas as deflexões características estudadas. Os maiores valores de espessura de reforço foram para Dc igual a 125 ( $10^{-2}$  mm) com 19 cm. A diferença no custo em função do carregamento foi da ordem de R\$ 51.450,00 (4,95%) por quilômetro de pavimento. A pesquisa permitiu obter parâmetros reais para posteriores intervenções nas rodovias existentes bem como para subsidiar novos projetos de engenharia rodoviária.

**Palavras-chave:** Taxa de Crescimento de Tráfego. Sobrecarga em Veículos Comerciais. Dimensionamento de Pavimentos.



# ABSTRACT

Master's Dissertation  
Civil Environmental Post-Graduation Program  
Federal University of Santa Maria

## THE INFLUENCE OF THE ACTION OF TRAFFIC IN THE COST OF CONSTRUCTION AND RESTORATION IN ASPHALT FLOORING

AUTHOR: RODRIGO ANDRÉ KLAMT

ADVISOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT

Date and Location of Defense: Santa Maria, December 16th, 2014.

It is known that traffic in Brazil has increased significantly in recent years due to high dependence on road transportation. In addition, commercial vehicles come to market with new settings, with more axles and greater cargo capacity; also as a function of legislation, that currently tolerates an overload of 10% per axle, when the vehicle is within the 5% of limit for the total gross weight (TGW). Consequently, there has been a considerable increase in the degradation of our road network. In this context, the present study aims to evaluate effects caused by the action of traffic in the cost of flexible pavements, focusing on aspects related to growth rate and excess load. Thus, the projection of traffic volume during a given period of time should express the current growth rates of cargo, so, the commercial vehicles; and it was also examined, if these indices are correlated with the Brazilian GDP and with the truck sales in the country. In another step, it was proposed a case study by selecting one of the toll plazas of the study to perform the sizing of the pavement by using DNIT method and mechanistic-empirical methods in order to analyze the influence of overloading in commercial vehicles in the design and in the cost of construction of the asphalt floors. For the same case study, it was performed the sizing and the calculation of the cost of paving restoration. Thus, in this study, it was concluded that the real traffic growth rate in the regions investigated are considerably above the one proposed by DNIT, which is 3.00%. The average growth rate of the study was 7.16%. The correlation between the rate of growth, the GDP and the truck sales was weak. The influence of overloading in the number N was in the order of 23.11% if compared the scenarios from the minor to the larger load. As for the DNIT method for different values of subgrade CBR (4%, 10% and 16%) the thickness of coating was the same for all loads, reaching the upper limit of the method in 12.5cm. By the mechanistic-empirical analysis, the one that showed to be more conservative was the comparison of the methods FHWA x Asphalt; with higher coating thickness (up to 16 cm) depending on fatigue and permanent deformation, while setting a higher execution cost, which increases the higher is the overload on commercial vehicles, being the maximum difference of cost depending on the cargo, in the order of R\$ 158,231.00 (6.18%) per kilometer of pavement. As for the restoration, it was possible to realize that the increase in percentage of commercial vehicles and overloading in these vehicles causes a decrease in the allowable deflection and, consequently, an increase in thickness of reinforcement. It was observed a need of strengthen in all scenarios of loading for all characteristic deflections studied. The highest values of reinforcement thickness were for  $D_c$  equal to 125 ( $10^{-2}$ mm) with 19 cm. The difference in the cost in function of the loading was R\$ 51,450.00 (4.95%) per kilometer of pavement. The survey allowed obtain real parameters for subsequent interventions on existing roads; as well as to support new designs of road engineering.

**Keywords:** Traffic Growth Rate. Overload in Commercial Vehicles. Pavements Design.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das rodovias – evolução da malha pavimentada no período de 2009 a 2014 .....	19
Figura 2 - Tipos de eixos de veículos rodoviários de carga brasileiros.....	32
Figura 3 - Corte transversal de um pneu diagonal.....	36
Figura 4 - Corte transversal de um pneu radial .....	36
Figura 5 - Diagrama de dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos.....	61
Figura 6 - (a) campo de tensões de pavimento flexível; (b) campo de tensões de pavimento rígido.....	63
Figura 7 – Tensões, deformações e deslocamentos em um pavimento asfáltico .....	65
Figura 8 - Fluxograma de pesquisa.....	72
Figura 9 - Mapa do Brasil com localização regional das praças de pedágio.....	74
Figura 10 - Mapa de localização das praças P1, P2 e P3.....	74
Figura 11 - Mapa de localização das praças P4, P5 e P6.....	75
Figura 12 - Mapa de localização das praças P7, P8, P9, P10 e P11 .....	75
Figura 13 – Comportamento linear da forma do crescimento de tráfego .....	82
Figura 14 – Espessuras do Pavimento .....	85
Figura 15 – Locais de leitura do $\epsilon_t$ e $\epsilon_v$ .....	90
Figura 16 – Seção tipo rodovia classe I (pavimentos novos) para levantamento de custos .....	92
Figura 17 – Seções transversais A-A e B-B demonstrando a composição das camadas (pavimentos novos).....	93
Figura 18 – Seção tipo rodovia (restaurações) para levantamento de custos .....	93
Figura 19 – Seções transversais A-A e B-B demonstrando a composição das camadas (restaurações).....	93
Figura 20 - Evolução do Fv das praças de pedágio região metropolitana do RS.....	95
Figura 21 – Evolução do Fv das praças de pedágio do RJ e MG .....	96
Figura 22 – Evolução do Fv das praças de pedágio da região sul do RS .....	96
Figura 23 - Evolução do Ff das praças de pedágio região metropolitana do RS.....	98
Figura 24 - Evolução do Ff das praças de pedágio do RJ e MG .....	98
Figura 25 - Evolução do Ff das praças de pedágio da região sul do RS .....	99
Figura 26 - Evolução do número N por ano das praças de pedágio da região metropolitana do RS .....	102
Figura 27 - Evolução do número N por ano das praças de pedágio do RJ e MG.....	103



Figura 28 - Evolução do número N por ano das praças de pedágio da região sul do RS.....	103
Figura 29 - Evolução da taxa de crescimento de tráfego: região metropolitana do RS e DNIT .....	105
Figura 30 - Evolução da taxa de crescimento de tráfego: Estados do RJ e MG e DNIT .....	106
Figura 31 - Evolução da taxa de crescimento de tráfego: região sul do RS e DNIT.....	107
Figura 32 – Variação do tráfego x variação do PIB .....	110
Figura 33 – Variação do tráfego x variação da venda de caminhões .....	110
Figura 34 – Evolução do crescimento de tráfego em função da evolução do PIB e da venda de caminhões .....	111
Figura 35 – Comportamento do VDM, N, Ff, Fv e TC da praça P1 .....	112
Figura 36 – Comportamento do VDM, N, Ff, Fv e TC da praça P7 .....	113
Figura 37 – Comportamento do VDM, N, Ff, Fv e TC da praça P8 .....	113
Figura 38 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon_t$ (FHWA) e $\epsilon_v$ (Asphalt Institute).....	122
Figura 39 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon_t$ (FRANCO) e $\epsilon_v$ (Asphalt Institute) .....	125
Figura 40 – Espessura de revestimento para diferentes metodologias .....	128
Figura 41 – Custo total/km do pavimento – CBR subleito 4% .....	134
Figura 42 – Custo total/km do pavimento – CBR subleito 10% .....	138
Figura 43 – Custo total/km do pavimento – CBR subleito 16% .....	142
Figura 44 – Espessura de reforço para diferentes cenários .....	147
Figura 45 – Custo final por quilômetro das restaurações de pavimentos.....	153

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Excesso de peso por eixo praticado no Brasil .....	30
Quadro 2 – Limites de cargas em alguns países da Europa .....	33
Quadro 3 – Comparação dos limites de cargas do Brasil, com Europa, EUA, Argentina, Austrália e Canadá .....	33
Quadro 4 – Equações do FEC/USACE .....	48
Quadro 5 – Valores da Serventia Atual (VSA) .....	49
Quadro 6 – Resumo da evolução das cargas máximas admissíveis no Brasil.....	55
Quadro 7 – Limites da Resolução n°. 489/2014 da CONTRAN.....	56
Quadro 8 – Limites de cargas no Brasil .....	57
Quadro 9 – Localização e período de série histórica de cada praça de pedágio.....	73
Quadro 10 - Configuração dos veículos por categoria .....	78
Quadro 11 - Fatores de Equivalência de Carga da USACE .....	80
Quadro 12 - Equações dos FEC da AASHTO.....	80
Quadro 13 – Fator de distribuição (Fd) .....	80
Quadro 14 – Características das praças de pedágio em estudo quanto sentido e faixas de tráfego.....	81
Quadro 15 – Cargas e sobrecargas utilizadas no estudo.....	84
Quadro 16 – Cenários considerados para pesquisa .....	84
Quadro 17 – Características dos materiais constituintes do pavimento .....	85
Quadro 18 – Espessura mínima de revestimento betuminoso.....	87
Quadro 19 – Coeficientes estruturais para os componentes do pavimento .....	88
Quadro 20 – Equações e correlações de número N pelo tempo das praças de pedágio .....	104
Quadro 21 - Taxa de crescimento médio das praças, de cada região e global .....	108
Quadro 22 - Número N para os cenários da BR 116.....	115
Quadro 23 – Dimensionamento pavimentos pelo método do DNIT – CBR subleito = 4% ...	116
Quadro 24 – Dimensionamento pavimentos pelo método do DNIT – CBR subleito = 10%.....	117
Quadro 25 – Dimensionamento pavimentos pelo método do DNIT – CBR subleito = 16%.....	118
Quadro 26 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon_t$ (FHWA) e $\epsilon_v$ (Asphalt Institute) – CBR 4%.....	120

Quadro 27 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon t$ (FHWA) e $\epsilon v$ (Asphalt Institute) – CBR 10%.....	121
Quadro 28 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon t$ (FHWA) e $\epsilon v$ (Asphalt Institute) – CBR 16%.....	121
Quadro 29 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon t$ (FRANCO) e $\epsilon v$ (Asphalt Institute) - CBR 4%.....	124
Quadro 30 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon t$ (FRANCO) e $\epsilon v$ (Asphalt Institute) - CBR 10%.....	124
Quadro 31 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon t$ (FRANCO) e $\epsilon v$ (Asphalt Institute) - CBR 16%.....	125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Deflexões médias medidas no pavimento delgado (0,01 mm).....	39
Tabela 2 - Deflexões médias medidas no pavimento espesso (0,01 mm).....	39
Tabela 3 - FEC/USACE – Eixos: simples, tandem-duplos e tandem-triplos .....	47
Tabela 4 – Série histórica de volume de tráfego (2001 – 2007) – Praça Retiro/RS – BR 116. .....	76
Tabela 5 - Série histórica de volume de tráfego (2008 – 2013) – Praça Retiro/RS – BR 116 .....	76
Tabela 6 – Número de eixos considerados em cada categoria .....	79
Tabela 7 – Fator de Veículo (Fv) anual para as rodovias em estudo.....	94
Tabela 8 – Fator de Frota (Ff) anual para as rodovias em estudo .....	97
Tabela 9 – Número N para as praças de pedágio (Eixos com a Carga Máxima Legal) .....	101
Tabela 10 – Número N em função das diferentes taxas de crescimento .....	109
Tabela 11 – NUSACE e NAASHTO para cada um dos cenários .....	119
Tabela 12 – Distâncias médias de transporte para o levantamento de custos .....	128
Tabela 13 – Determinação do custo de transporte de materiais betuminosos .....	129
Tabela 14 – Custos materiais asfálticos – ANP – maio de 2014.....	129
Tabela 15 – Preço unitário final para o concreto asfáltico .....	130
Tabela 16 – Preço unitário final para a pintura de ligação .....	130
Tabela 17 – Preço unitário final para a imprimação.....	131
Tabela 18 – Preço unitário final para a brita graduada simples.....	131
Tabela 19 – Preço unitário final para o macadame seco .....	131
Tabela 20 – Preço unitário final para a camada de bloqueio.....	132
Tabela 21 – Preço unitário final para o tratamento superficial duplo .....	132
Tabela 22 – Preço unitário final para os diferentes serviços .....	132
Tabela 23 – Custo final por quilômetro (CBR = 4%) – Método: DNIT .....	133
Tabela 24 – Custo final por quilômetro (CBR = 4%) – Métodos: FHWA x Asphalt Institute .....	133
Tabela 25 – Custo final por quilômetro (CBR = 4%) – Métodos: FRANCO x Asphalt Institute .....	134
Tabela 26 – Custo final por quilômetro – comparação das três análises (CBR = 4%) .....	136
Tabela 27 – Custo final por quilômetro (CBR = 10%) – Método: DNIT .....	137
Tabela 28 – Custo final por quilômetro (CBR = 10%) – Métodos: FHWA x Asphalt Institute .....	137

Tabela 29 – Custo final por quilômetro (CBR = 10%) – Métodos: FRANCO x Asphalt Institute.....	138
Tabela 30 – Custo final por quilômetro – comparação das três análises (CBR = 10%) .....	140
Tabela 31 – Custo final por quilômetro (CBR = 16%) – Método: DNIT .....	141
Tabela 32 – Custo final por quilômetro (CBR = 16%) – Métodos: FHWA x Asphalt Institute .....	141
Tabela 33 – Custo final por quilômetro (CBR = 16%) – Métodos: FRANCO x Asphalt Institute.....	142
Tabela 34 – Custo final por quilômetro – comparação das três análises (CBR = 16%) .....	144
Tabela 35 – Custo final por quilômetro – FHWA x Asphalt Institute (CBR 4%, 10% e 16%) .....	145
Tabela 36 – Deflexões admissíveis e espessuras de reforço .....	146
Tabela 37 – Distâncias médias de transporte para o levantamento de custos .....	149
Tabela 38 – Determinação do custo de transporte de materiais betuminosos .....	149
Tabela 39 – Custos materiais asfálticos – ANP – maio de 2014.....	150
Tabela 40 – Preço unitário final para os diferentes serviços .....	150
Tabela 41 – Custo final por quilômetro das restaurações de pavimentos – Dc = 50 (0,01mm) .....	151
Tabela 42 – Custo final por quilômetro das restaurações de pavimentos – Dc = 75 (0,01mm) .....	151
Tabela 43 – Custo final por quilômetro das restaurações de pavimentos – Dc = 100 (0,01mm) .....	152
Tabela 44 – Custo final por quilômetro das restaurações de pavimentos – Dc = 125 (0,01mm) .....	152

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

AEMC: Aplicativo de Análise Elástica para Estruturas de Múltiplas Camadas

AET: Autorização Especial de Tráfego

ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ATR: Afundamento na Trilha de Roda

B: Base

BGS: Brita Graduada Simples

BL: Camada de Bloqueio

CA: Concreto Asfáltico

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CAT: Categoria de Veículo

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

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

CDC: Coordenadoria de Defesa da Concorrência

CML: Carga Máxima Legal

CMT: Capacidade Máxima de Tração

CNT: Confederação Nacional do Transporte

CONTRAN: Conselho Nacional de Trânsito

CTB: Código de Trânsito Brasileiro

CVC's: Combinações de Veículos de Carga

Dadm: Deflexão Admissível

Dc: Deflexão Característica

DENATRAN: Departamento Nacional de Trânsito

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

Dp: Deflexão de Projeto

ESAL: Equivalent Standard Axle Load

ESRD: Eixo Simples de Rodas Duplas

ESRS: Eixo Simples de Rodas Simples

ESWL: Equivalent Single Wheel Load

ETD: Eixo Tandem Duplo

ETT: Eixo Tandem Triplo

FEC: Fator de Equivalência de Cargas  
Fc: Fator de Clima  
Fd: Fator de distribuição  
Ff: Fator de frota  
FGV: Fundação Getúlio Vargas  
FHWA: Federal Highway Administration  
Fv: Fator de Veículo  
GEPOIT: Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes  
HRB: Highway Research Board  
h20: Sub-base  
ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços  
IP: Imprimação  
IRI: Índice de Rugosidade Internacional  
ISP: Índice de Serventia Presente  
kN: Quilonewtom  
kPa: Quilopascal  
LASTRAN: Laboratório de Sistemas de Transportes da UFRGS  
Lbs: libras  
LDI: Lucros e Despesas Indiretas  
MEPDG: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide  
MPa: Megapascal  
MR: Módulo de Resiliência  
MS: Macadame Seco  
N: Número N de eixos padrões  
NCHRP: National Cooperative Highway Research Program  
NRC: National Research Council  
PBT: Peso Bruto Total  
PBTC: Peso Bruto Total Combinado  
PIB: Produto Interno Bruto  
PL: Pintura de Ligação  
PMF: Pré-misturado a Frio  
PMQ: Pré-misturado a Quente  
PNLT: Plano Nacional de Logística e Transportes  
PSI: Índice de Serventia Atual  
P1: Praça de Pedágio

R: Revestimento

Rc: Raio de Curvatura

SC: Sobrecarga

SICRO: Sistema de Custos Rodoviários

SL: Subleito

T.C.: Taxa de Crescimento

Ton (t; tf): Tonelada

TSD: Tratamento Superficial Duplo

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USACE: United States Army Corps of Engineers

VCL's: Veículos Combinados Longos

VDM: Volume Médio Diário

VDMA: Volume Médio Diário Anual

VSA: Valor de Serventia Atual

WIM: Weigh In Motion

$\varepsilon$ : Deformação

$\sigma$ : Desvio padrão

$\varepsilon_v$ : Deformação de compressão no topo do subleito

$\varepsilon_t$ : Deformação de tração na fibra inferior do revestimento





## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1 Objetivo geral.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Tráfego rodoviário.....</b>	<b>22</b>
2.1.1 Volume de tráfego .....	22
2.1.2 Tipos de veículos .....	23
2.1.3 Cargas sobre os pavimentos .....	25
2.1.4 Peso bruto total combinado .....	30
2.1.5 Tipos de eixos.....	31
2.1.6 Cargas por eixo .....	32
2.1.7 Tipos de pneus .....	34
2.1.8 Pressão dos pneus .....	36
<b>2.2 Fator de equivalência de cargas .....</b>	<b>41</b>
2.2.1 Fator de equivalência de cargas do corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos (USACE) .....	44
2.2.2 Fator de equivalência de cargas da AASHTO.....	48
<b>2.3 Fator de veículos .....</b>	<b>51</b>
<b>2.4 Cargas máximas legais .....</b>	<b>52</b>
2.4.1 Histórico .....	52
2.4.2 Código de trânsito brasileiro .....	56
<b>2.5 Análise empírico-mecanística de pavimentos flexíveis.....</b>	<b>59</b>
2.5.1 Mecânica dos pavimentos.....	62
2.5.2 Softwares de dimensionamento de pavimentos.....	66
<b>3 MÉTODO DA PESQUISA.....</b>	<b>72</b>
<b>3.1 Planejamento da pesquisa.....</b>	<b>72</b>
<b>3.2 Cálculo do número N.....</b>	<b>77</b>
<b>3.3 Determinação da taxa de crescimento .....</b>	<b>81</b>
<b>3.4 Dimensionamento de pavimentos novos .....</b>	<b>83</b>

3.4.1 Dimensionamento pelo método do DNIT .....	85
3.4.2 Dimensionamento empírico-mecanístico .....	88
<b>3.5 Dimensionamento de restaurações .....</b>	<b>91</b>
<b>3.6 Análise de custos.....</b>	<b>92</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>94</b>
<b>4.1 Cálculo do número N .....</b>	<b>94</b>
<b>4.2 Determinação da taxa de crescimento .....</b>	<b>104</b>
<b>4.3 Dimensionamento de pavimentos novos .....</b>	<b>114</b>
4.3.1 Dimensionamento pelo método do DNIT .....	115
4.3.2 Dimensionamento empírico-mecanístico .....	118
4.3.3 Análise de custos.....	128
<b>4.4 Dimensionamento de restaurações .....</b>	<b>145</b>
4.4.1 Dimensionamento pela PRO 11/79 .....	145
4.4.2 Análise de custos.....	148
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>156</b>
<b>5.1 Conclusões.....</b>	<b>156</b>
5.1.1 Quanto a taxa de crescimento .....	156
5.1.2 Quanto ao dimensionamento de pavimentos novos .....	157
5.1.3 Quanto ao dimensionamento de restaurações .....	159
<b>5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>160</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>162</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Percebe-se, com o passar dos anos, o quanto grande é o crescimento da frota de veículos no Brasil. Em 2000, o país possuía 29.722.950 veículos rodando por suas rodovias, sendo que destes, 1.397.247 eram caminhões. Em dezembro de 2013 o Brasil já possuía 81.600.729 veículos, sendo 2.488.680 caminhões. Portanto, em 13 anos o Brasil teve um aumento de aproximadamente 175% no volume total de veículos e, aproximadamente, 78% mais caminhões nas estradas brasileiras (DENATRAN, 2014).

O transporte desempenha papel essencial dentro da sociedade e é primordial aos serviços básicos de saúde, educação, energia, alimentação, entre outros. Segundo o Ministério dos Transportes (2007), pelo Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT), 58% do transporte de carga no Brasil é realizado por rodovias. No país, o transporte rodoviário se consolidou na década de 50, época na qual a expansão automobilista estava em alta e os preços dos combustíveis eram baixos.

Atualmente há um agravamento no transporte de carga por rodovias, o qual se tornou desproporcional aos demais modais. Dada a importância do modal rodoviário para o crescimento econômico brasileiro, a construção e a conservação (manutenção) da malha rodoviária se tornam primordiais. Dessa forma, o Governo Federal vem intensificando os projetos de construção de malhas rodoviárias a fim de atender a grande demanda do transporte de carga.

Mesmo que maior parte do transporte de carga passe pelas rodovias brasileiras, o país apresenta um complexo problema em sua malha viária. Segundo a Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2014a), conforme figura 1, indicações gerais mostram que, no ano de 2014, 49,9% das rodovias do país estão classificadas como: regulares, ruins ou péssimas. A mesma fonte (Figura 1) apresenta a classificação das rodovias com o passar dos anos, de 2009 até 2014, e demonstra que nos últimos anos o somatório da classificação das rodovias em estado péssimo, ruim e regular ficou entre 45,9% e 54,2%.

Outro aspecto importante que diz respeito às rodovias são os acidentes que estão diretamente relacionados à qualidade da via, considerando ou não a imprudência dos motoristas. A CNT (2014b) divulgou que quase 190 mil acidentes ocorreram no ano de 2013 nas rodovias federais policiadas, havendo mais de 8,5 mil vítimas fatais. Os custos com estes acidentes no ano estudado foram de R\$ 17,7 bilhões, um valor alto que se aplicado na conservação das rodovias, poderia apresentar diminuição no número de vítimas.

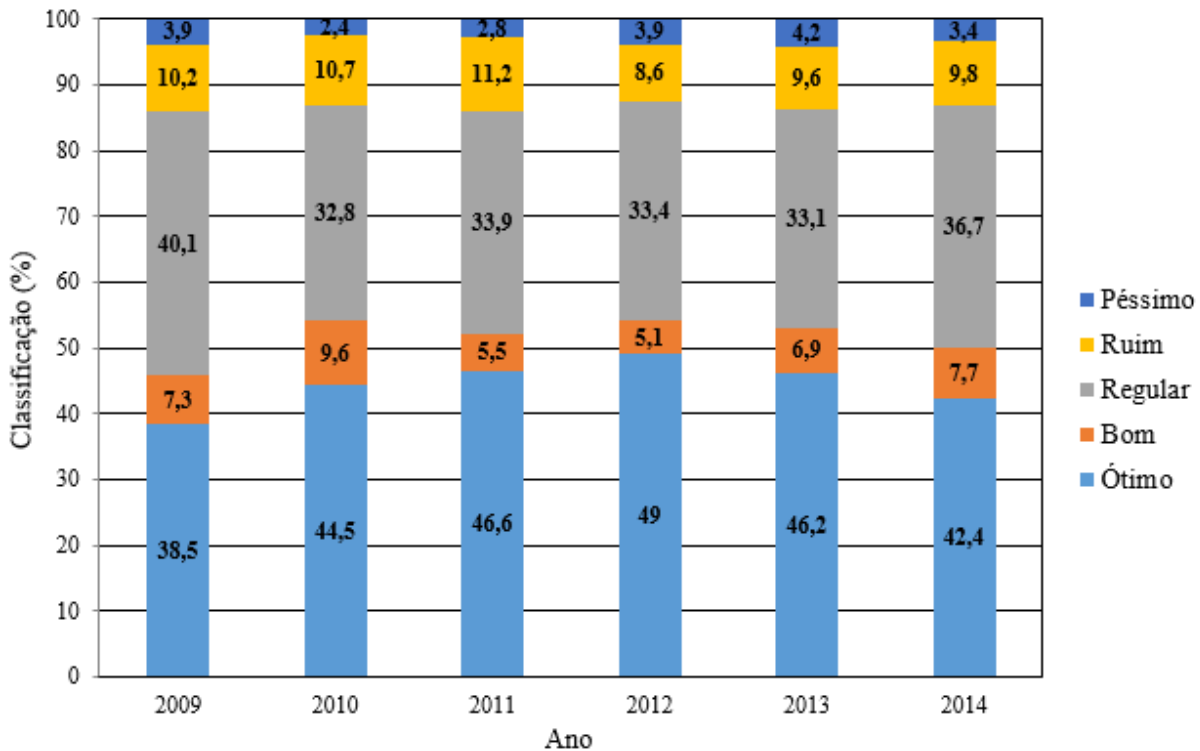


Figura 1 – Classificação das rodovias – evolução da malha pavimentada no período de 2009 a 2014

Fonte: CNT, 2014a

O estado precário das rodovias e a falta de manutenção adequada da rede estão a exigir uma conscientização maior, principalmente, das autoridades. A manutenção da malha rodoviária brasileira custa para os cofres públicos muitos bilhões de reais anualmente e causam grandes problemas para o tráfego. Porém, os recursos investidos na ampliação e conservação da rede rodoviária não têm retornado na forma de rodovias confortáveis e seguras à população em geral (SHIOTSUKI, 2009).

O significativo aumento de veículos, aliado ao excesso de peso dos eixos rodoviários, vêm impondo severas dificuldades à manutenção das vias de tráfego, elevando os custos decorrentes de sua conservação. Logo, como consequência, tem-se agravado a deterioração das rodovias, que são causas dos esforços não previstos no dimensionamento de pavimentos e de seus complementos, as obras de artes especiais (pontes e viadutos).

Ligado a todos os fatores já mencionados, um fato a ser analisado no Brasil é a taxa de crescimento de tráfego de 3,00% proposta pelo DNIT (2006) para projeto de pavimentos. Essa taxa pode não representar a realidade encontrada em nosso país. A rápida deterioração dos pavimentos pode estar relacionada, também, a este fator, já que quanto maior o tráfego, mais severa será a solicitação do sobre o pavimento.

Estudos vêm apoiando a busca de estruturas de prevenção eficientes, antevendo um comportamento adequado para as inúmeras solicitações de tráfego, tendendo a substituir a base empírica pela empírico-mecanística, baseado em espectros de carga por eixo. Segundo Fontenele (2011), o método empírico-mecanístico é de grande importância, pois se trata de um sistema de gerência de pavimentos para prever a evolução da condição ao longo do tempo e/ou tráfego acumulado, o que tende a real situação encontrada em campo.

Franco (2007) afirma que a necessidade da modelagem mecânica-empírica vem da busca constante de se melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural, de modo a utilizar materiais, sobre cujo desempenho de campo ainda não se têm experiência suficiente, e considerar, também, os efeitos das condições ambientais e de tráfego, diferentes daquelas para as quais os métodos semi-empíricos, ainda utilizados no país.

O estudo da evolução do tráfego, bem como da interação entre o veículo rodoviário de carga e o pavimento e a consequente diminuição da degradação dos pavimentos foram condições estimulantes e motivadoras na escolha deste assunto e desenvolvimento desta dissertação.

### **1.1 Objetivo geral**

A pesquisa tem como objetivo avaliar efeitos provocados pela ação do tráfego no custo de pavimentos flexíveis, focando em aspectos relacionados a taxa de crescimento e excesso de carga.

### **1.2 Objetivos específicos**

O estudo tem como principais especificidades às citadas a seguir:

- Determinar as taxas de crescimento anuais de tráfego de rodovias do Brasil, a partir de amostragens de tráfego;
- Avaliar o impacto da taxa de crescimento no custo e em projetos de restaurações e novos pavimentos;
- Avaliar o impacto da sobrecarga em veículos comerciais no custo e em projetos de restaurações e novos pavimentos.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Tráfego rodoviário

O tráfego rodoviário é formado por veículos de diferentes configurações e magnitudes de cargas. O conhecimento adequado de suas características é muito importante para o estudo do comportamento de pavimentos, tanto rígidos como flexíveis, e os danos causados a essa estrutura. Essas informações podem contribuir também para a interpretação das causas da deterioração dos pavimentos, ilustrando as tendências gerais das propagações de defeitos tipicamente causados pela ação do tráfego. Portanto, abordar-se-á aqui os veículos comerciais que circulam nas rodovias, bem como a ação da carga que os mesmos provocam nos pavimentos.

#### 2.1.1 Volume de tráfego

Segundo Fontenele (2011), o volume de tráfego é definido como “o número de veículos que atravessam uma determinada seção transversal de uma via numa unidade de tempo” e para sua determinação é essencial conhecer a composição do tráfego, ou seja, a proporção de cada tipo de veículo na corrente de tráfego visto a diferença existente entre as configurações dos caminhões e ônibus.

O Volume Diário Médio (VDM) geralmente é obtido com base no cálculo de 365 dias para considerar toda a variação do tráfego, em termos semanais e mensais, que utiliza a via englobando todos os veículos em ambos os sentidos desta. Este volume é então definido como VDM anual (VDMA). A melhor maneira de quantificar os volumes de veículos é através das contagens em campo (contagens classificatórias e volumétricas), mas apenas quando as vias já existem. Tais contagens são realizadas, geralmente, em períodos de sete dias, durante 24 horas, com uso de equipamentos automatizados instalados na pista ou simplesmente de forma visual com registro em formulário específico (DNIT, 2006).

Atualmente, além de contagens manuais, há métodos para realização de contagens automatizadas. Nos equipamentos utilizados para coletas de dados de carregamentos de tráfego os dados relativos ao volume e à distribuição das cargas de tráfego podem ser obtidos a partir de equipamentos de pesagem em movimento – *Weigh in motion* (WIM).



Em função de o WIM gerar um maior custo de aquisição, além uma maior dificuldade de instalação e operação, outra técnica também tem sido utilizada para coleta dos dados de tráfego, como os sensores dispostos no pavimento. Os sensores que monitoram o tráfego acima ou na lateral da estrada e tem como principal vantagem de não estarem sujeitos ao impacto das cargas dos veículos ou das tensões resultantes da interação do pavimento-ambiente. Porém esse método traz limitações, sendo a principal a maior dificuldade de detectar e contar os eixos dos veículos (HALLENBECK e WEINBLATT, 2004).

O *Texas Department of Transportation* apoiou uma pesquisa realizada por Harrison et al. (1998) cujo objetivo foi coletar e analisar as informações sobre o tipo predominante de veículo de carga e o valor das cargas por eixo no transporte rodoviário na fronteira México – Texas. Os dados foram coletados por meio do sistema WIM e, constatou-se, que o veículo 3S2 (veículo trator com 3 eixos + semirreboque com 2 eixos) é o predominante na frota de carga e que as quantidades de veículos com excesso de carga foram entre 25% e 30% nos veículos 3S2 e entre 80% e 87% nos veículos 3S3 (veículo trator com 3 eixos + semirreboque com 3 eixos).

Devidos aos altos valores de excesso de carga, o *Texas Department Transportation* confinou o tráfego dos veículos 3S3 a estradas de uma determinada região e iniciou aplicação de multas, reduzindo assim, em pouco tempo, a níveis mínimos de sobrecarga.

### 2.1.2 Tipos de veículos

Pelo fato da pesquisa estar relacionada com a análise dos efeitos sobre os pavimentos através dos espectros de carga por eixo dos veículos de carga, apresenta-se a classificação de veículos brasileiros, em função do local do estudo, e dos veículos americanos, em função da origem do método da AASHTO (2002).

De acordo com DNIT (2005) são cinco os tipos básicos de veículos para efeito de projeto viário:

- Veículo de passageiros (VP): representa os veículos leves, similares em termos geométricos e operacionais como o automóvel, incluem-se nessa classificação vans, utilitários, pick-ups e similares;
- Veículo comercial rígido (CO): são os veículos não articulados compostos por uma unidade tratora simples, abrangendo os caminhões e ônibus convencionais de dois eixos e seis rodas;

- Ônibus de longo percurso (O): este grupo representa os veículos comerciais rígidos de maiores dimensões. Incluem-se neste grupo os ônibus de turismo e caminhões longos, geralmente de três eixos e dimensões superiores ao veículo tipo CO;
- Semirreboques (SR): grupo dos veículos rodoviários de carga articulados, compostos de unidade tratora simples e um semirreboque;
- Reboques (RE): representa os veículos rodoviários de carga com reboque; é composto por uma unidade tratora simples, um semirreboque e um reboque.

O sistema de classificação adotado pelo DNIT (2006) atribui a cada classe de veículo de carga um código alfanumérico. O primeiro algarismo significa o número de eixos do veículo simples ou unidade tratora, enquanto o segundo, caso exista, representa a quantidade de eixo da(s) unidade(s) rebocada(s).

De acordo com DNIT (2006) as letras significam:

- C: veículo simples (caminhão ou ônibus) ou veículo trator + reboque;
- S: veículo trator (cavalo mecânico) + semirreboque;
- I: veículo trator + semirreboque com distância entre eixos maior que 2,40 m (eixos isolados);
- J: veículo trator + semirreboque com um eixo isolado e outro em tandem;
- D: combinação dotada de 2 (duas) articulações;
- T: combinação dotada de 3 (três) articulações;
- Q: combinação dotada de 4 (quatro) articulações;
- X: veículos especiais (usados para transportar cargas excepcionais em peso ou dimensões, possuem mais de 9 eixos, necessitando, portanto, de uma Autorização Especial de Tráfego – AET);
- B: ônibus.

A Federal Highway Administration (FHWA) desenvolveu uma classificação que divide o tráfego em 13 categorias, onde as classes de 4 a 13 fazem parte os veículos rodoviários de carga. As categorias consideradas por este órgão são apresentadas por Hellenbeck (1991) e Smith e Diefenderfer (2009):

- Classe 1: motocicletas (todos os veículos motorizados de duas ou três rodas);
- Classe 2: carros de passageiros (sedans, station wagon, carros de passageiros rebocando trailers recreacionais e leves);

- Classe 3: veículos unitários de dois eixos, quatro pneus (pick ups, vans, motor homes, ambulâncias, carros fúnebres, e outros rebocando trailers recreacionais e leves);
- Classe 4: ônibus (esta categoria inclui somente ônibus tradicionais de passageiros, incluindo ônibus escolar; ônibus modificados deverão ser classificados como caminhões e de modo apropriado);
- Classe 5: caminhões unitários de dois eixos, seis pneus (todo caminhão de chassi único, incluindo caminhões, veículos de camping e recreacionais, e motor homes, que têm dois eixos e duas rodas traseiras);
- Classe 6: caminhões unitários de três eixos (todo caminhão de chassi único, incluindo caminhões, veículos de camping e recreacionais, e motor homes, que têm três eixos);
- Classe 7: caminhões unitários de quatro ou mais eixos;
- Classe 8: todos os veículos de quatro ou menos eixos que são formados por duas unidades;
- Classe 9: todos os veículos de cinco eixos que são formados por duas unidades;
- Classe 10: todos os veículos de seis ou mais eixos que são formados por duas unidades;
- Classe 11: todos os veículos de cinco ou menos eixos que são formados por três ou mais unidades;
- Classe 12: todos os veículos de seis eixos que são formados por três ou mais unidades;
- Classe 13: todos os veículos de sete ou mais eixos que são formados por três ou mais unidades.

De acordo com as definições de FHWA e do DNIT apresentadas, percebe-se que dentro de uma mesma classe a configuração de eixos pode mudar o que dificulta a equivalência entre as classes de veículos para a aplicação no método empírico-mecanístico AASHTO (2002).

### 2.1.3 Cargas sobre os pavimentos

As cargas repetidas aplicadas pelos veículos rodoviários são as principais causadoras da deterioração dos pavimentos, e como consequência, os mesmos precisam ser, muitas vezes,

precocemente restaurados. Os caminhões, em geral, apresentam danos desiguais em cada passagem pelo pavimento, sendo os seguintes fatores causadores dos danos: tipo de veículo, carga por eixo, frequência, tipo e localização de eixos, tipo de suspensão, tipo e pressão dos pneus, tempo de aplicação da carga (velocidade) e ponto de aplicação da carga (FERNANDES JR., 1994).

Além dos fatores já mencionados, outras também são as causas de danos nos pavimentos, como por exemplo, o comportamento dos materiais constituintes das camadas, condições operacionais de tráfego, clima, etc..

Mas sendo os caminhões os principais agentes deterioradores dos pavimentos sabe-se que com o passar dos anos, em conjunto com as inovações tecnológicas da modalidade rodoviária, novas configurações de veículos de cargas tem entrado no mercado, isso faz entender que os efeitos considerados antigamente não são mais os mesmos, já que essas novas configurações trazem veículos comerciais com mais eixos e maior capacidade de carga. Esse conjunto de informações leva crer que os danos causados pelos caminhões tem apresentado um aumento considerável.

No Brasil, os dados e informações dos excessos de cargas são muito escassos. Além da pequena quantidade de postos de pesagem, verifica-se uma inexistência de investimento nos equipamentos para coleta de dados ao longo das rodovias, mesmo que para efeitos únicos de pesquisa e não de fiscalização/punição, ou seja, fora dos postos de pesagem obrigatórios. Não apenas a questão relacionada à quantidade de postos em operação deve ser observada, mas também se deve levar em consideração a adequada localização desses postos. Muitos postos têm seus dados comprometidos pela existência da possibilidade (e utilização) de rotas de fuga, assunto este comprovado por Chou (1996). O autor aponta que as cargas excedentes afetam tanto o cumprimento da lei como também a precisão dos fatores de carga dos veículos e, conseqüentemente, a equivalência de carga por eixo padrão, item primordial para o dimensionamento de pavimentos.

Fernandes Jr. (1994) comentou em seu trabalho que nos primeiros estudos relativos à pesagem no Brasil, realizado pelo GEIPOT entre 1976 e 1981, ficou evidenciado que, na época, os caminhões trafegavam com cargas de 10% a 30% acima dos limites. O percentual de excesso em cada tipo de eixo foi: 3% dos ESRS estavam com excesso; os ESRD correspondiam a 25%; os ETD a 15% e os ETT a 30%.

Martins e Serravale (2007) realizaram um estudo nas rodovias federais e estaduais da Bahia, onde foi constatado que 85% dos veículos estavam com excesso de peso por eixo e os veículos com maior frequência de infrações eram os do tipo 2C, 3C, 3S3. Cabe lembrar que o

estudo foi anterior à entrada em vigor da Resolução n° 258/2007 que permitiu a multa por excesso de carga nos eixos.

DNIT e LATRANS (2007) realizaram um trabalho, onde indicaram como as causas da limitação da efetividade das estações de pesagem como sendo as questões relativas à facilidade com que os postos fixos de pesagem são contornados, à falta de recursos para fiscalização (custo de instalação e operação) e à limitação de horários de funcionamento e rotas monitoradas. Dessa forma, em virtude das limitações reportadas, veículos sobrecarregados trafegam pela maioria das rodovias sem serem punidos pelo dano que causam na operação e ao pavimento.

De acordo com o estabelecimento no AASTHO e reforçado por Chou (1996), a relação entre a carga do tráfego e a deterioração do pavimento obedece a Lei da quarta potência, ou seja, um eixo de carga duas vezes mais carregado que outro causará 16 vezes mais danos ao mesmo pavimento. Para melhor exemplificar o efeito da sobrecarga no pavimento, Widmer (2002) afirma que o aumento de carga de 20% acima dos limites atuais implicará na redução da vida útil da estrutura em 50% e Albano (2004) ressalta que os 2,5% a mais na tolerância sobre a carga por eixo, estabelecida desde a Resolução 104/99 do CONTRAN, é responsável por uma redução de 10 a 15 % na vida de projeto prevista para o pavimento.

Tendo em vista que o efeito do excesso de peso é exponencial, é válido ressaltar que é muito importante a limitação de cargas por eixo. Martins e Serravalle (2007) apontam tal importância e salientam que o desgaste produzido gera a necessidade de restauração muito antes do prazo previsto, ou seja, precocemente. De uma forma geral, os autores listam como impactos do excesso de peso nas rodovias: “deterioração de toda a estrutura, causando danos irreparáveis pela simples manutenção; surgimento de fissuras e trincas; e aumento do número de acidentes”.

Fekpe, Clayton e Haas (1995) afirmam que os comerciantes que trafegam com caminhões com excesso de carga provocam a redução do tempo de vida útil do pavimento e não reembolsam ao público o prejuízo originado disso, além de estarem competindo de forma injusta com os outros que estão com os veículos dentro dos limites de carga regulamentadas. Os autores relatam ainda que a falta de fiscalização e controle dos pesos e dimensões dos veículos de carga e a deficiência em manter os caminhões com excesso de carga fora do sistema rodoviário, tem como efeitos negativos o mau uso dos recursos públicos, além de proporcionar a falta de segurança aos usuários (acidentes com caminhões pesados).

Os valores de limites de carga para superiores àqueles usados anteriormente tem um efeito mais ou tão significativo quanto os excedentes aos limites legais, em vista que a malha rodoviária projetada anteriormente à alteração sofrerá com tensões superiores àquelas que o pavimento foi dimensionado para suportar sua vida em serviço.

No Brasil, infelizmente os limites legais de cargas não são observados por parte dos transportadores, por fabricantes de veículos e nem pelas autoridades responsáveis em aprovar projetos de novos veículos. Fernandes Jr. et al. (1995) indicam que os fabricantes de implementos, para se tornarem mais competitivos nos mercado, admitem a construção de reforços nos veículos, produzindo veículos com capacidade de carga acima dos limites legais.

A deterioração de um pavimento por fadiga caracteriza-se pelo rompimento da camada de concreto asfáltico (CA) quando esta é solicitada continuamente por cargas que provocam tensões menores do que a resistência à tração do revestimento. As trincas surgem inicialmente na fibra inferior da camada de CA e propagam-se progressivamente para a superfície, dando a impressão, num estágio final de evolução, semelhante ao couro de crocodilo (Albano, 2005).

A publicação *Truck Weight Limits* (National Research Council, 1990 apud ALBANO 1998), apresenta uma análise da influência de veículos pesados sobre a durabilidade dos pavimentos. O trabalho ressalta que as condições e o desempenho dos pavimentos não dependem somente do número de veículos pesados e da carga por eixo a que os pavimentos estão sujeitos. Outros fatores também devem ser considerados:

- Adequação das espessuras das diversas camadas constituintes do pavimento;
- Qualidade dos materiais empregados na construção;
- Procedimentos construtivos adotados;
- Condições de manutenção da rodovia;
- Propriedades do subleito existente;
- Condições ambientais, principalmente, destacando-se a precipitação pluviométrica, umidade do ar e a variação da temperatura.

Liu et al. (1998) referem que vibração causada pela quantidade das forças dinâmicas verticais e horizontais sobre a estrutura do pavimento podem provocar sua deterioração. Ainda sobre a questão de forças dinâmicas e o efeito do tipo de suspensão dos veículos sobre os pavimentos, a *Organization for Economic Co-operation and Development* (1998) relata que as suspensões mecânicas, constituídas por feixes de molas, são pelos menos 15% mais rígidas do que as pneumáticas. Os autores ainda afirmam que as suspensões mecânicas produzem forças dinâmicas com o dobro de magnitude do que as pneumáticas.

Com todos os fatores intervenientes pelo uso contínuo torna-se evidente que a durabilidade de um pavimento é limitada. Logo, depois de transcorrido algum tempo, o pavimento deverá sofrer uma ação de “rejuvenescimento”. Waston (1989) explica que, segundo estudos desenvolvidos na Inglaterra, o melhor momento para intervenção ocorre quando as trilhas de rodas estiverem com profundidade de 10 mm ou houver fissuras sobre as trilhas de roda – para o DNIT (2006) na ordem de 20% - mesmo antes de ocorrer esta profundidade. O autor ainda define que a vida útil, para um projeto de pavimento novo, é o período de tempo provável no qual deverá ocorrer esta condição crítica e, conclui relatando que quando são considerados os custos de construção e manutenção, um período de vida útil de 20 anos é o de adoção mais adequada.

Timm e Newcomb (2002 apud ALBANO, 2005) comentam que projetar pavimentos para mais de 20 anos não é aconselhável por se tratar de um período muito longo. Durante este período poderão ocorrer desenvolvimentos na fabricação e nos implementos dos veículos de carga e as autoridades e transportadores poderão negociar mudanças nos limites máximos legais de carga, além de que, haverá alterações nas taxas de crescimento da população e veículos e modificações em uma série de fatores que tendem a alterar as características de fluxo de tráfego previsto. Dessa forma, os autores ressaltam que projeções para um longo período de tempo poderão se tornar inadequadas e ser a principal causa do surgimento prematuro de defeitos nos pavimentos.

No Brasil, o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER (1981) considera que um pavimento será dimensionado em função do número equivalente N de operações de um eixo padrão, durante um período de projeto escolhido. Em geral, os órgãos rodoviários definem períodos de projeto de até 10 anos. No caso de dimensionamento de camadas de reforço também há uma relação entre a vida útil do pavimento e o decorrente número N.

Martins e Miranda (1995) referem que a consequência imediata da destruição dos pavimentos, com base em levantamentos no Estado de Mato Grosso, é o aumento imediato dos custos de transporte, estimado em até 58% no excesso do consumo de combustível, 30% no desgaste da frota e 100% no tempo de percurso. Os autores exemplificam o excesso de carga com base nos dados colhidos no posto de pesagem dinâmica da BR 174 em Cáceres e na BR 163. No primeiro identificou-se um excesso de carga em 20% nos eixos pesados e no segundo 30% dos eixos apresentavam excesso de carga.

Na rodovia concedida BR 290, Osório – Eldorado do Sul, com o início das pesagens no final do primeiro semestre de 1999, verificou-se que 30% dos veículos pesados trafegavam

sobrecarregados. Após algumas semanas de fiscalização, verificou-se uma estabilização dos excessos no intervalo de 4 a 5% (CONCEPA, 2000).

Segundo a PRIME (2013), em um estudo realizado na BR 290/RS, utilizando o sistema WIM, foi possível definir um panorama referente ao sobrepeso dos veículos comerciais monitorados. Foi constatado que, durante o período de coleta de dados, do total de veículos monitorados (107387 veículos) 9,63% apresentavam alguma sobrecarga em algum eixo, sendo que o maior percentual de sobrecarga ocorreu no segundo eixo (3,48% dos veículos apresentaram uma sobrecarga média de 14,7% neste eixo). Outro fato importante a ser destacado foi a segunda maior sobrecarga, sendo esta encontrada no primeiro eixo (2,08% dos veículos apresentaram uma sobrecarga média de 12,93% neste eixo). Cabe ressaltar que a sobrecarga no primeiro eixo é mais crítica para o pavimento, pois apresenta em sua configuração apenas dois pneumáticos (ESRS), fato este que acaba concentrando as cargas de maneiras mais significativas (maior concentração de carga por pneumático).

Fernandes Jr. (1994), referindo a pesquisa sobre o inter-relacionamento dos Custos Rodoviários desenvolvida entre 1976 e 1981 pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT, 1997), relata que foram levantados os seguintes dados (Quadro 1):

Tipo de Eixo	Veículos com Excesso de Peso (%)	Valor da Sobrecarga	
		Excesso/Limite Legal (kN)	% de Excesso
<b>Dianteiro</b>	3,0	3,0/60,0	5,0
<b>Simples (roda dupla)</b>	25,0	20,0/100,0	20,0
<b>Tandem Duplo</b>	15,0	85,0/170,0	50,0
<b>Tandem Triplo</b>	30,0	115,0/225,0	45,0

Quadro 1 – Excesso de peso por eixo praticado no Brasil

Fonte: GEIPOT (1997)

#### 2.1.4 Peso bruto total combinado

O Peso Bruto Total (PBT) de um veículo é considerado, aquele proveniente da soma da tara e da carga deste, sendo o Peso Bruto Total Combinado (PBTC) o resultante da soma dos pesos brutos das unidades que compõem o veículo.

Segundo Fernandes Jr. (1994) a causa da deterioração dos pavimentos é a carga por eixo, não havendo uma relação direta entre o Peso Bruto Total Combinado (PBTC) e o desempenho dos pavimentos. Veículos pesados podem ser pouco danosos aos pavimentos, desde que a carga total seja distribuída adequadamente por um número suficiente de eixos. A



utilização de veículos com elevado PBTC e baixa carga por eixo considera simultaneamente dois conceitos: o primeiro trata de menor deterioração dos pavimentos, quanto maior for o número de eixos e o segundo diz a respeito da maior eficiência, quanto maior for a composição rodoviária da carga. Os Veículos Combinados Longos (VCLs) não necessariamente acarretam maior deterioração aos pavimentos, se comparado aos veículos rodoviários convencionais. Para exemplificar, Hussain e Parker (2006) verificaram que os veículos com 2 eixos danificam mais que os veículos de 3 e 5 eixos.

Além dos pavimentos, cabe lembrar que o tráfego de veículos comerciais é responsável pelo impacto mais severo nas pontes e viadutos. A sobrecarga inflige graves danos às estruturas e superfícies pavimentadas, reduzindo significativamente seu ciclo de vida útil, podendo, inclusive, no caso de pontes e viadutos, levar ao colapso.

#### 2.1.5 Tipos de eixos

Os tipos de eixos de veículos rodoviários de carga podem ser de dois tipos: o isolado, chamado de eixo simples; e os em conjunto, denominados de eixos em tandem. Os eixos tandem podem ser dotados apenas de uma roda na extremidade (roda simples) ou duas rodas (rodas duplas). É importante ressaltar que existem combinações de eixos simples de rodas simples com eixos simples de rodas duplas em ônibus, o que não configura um eixo tipo tandem duplo.

O DNIT (2007) chama a atenção para os conjuntos de 2 ou 3 eixos onde as distâncias entre eixos forem maiores que 2,40 metros, pois nesse caso serão considerados isolados. Na figura 2 os tipos de eixos de veículos rodoviários que circulam nas rodovias brasileiras são apresentados.

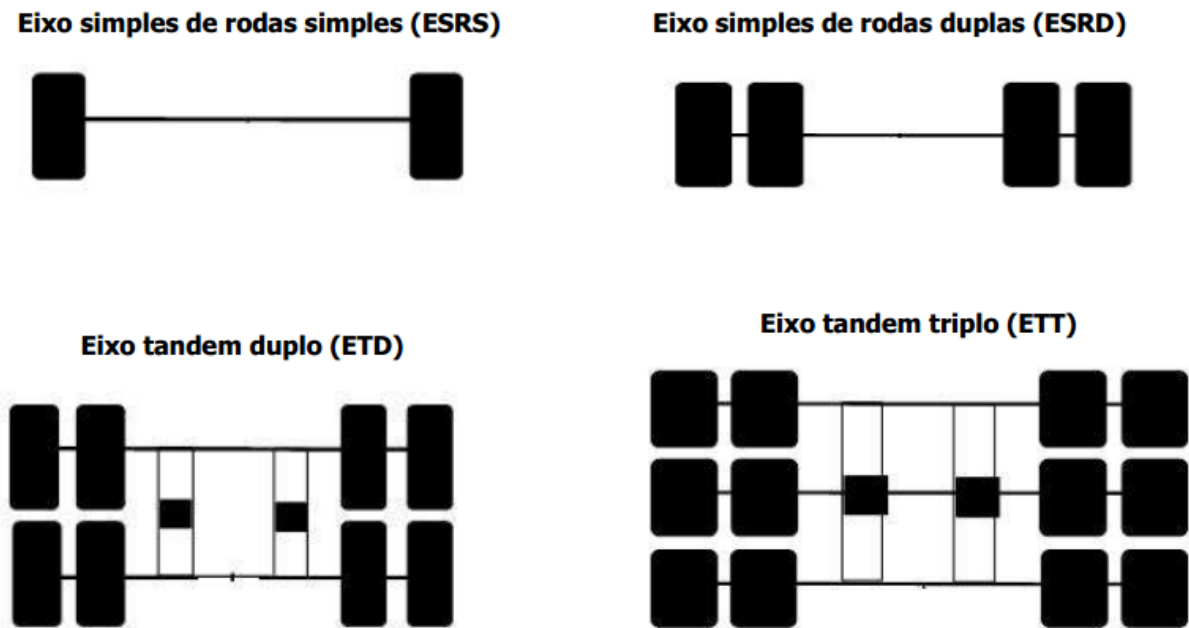


Figura 2 - Tipos de eixos de veículos rodoviários de carga brasileiros

Fonte: DNIT (2007)

### 2.1.6 Cargas por eixo

Fernandes Jr. (1994) cita em seu trabalho que a carga por eixo, independente dos fatores ambientais, do comportamento dos materiais constituintes da estrutura do pavimento e das ações combinadas de outros fatores de tráfego, é a que mais afeta a deterioração dos pavimentos.

Como citado anteriormente, existe uma relação exponencial entre as cargas por eixo e a deterioração dos pavimentos. Como resultados da pista experimental da AASHO (atual AASHTO), no final da década de 50, indicaram um valor próximo a 4 para esse expoente, passou-se utilizar a expressão “lei da quarta potência” para representar os efeitos relativos de diferentes cargas por eixo sobre o desempenho dos pavimentos. Independente do valor exponencial pode-se afirmar que existe um relevante aumento na deterioração dos pavimentos quando ocorrem acréscimos nas cargas por eixo.

Fernandes Jr. (1994) destaca que existem quatro tipos de eixo utilizados pelos veículos de carga que trafegam nas rodovias brasileiras que são:

- Eixos Simples de Roda Simples (ESRS), com carga legal máxima de 6,0 tf;
- Eixos Simples de Roda Dupla (ESRD), com carga legal máxima de 10,0 tf;
- Eixos Tandem-Duplo (ETD), com carga legal máxima de 17,0 tf;

- Eixos Tandem-Triplo (ETT), com carga legal máxima de 25,5 tf.

Cabe lembrar que, quanto aos testes experimentais realizados na pista da AASHO, não se utilizava o ETT, que até hoje tem sua utilização, em muitos países, limitada à mesma carga por eixo do ETD.

Segundo Gökten e Mitschke (1995 apud ALBANO, 2005) os limites de cargas em alguns países da Europa são apresentados no quadro 2.

País	Carga por Eixo (kN)			PBT ou PBTC (kN)			
	Eixo dianteiro	Eixo simples	Eixo tandem duplo	2 eixos	3 eixos	Semi-reboque	Trator e reboque
Alemanha	100	100	110-200	170	240	400-440	400
Áustria	100	100	160	160	220	380	380
Bélgica	100	100	190-200	190	260	440	440
Bulgária	60	100	130-200	160	260	380	420
Dinamarca	100	100	160-200	180	240	480	480
Finlândia	80	100	180	170	250	440	560
França	130	130	210	190	260	400-440	400
Grécia	70	100-130	200	190	260	380	380
Holanda	100	110	115-190	200	300	500	500
Hungria	100	100	160	200	240	400	400
Inglaterra	92	105	105-203,4	170	243,9	380	352,2
Itália	120	120	200	180	240	400-440	400-440
Iugoslávia	100	100	160	180	240	400	400
Suécia	100	100	160	170	290	375-514	375-514
Suíça	100	100	180	160	190	280	280

Quadro 2 – Limites de cargas em alguns países da Europa

Fonte: Gökten e Mitschke (1995 apud ALBANO, 2005)

No quadro 3, adaptada dos trabalhos de Albano (2005), FHWA (2013), Michael Paine e Paul Wild (2006) e Regulamento de Pesos e Dimensões de Veículos no Canadá (2006), é mostrada uma comparação entre os limites de carga máximas autorizadas na Europa, Estados Unidos da América, Austrália e Canadá, sem considerar tolerâncias, com as do Brasil.

Situação	Brasil (t)	EUA <sup>1</sup> (t)	Europa <sup>2</sup> (t)	Argentina (t)	Austrália (t)	Canadá (t)
Eixo simples dianteiro	6,0	-	10,0	10,5	6,0	5,5
Eixo simples rodado duplo	10,0	8,9	10,0	10,5	9,0	9,1
Tandem-duplo	17,0	15,2	16,0	18,0	16,5	18,0
Tandem-triplo	25,5	-	-	25,5	20,0	26,0
PBT	57,0	35,6	44,0	45,0	-	49,5

<sup>1</sup> Na maioria dos Estados

<sup>2</sup> Na maioria dos Países

Quadro 3 – Comparação dos limites de cargas do Brasil, com Europa, EUA, Argentina, Austrália e Canadá

Fonte: adaptada de Peterlini (2006)

Nota-se a grande diferença do Brasil em relação aos outros países, no que se refere ao limite do Peso Bruto Total, é o maior de todos.

### 2.1.7 Tipos de pneus

Albano (1998) define pneus como estruturas com borracha natural ou sintética, cuja finalidade é suportar e distribuir o Peso Bruto Total (PBT) e viabilizar a tração e a frenagem de veículos rodoviários através de forças que se desenvolvem na interface de contato com a superfície de rolamento. Os pneus, também designados como pneumáticos, são montados em aros metálicos formando a roda. Os pneus desmontáveis foram produzidos a partir de 1895 pelos irmãos Michelin, na França.

Já Fernandes Jr. (1994) cita que os pneus suportam, impulsionam e controlam os veículos rodoviários por intermédio das forças que se desenvolvem na interface pneu-pavimento, cumprindo as seguintes funções:

- Suportar as cargas que atuam nos eixos;
- Distribuir as cargas verticais dos veículos sobre uma superfície de contato relativamente pequena, diminuindo o atrito e minimizando a resistência de rolamento;
- Fazer parte do sistema de suspensão dos veículos, ajudando a aumentar o conforto das viagens e a reduzir a deterioração dos pavimentos;
- Transmitir aos pavimentos as forças horizontais que se desenvolvem quando da tração, frenagem e mudança de trajetória dos veículos.

Segundo Albano (1998), os dois tipos de pneus mais utilizados são: diagonal e radial. Os pneus diagonais foram os primeiros a ser fabricados e têm sido utilizados desde o início da indústria automotiva, porém a evolução da tecnologia com utilização de materiais resistentes e otimização de projetos eles vêm sendo substituídos, desde a década de 70, pelos radiais, estes são capazes de suportar maiores cargas e maiores pressões de enchimento.

Segundo Michelin (2004), o pneu é chamado diagonal ou convencional quando a carcaça é composta de lonas sobrepostas e cruzadas umas em relação às outras. Os cordões que compõem essas lonas são fibras têxteis. Neste tipo de pneus, os flancos são solidários à banda de rodagem. Quando o pneu roda, cada flexão dos flancos é transmitida à banda de rodagem, conformando-se ao solo ou pavimento.

De acordo com a fabricante (MICHELIN, 2004) as principais características dos pneus diagonais são:

- Desgaste mais rápido com menor quilometragem;
- Consumo de combustível mais elevado;
- Aquecimento muito grande, lixando com o solo, fricção entre lonas e a má condução de calor do material têxtil;
- Aderência não muito boa, menor área de contato pneu/pavimento, deformações da banda de rodagem;
- Estabilidade prejudicada, perda da trajetória causada pelas deformações da banda de rodagem;
- Maior possibilidade de cortes/furos, carcaça rígida e material têxtil.

Ainda segundo Michelin (2004), o pneu é chamado radial, quando os cabos da carcaça estão dispostos em aços perpendiculares ao plano de rodagem e orientados em direção ao centro do pneu. A estabilização do piso é obtida através de 3 ou 4 lonas de aço sobrepostas. Por ser uma carcaça única, não existe fricção entre lonas, apenas flexão, o que evita a elevação da temperatura interna do pneu.

As principais características dos pneus radiais são (MICHELIN, 2004):

- Desgaste mais lento, aumento na quilometragem e diminuição no consumo de combustível;
- Redução do aquecimento, não existe fricção entre lonas da carcaça, diminui o lixamento com o solo e o aço é um excelente condutor de calor – maior aderência, área de contato pneu/pavimento é maior e constante;
- Estabilidade favorecida com a redução das deformações da banda de rodagem, o pneu segue uma trajetória definida;
- Menor possibilidade de corte/furos, carcaça mais flexível e com uma “alma de aço”.

A figura 3 mostra um desenho esquemático de uma seção transversal de um pneu do tipo diagonal ou convencional. Já a figura 4 mostra um desenho esquemático de uma seção transversal de um pneu tipo radial.

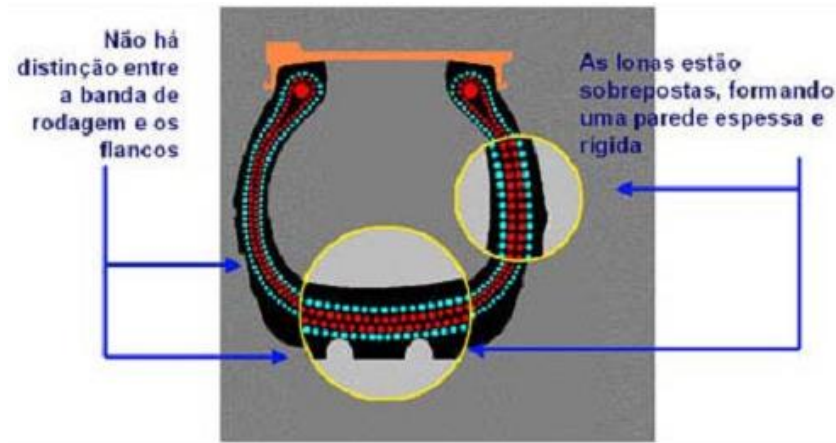


Figura 3 - Corte transversal de um pneu diagonal

Fonte: Michelin, 2004

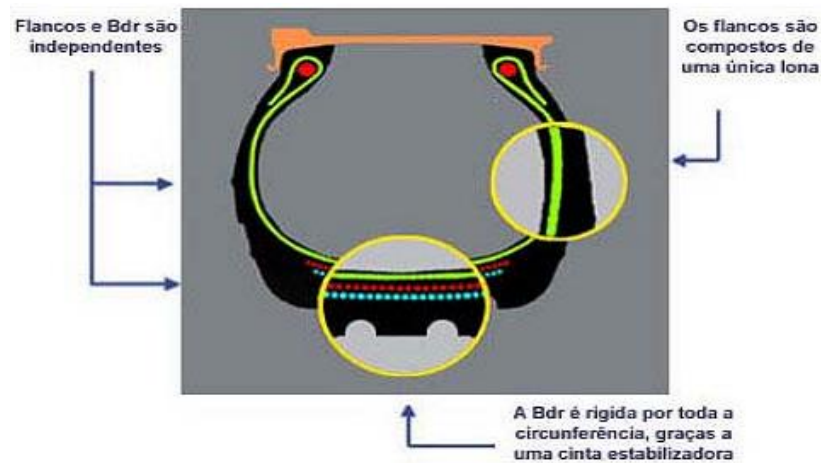


Figura 4 - Corte transversal de um pneu radial

Fonte: Michelin, 2004

Na literatura existem poucos trabalhos conclusivos de comparação entre os efeitos provocados pelo pneu diagonal e o radial. Eliiot, Selvan e Mun (1991 apud FERNANDES JR., 1994), estudaram os pneus extralargos e concluíram que os mesmos resultam em maior carga transportadora (menor tara), maior facilidade de manutenção, menor custo (em relação dos pneus convencionais), economia de combustível (menor resistência de rolamento), menor desgaste e menor durabilidade.

### 2.1.8 Pressão dos pneus

As cargas do tráfego são transmitidas ao pavimento por meio de rodas pneumáticas dos veículos, as quais exercem uma pressão numa área aproximadamente elíptica e de

distribuição parabólica com pressão máxima no centro da área carregada. Assim, embora geralmente se refira a cargas por eixo, as pressões a serem admitidas são referidas às cargas de rodas.

No processo de interação pneu/pavimento a pressão de inflação do pneu desempenha um papel fundamental, sendo considerada como muito importante no mecanismo de surgimento das trincas por fadiga do tipo top-down. Se a carga de um eixo/roda é mantida constante, ao aumentar a pressão de inflação do pneu pode-se reduzir a área de contato, proporcionando um aumento na pressão de contato entre pneu/pavimento. Com isso, há um aumento nos esforços atuantes no revestimento asfáltico e, conseqüentemente, o pavimento se torna mais propício a fatores danosos de maiores intensidades.

Segundo Fernandes Jr. (1994), a importância do tipo de pneu para que se possa analisar o desempenho do pavimento está associada à pressão de enchimento que ele pode suportar, além da distribuição da pressão na superfície de contato pneu/pavimento que se distribui irregularmente sobre uma superfície aproximadamente elíptica.

O mesmo autor, Fernandes Jr. (1994), ressalta ainda que a distribuição da pressão de contato pneu/pavimento varia em função da rigidez do pneu, sendo que esta depende da rigidez da carcaça e das cintas e a própria pressão de enchimento. O pleno conhecimento da distribuição da pressão de contato permite respostas estruturais mais precisas dos pavimentos.

A National Research Council (1990 apud ALBANO, 1998), em pesquisas realizadas em sete estados norte-americanos, entre 1984 e 1986, constatou que 75% a 80% dos pneus usados em caminhões eram do tipo radiais e que a pressão de enchimento média era de 100 psi.

Albano e Lindau (1998) realizaram pesquisas de campo junto ao Posto do Pedágio da Rodovial Estadual RS-240, no município de Portão, Estado do Rio Grande do Sul. Informações de pressão de enchimento dos pneus integrantes de uma amostra representativa de 275 caminhões e dados foram coletados de 1815 pneus. Os valores confirmaram as tendências de aumento da pressão de inflação. Os principais resultados são os seguintes: pressão média na amostra de pneus dianteiros 95 psi (6,7 kg/cm<sup>2</sup>) e 104 psi (7,3 kg/cm<sup>2</sup>) na amostra dos demais pneus. Foi constatado no conjunto de pneus uma incidência de 62% de pneus radiais.

Albano (2005) cita que os pneus utilizados na pista experimental da AASHO eram representativos daqueles que estavam em uso no final dos anos 50. Eram os tradicionais pneus de lonas (pneus diagonais) com pressão de enchimento da ordem de 517 kPa a 552 kPa (75 a

80 psi). Desde então os fabricantes introduziram no mercado pneus radiais com melhores condições de suportar maiores cargas e pressões.

Middleton et al. (1986) realizaram um levantamento de dados em rodovias no Estado do Texas e constataram que os pneus radiais em média tiveram um pressão média de 83 a 145 kPa (12 a 21 psi) mais em relação aos de lona ou convecionais. Além disso, os autores comprovaram as evidências de que acréscimos na pressão dos pneus resultam em aparecimento precoce de trincas por fadiga e também maiores deformações permanentes nas trilhas de rodas.

O Guia AASHTO (1993) comenta que a pressão de inflação, utilizada em veículos pesados, tem aumentado na medida em que os fabricantes de pneus estão melhorando a tecnologia de fabricação. Além disso, as montadoras estão avaliando as vantagens de adoção de maiores pressões inflação nos pneus. Porém, o Guia relata que ainda não se conhece qual o efeito concreto das maiores pressões de enchimento dos pneus sobre os pavimentos.

Albano (2005) relata que a pressão de inflação dos pneus tem significativo efeito no valores da deformação de tração na fibra inferior do concreto asfáltico, sendo não só para o valor, mas também na localização da deformação máxima de tração relativa à largura de contato do pneu/pavimento. Quanto mais inflados os pneus, maiores deformações ocorrem próximas ao centro do pneu e pressões mais baixas provocam deformações máximas junto as bordas laterais.

Em sua tese de doutorado, Albano (2005), utilizou o Simulador de Tráfego da UFRGS/DAER para ensaios em que utilizou pressões variadas de inflação de 552 kPa (80 psi), 620 kPa (90 psi) e 689 kPa (100 psi) e de intensidade das cargas de 82 kN (8,2 tf), 100 kN (10,0 tf) e 120 kN (12,0 tf) em dois tipos de pavimento, um deles delgado com revestimento em tratamento superficial duplo com 2,5cm de espessura, base e sub-base de macadame seco com 21,0 cm de espessura, e o outro, espesso com revestimento em concreto asfáltico com 9,0 cm de espessura, base de brita graduada simples com 12,0 cm de espessura, sub-base de macadame seco com 16,0 cm de espessura, ambos assentes sobre subleito de argila de comportamento laterítico. Os resultados apresentados pelo autor mostraram que a variação da deflexão recuperável entre os diversos níveis de pressão de inflação para cada nível de carga por eixo é pequena. No caso de pavimento delgado tem algum efeito, mas no espesso as variações são ainda menores, quase que insignificantes. As variações das deflexões foram mais significativas quando as cargas aplicadas sobre os pavimentos eram variadas. São representadas duas tabelas que reproduzem os valores médios da deflexão para cada combinação de fatores (pressão de inflação de pneus e cargas por eixo), calculados para os



pavimentos espesso e delgado. A tabela 1 mostra as variações no pavimento delgado e a tabela 2 no pavimento espesso.

Tabela 1 - Deflexões médias medidas no pavimento delgado (0,01 mm)

<b>Pressão de inflação de pneus</b> <b>kPa (psi)</b>	<b>Carga por eixo (kN)</b>		
	<b>82</b>	<b>100</b>	<b>120</b>
<b>552 (80)</b>	54,25	69,25	75,25
<b>620 (90)</b>	55,00	71,25	77,75
<b>689 (100)</b>	51,50	63,00	76,00

Fonte: Albano, 2005

Tabela 2 - Deflexões médias medidas no pavimento espesso (0,01 mm)

<b>Pressão de inflação de pneus</b> <b>kPa (psi)</b>	<b>Carga por eixo (kN)</b>		
	<b>82</b>	<b>100</b>	<b>120</b>
<b>552 (80)</b>	43,00	45,25	48,50
<b>620 (90)</b>	38,50	43,75	52,00
<b>689 (100)</b>	39,50	47,75	52,25

Fonte: Albano, 2005

Por fim, em seu trabalho, Albano (2005) conclui que, em ambos os pavimentos estudados, quanto maior é o nível de carga por eixo, mais pronunciado é o valor da deflexão para cada nível de pressão de inflação considerado, evidenciando assim a conhecida influência da carga por eixo sobre os pavimentos, ou seja, a potencialidade do surgimento de danos ao pavimento é maior quanto maior for a carga e a deflexão. A variação da deflexão entre os diversos níveis de pressão de inflação para cada nível de carga por eixo é pequena. No caso do pavimento espesso as variações são ainda menores que no pavimento delgado. Para os dois níveis de espessura de pavimento estudados, no caso do nível de carga por eixo é de 120 kN, a variação entre os valores de deflexão é mínima para todos os níveis de pressão de inflação.

Kim et al. (1989) sustentam que o transporte de carga apresenta uma tendência de crescimento do PBT dos caminhões. Assim, com o aumento de carga por eixo, a utilização de maiores pressões nos pneus tem se tornado mais usual no contexto do transporte pesado. Na verdade, dentro de um conjunto de circunstâncias, destacam-se dois fatores simultâneos: a tração pelo aumento de carga por eixo é responsável pelas melhores características dos pneus

radiais. Outro fator importante é o transportador, responsável pelo aumento da pressão de enchimento dos pneus.

Vale ressaltar que os fabricantes dos pneus fornecem tabelas com o valor de pressão recomendado em função da carga atuante por roda simples e dupla e para cada tamanho de pneumático.

Vários estudos teóricos e experimentais anteriormente desenvolvidos confirmam que a pressão de contato não é igual a pressão de enchimento e nem se distribui uniformemente sobre uma superfície circular. Fernandes Jr. (1994) informa que a superfície de contato aproxima-se da elipse para pneus de lonas e de um retângulo para pneus radiais a medida que a carga por eixo aumenta ou a pressão diminui. Já Souza (1980) relata que a área de contato entre um pneu carregado e uma superfície pavimentada é aproximadamente elíptica quando os pneus são novos e com pressão de enchimento e carga máxima recomendadas. Já para pneumáticos usados e com cargas além da máxima recomendada, a área de contato é aproximadamente retangular.

Porém, por outro lado sabe-se que a forma, o valor e a distribuição da pressão de contato é uma questão com certo grau de complexidade e de difícil generalização, pois são muitos os fatores que influenciam as seguintes determinações: carga por eixo, pressão de enchimento, tipo e tamanho do pneu, velocidade, entre outras.

A maioria dos pesquisadores adota o FEC (Fator de Equivalência de Cargas) para medir os efeitos da variação da pressão de enchimento sobre o desempenho dos pavimentos. Via de regra, quando é utilizado o critério do trincamento da camada de revestimento por fadiga, considera-se como resposta estrutural a deformação horizontal na fibra inferior do CA provocada por tensões de tração. No critério da deformação permanente devido à trilhas de rodas, a resposta do pavimento é a deformação vertical no topo do subleito provocada por tensões de compressão.

Fernandes Jr., Paes e Pereira (2007) também estudaram os efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos flexíveis brasileiros e portugueses. Os autores verificaram, a partir dos cálculos de fatores de equivalência de carga empírico-mecânico, apontando que o FEC aumenta conforme aumentam-se pressões, tendo como consequência um aumento nas deformações horizontais de tração na elevação de pressão de 80 psi (573 kPa) para a de 120 psi (844 kPa), o que pode corresponder a uma variação de até 50% nos fatores de equivalência de carga.

Quando considerada a fadiga do revestimento asfáltico, aumentando-se a pressão de inflação de 563 kPa (80 psi) para 844 kPa (120 psi), pode haver uma variação de até duas vezes no FEC, ou seja, a vida de um pavimento reduz-se à metade (FERNANDES JR., 1994).

Machemehl, Wang e Prozzi (2005) estudaram os possíveis efeitos das pressões de inflação dos pneus nos pavimentos flexíveis as cargas de rodas de 20, 24, 28 e 31 kN e as pressões de 483, 586, 690, 793 e 896 kPa foram utilizadas no estudo. Os autores encontraram que as pressões de enchimento dos pneus tem uma forte relação com as deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento e com tensões próximas a superfície do revestimento. Isso aconteceu tanto para pavimentos delgados como espessos, verificando-se que quanto maior a pressão de enchimento, maior o dano causado. No entanto, os efeitos da pressão de enchimento nas deformações de compressão no topo do subleito são menores, principalmente nos pavimentos espessos.

Os mesmos autores, Machemehl, Wang e Prozzi (2005), comentaram que em função dos reforços nas laterais dos pneus as deflexões laterais são restringidas deformando mais linearmente na direção longitudinal, fazendo com que a área de contato seja mais retangular do que circular, isso acaba por gerar diferenças nas tensões/deformações nas direções longitudinais e transversais. Os autores ainda ressaltam que o método convencional subestima os resultados a baixa pressão de enchimento e superestima a altas pressões.

Nos trabalhos de Wang (2005) e Wang e Machmehl (2006) foram realizadas comparações entre as respostas estruturais obtidas pelas duas formas de consideração de distribuição e área das pressões de contato. As respostas dos pavimentos sob as pressões de contato não uniformes para diferentes tipos de pneus e pressões de enchimento foram calculadas por um programa de elementos finitos (o ANSYS) considerando os ESRS, ESRD e ETD. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que o modelo tradicional (pressão de contato uniformemente distribuída e igual à pressão de enchimento dos pneus, sobre superfície circular) tende a superestimar as deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento e subestimar a deformação vertical de compressão no topo do subleito, o que são intensificadas pelo aumento de pressão de enchimento do pneu, além de mais significantes para pavimento delgados que espessos e para ESRD e ETD do que para ESRS.

## **2.2 Fator de equivalência de cargas**

O conceito de equivalência entre cargas surgiu da observação que em estruturas semelhantes de pavimentos, os efeitos destrutivos ocasionados por diferentes veículos ao

longo do tempo são iguais, emergindo um critério comparativo entre veículos. Ao efeito destrutivo pontual a cada passagem de uma carga individual atribui-se a terminologia de dano, sendo que a ruptura do pavimento será ocasionada pelo efeito do acúmulo de uma dada quantidade de danos – Hipótese de Miner (MINER, 1945 apud MEDINA, 1997).

Balbo (1997) conclui que os métodos de dimensionamento que adotam diferentes critérios de ruptura de um pavimento implicam em conceitos de danos diferentes, refletindo em suas equações de dimensionamento de pavimentos flexíveis e rígidos, que apresenta diferentes valores para os fatores de equivalência de entre cargas. O autor ainda ressalta que os efeitos destrutivos de uma carga podem ser chamados de dano, sendo que a ruptura do pavimento, encarada através de algum critério definido seu fim de vida útil, ocorrerá por efeito do acúmulo de uma dada quantidade de danos ocorridos.

Albano (1998) cita que medição dos danos causados pelo excessivo carregamento de veículos pode ser avaliada pelo FEC. Estudos desenvolvidos na pista experimental da AASHO no final da década de 50 levaram à conclusão que os efeitos de cargas por eixo sobre pavimentos podiam ser referidos aos provocados por uma carga de eixo simples com rodado duplo de 8,2 tf.

O Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos (DNER, 1998) enfatiza que as cargas do tráfego causam deflexões nas camadas do pavimento e alteram o estado de tensões e deformações. Cada carga provoca um efeito destrutivo e reduz a vida remanescente do pavimento. Portanto, diferentes configurações e cargas produzem deflexões diferenciadas, que reduzem a vida do pavimento de diversas maneiras. Os FEC são utilizados para fazer conversões de equivalência entre as várias possibilidades de carga por eixo.

Albano (2005) cita que o tráfego que se desloca sobre o pavimento é o carregamento a ser considerado nas metodologias de dimensionamento tanto empíricos como empírico-mecanísticos. Dessa forma, existe necessidade de modelar o tráfego, pois na realidade, o mesmo apresenta-se de forma bastante complexa: veículos diferentes, cargas aleatórias, inúmeras configurações de eixos e rodas, velocidades variáveis, etc.

Buscando quantificar os danos causados ao pavimento Yoder e Witczak (1975) indicaram que os Fatores de Equivalência de Cargas (FEC) definem o dano causado pela passagem de um veículo em relação ao dano causado por um eixo considerado como padrão, num mesmo tipo de pavimento.

A partir do conceito de equivalência de carga, a definição e quantificação desses efeitos foi o principal objetivo da AASHO, estabelecendo como eixo equivalente padrão o eixo simples de duas rodas de 8,2 tf (82 KN), espaçados de 300 mm (cada conjuntos de rodas

duplas), desenvolvendo, de acordo com HRB (1962), o conceito conhecido como Equivalente de carga por eixo padrão (*Equivalent Standard Axle Load – ESAL*).

No estudo da AASHO, de acordo com HRB (1962), estabeleceu-se que o dano ao pavimento devido à passagem de cada eixo de carga simples individual pode ser estimado pela Lei da Quarta Potência. Essa lei diz a respeito de que o dano causado ao pavimento aumenta exponencialmente com o aumento da carga por eixo, conforme é expresso pela equação 1:

$$FEC = \left(\frac{x_i}{L_s}\right)^m \quad (1)$$

Onde:

- $x_i$ : peso da carga por eixo no  $i$ -ésimo lote;
- $L_s$ : carga por eixo padrão com o mesmo número de eixos de  $x_i$  (80,1 kN para eixo simples e 151,2 kN para eixos tandem duplo);
- $m$ : potência que detona o dano relativo ao pavimento por uma dada carga  $x_i$ .

As verificações da AASHO de todas suas limitações relativas à evolução dos materiais empregados na pavimentação, dos veículos, das cargas e etc., ainda hoje, após mais de 50 anos, os FEC normalmente utilizados nos dimensionamentos de rodovias são de base semi-empírica, não permitindo extrapolações para condições distintas àquelas nas quais eles foram criados. Dessa forma, Fernandes Jr. (1994) e Fernandes Jr. e Sória (1996) enfatizam que FEC empírico-mecanísticos resultantes da análise estrutural dos pavimentos e da consideração de modelos de previsão do desempenho deste são os mais indicados para refletir a situação em campo. Os FEC empírico-mecanísticos assumem a forma da equação 2.

$$FEC_i = \left(\frac{\rho_i}{\rho_0}\right)^b \quad (2)$$

Onde:

- $\rho_i$  é a resposta estrutural correspondente à solicitação em análise;
- $\rho_0$  é a resposta estrutural à solicitação padrão;
- $b$  é o expoente associado à forma de deterioração, à resposta estrutural considerada, ao tipo de ensaio e à estrutura analisada.

Por meio de estudos desenvolvidos pela pista experimental da AASHO cujos ensaios de campo duraram 25 meses (novembro/1958 e dezembro/1960), definiu-se um eixo padrão, o qual consiste em um eixo simples com rodado duplo com carga de 18.000 lbs (8,2 tf) e com pressão de inflação de pneus de 80 psi (5,6 kg/cm<sup>2</sup>). Os efeitos destrutivos de cargas por eixos sobre pavimentos podem ser referidos ao provocado por um determinado número de passagens do eixo padrão. Pode-se relacionar cada tipo de eixo ou conjunto de eixos ao eixo padrão através do FEC. Desta forma, o tráfego previsto, para um pavimento é definido em função do número equivalente de operações do eixo padrão, durante o período de projeto. Esta quantidade de passagens do eixo padrão é denominado número N.

A carga por eixo padrão adotada é de 18.000 lbs (8,2 tf) por eixo simples de roda dupla – ESRD, ou seja, 9.000 lbs (4,2 tf) por rodas duplas. Todas as cargas por eixo previstas em projeto para circular pela via serão relacionadas à carga do eixo padrão. A somatória das relações de equivalência destrutivas fornece um parâmetro, denominado número N, que representa o número de passagens da carga de eixo padrão (8,2 tf), equivalente ao efeito das cargas do tráfego diversificado que realmente vai passar pela via no período de projeto.

Os modelos de obtenção dos FEC da AASHTO e da USACE são descritos a seguir.

### 2.2.1 Fator de equivalência de cargas do corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos (USACE)

Albano (2005) cita que os FEC/USACE são os adotados pelo DNIT (2006) para cálculo do número N e tem com origem o trabalho de Turnbull et al. (1962) para eixo simples e duplo. A referência do dano no pavimento é o afundamento plástico no subleito, considerado a 70 cm de profundidade (PEREIRA, 1985), tendo como limite o padrão de uma polegada de afundamento.

Pereira (1985) cita que os fatores de Equivalência concebidos pela USACE, em 1962, definiram o “ESWL” – “*Equivalent Single Wheel Load*” e tem como critério de degradação para equivalência, a deformação vertical de compressão no topo do subleito. Primeiramente, a preocupação era com a deformação permanente da camada de fundações do pavimento. Segundo o autor, foi observado que o próprio método de dimensionamento de pavimentos flexíveis (DNER, 1981) limitava-se a relacionar os valores numéricos assumidos para os fatores em questão, não fornecendo indicações esclarecedoras o bastante sobre a sua gênese e, por consequência, também sobre o seu real significado. O autor também lamenta que os textos dos trabalhos desenvolvidos por Turnbull et al. (1962) sejam insuficientes para que se possa

apenas através da leitura fazer um julgamento preciso da procedência do uso simplificado dos fatores referidos na resolução dos problemas de dimensionamento de pavimentos destinados a rodovias brasileiras de tráfego pesado.

Na realidade, Pereira (1985) faz uma tentativa de dissipar as dúvidas do sentido de aumentar as poucas informações que se tinha e tentar melhor caracterizar, detalhadamente, os atributos das cargas em rodovias, possibilitando a obtenção de fomentar as análises críticas desses fatores, que, além de induzir as diversas conclusões, resultou no conhecimento das respectivas limitações, bem como na proposição de procedimentos capazes de adequá-los às condições de rodovias de tráfego pesado.

Pereira (1992) cita que a derivação dos FEC adotados pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos foi baseado na equação (3) básica de dimensionamento de pavimentos flexíveis de aeroportos elaborada a partir do acervo de dados experimentais acumulado pelo órgão até início da década de 60.

$$e = \sqrt{P \left[ \frac{1}{8,2.ISC} - \frac{1}{pi.\pi} \right]} \quad (3)$$

Onde:

- e = espessura total do pavimento (polegadas);
- pi = pressão de inflação do pneumático (libras por polegada ao quadrado);
- P = carga de roda simples (libras);
- ISC = Índice de Suporte Califórnia (CBR%) do subleito;

Segundo Pereira (1985), a carga de roda simples equivalente é definida como sendo a carga que atuando sobre uma área de contato análoga à de uma das rodas do conjunto, produzindo na superfície do subleito uma deflexão máxima igual à resultante da ação combinada das rodas que integram o referido conjunto. São admitidas as seguintes hipóteses:

- A carga total incidente sobre o conjunto de rodas múltiplas é distribuída equitativamente sobre as rodas que o compõem;
- As áreas de contato entre os pneus e a superfície do pavimento são consideradas circulares;
- A pressão atuante na área de contato pneu/pavimento (pressão de contato) é suposta uniforme e igual à pressão de inflação do pneu (pi);
- A área de contato A entre cada pneu e a superfície do pavimento é igual à razão entre a carga incidente sobre a roda e a pressão de contato;

- O conjunto pavimento/subleito é assimilado a um semi-espaço constituído por único material perfeitamente elástico, homogêneo e isotrópico (modelo de Boussinesq);
- O coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) do conjunto pavimento/subleito é invariável com profundidade sendo igual a 0,50.

A pressão de contato equivalente ( $p_{eq}$ ) é obtida dividindo-se a carga da roda simples equivalente ( $P_{eq}$ ) pela área de contato  $A$ , ou seja:  $p_{eq} = P_{eq}/A$

Então se o carregamento corresponde a um eixo ou conjunto de eixos de rodas múltiplas,  $P$  e  $p_i$  são substituídos tornando a equação de dimensionamento (4):

$$e = \sqrt{P_{eq} \left[ \frac{1}{8,2.ISC} - \frac{1}{p_{eq}.\pi} \right]} \quad (4)$$

Os valores de  $P_{eq}$  e  $p_{eq}$  dependem da espessura “e” do pavimento, sendo assim o uso da equação acima para a determinação da espessura total do pavimento requerido sobre um subleito de Índice de Suporte Califórnia (ISC) conhecido implica em um procedimento iterativo.

Pereira (1985) em seu trabalho destacou os seguintes comentários:

- O critério adotado é o da máxima deflexão no topo do subleito;
- A espessura implícita de 34,3 cm é de modo geral inferior a de pavimentos flexíveis no Brasil destinados a tráfego pesado;
- O conjunto pavimento/subleito é associado a um semi-espaço de Boussinesq, com  $\mu = 0,50$ . O modelo em questão afasta-se bastante da hipótese mais simples aceitável para pavimentos reais, a qual consistiria em assemelhar a estrutura a um sistema elástico estratificado, com diversas camadas possuidoras de valores modulares e coeficientes de Poisson distintos.
- A pressão de inflação dos pneus, assumidos como sendo igual a 70 psi (4,9 kg/cm<sup>2</sup>), foi admitida como constante e independente da configuração de eixos e da carga incidente. Esse valor se considerado com os praticados nos dias atuais pode ser considerado como bastante conservador.
- Conclui-se que as curvas de projeto foram desenvolvidas com o nítido objetivo de assegurar proteção às camadas mais profundas do pavimento, em particular ao subleito contra deformações permanentes. Implica, portanto, que sua



aplicação não é adequada para resolução de problemas ligados à estimativa da vida de camadas betuminosas no que se refere à fadiga.

Sales et al. (1987) citam que em 1962 a USACE propôs os FEC para eixos simples com rodas simples ou duplas, eixos tandem-duplos e eixos tandem-triplos, conforme tabela 3.

Tabela 3 - FEC/USACE – Eixos: simples, tandem-duplos e tandem-triplos

<b>Peso por eixo (tf)</b>	<b>Simple</b>	<b>Tandem-duplo</b>	<b>Tandem-triplo</b>
<b>3,0</b>	0,020	0,007	-
<b>5,0</b>	0,100	0,050	0,020
<b>7,0</b>	0,500	0,170	0,060
<b>8,2</b>	1,000	-	Eixo-padrão
<b>9,0</b>	2,000	0,500	0,130
<b>11,0</b>	6,000	1,500	0,235
<b>13,0</b>	15,000	3,500	0,435
<b>15,0</b>	35,000	7,000	0,750
<b>17,0</b>	80,000	14,000	1,210
<b>19,0</b>	-	25,000	1,985
<b>21,0</b>	-	40,000	4,030
<b>23,0</b>	-	60,000	5,850
<b>25,0</b>	-	100,000	7,955
<b>27,0</b>	-	150,000	12,350
<b>29,0</b>	-	150,000	17,810
<b>31,0</b>	-	-	30,550
<b>33,0</b>	-	-	43,550
<b>35,0</b>	-	-	53,300
<b>37,0</b>	-	-	75,400

Fonte: Sales et al. (1987)

As equações originais dos FEC/USACE estão contidas no Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006), conforme quadro 4.

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

Quadro 4 – Equações do FEC/USACE

Fonte: DNIT, 2006

### 2.2.2 Fator de equivalência de cargas da AASHTO

Pereira (1992) cita que o grande esforço despendido ao longo das atividades da pista experimental da AASHO teve como objetivo principal estabelecer relações entre o comportamento dos pavimentos estudados, as respectivas estruturas e as cargas de tráfego aplicadas.

Conforme DNER (1998), o conceito de comportamento está ligado nas premissas de que um pavimento deve proporcionar ao usuário: conforto e segurança. Sua concepção está baseada em um procedimento no qual o usuário se julga servido pelo pavimento. O conceito de serventia está ligado à capacidade de um pavimento tem de possuir um rolamento suave, confortável e seguro, o que, em última análise, é a finalidade para a qual foi construído. É também a habilidade de um pavimento de servir ao tráfego com elevados volumes e altas velocidades.

A medição da serventia diz respeito diretamente ao usuário, que é influenciado por diversos atributos dos pavimentos, entre os quais:

- Resposta ao movimento caracterizado pela integração pavimento-veículo-homem para uma determinada velocidade;
- Resposta e aparência caracterizada por certos fatores como trincamentos, remendos, condições de acostamentos, etc.

Avaliações foram realizadas na pista experimental do órgão norte-americano por grupo de indivíduos que, trafegando em seções pavimentadas, conferiam graus em uma escala

variável de notas variando de cinco (muito bom) a zero (muito fraco) conforme alguns procedimentos:

- Das avaliações feitas pelos avaliadores em número de cinco, a média dos valores atribuídos por cada membro do grupo foi designada como sendo o Índice de Servetia Presente (ISP);
- Os avaliadores percorriam o segmento rodoviário da avaliação, em um veículo de passeio médio, a uma velocidade próxima da velocidade estabelecida (60 km/h); e
- As condições climáticas na ocasião do levantamento eram favoráveis. Conforme citado, as notas subjetivas variáveis no intervalo de 0 a 5, foram designadas como sendo um Valor de Serventia Atual (VSA) de acordo com os conceitos inseridos no quadro 5.

<b>Valor de Serventia Atual (VSA)</b>	<b>Conceitos</b>
0 a 1	Péssimo
1 a 2	Ruim
2 a 3	Regular
3 a 4	Bom
4 a 5	Ótimo

Quadro 5 – Valores da Serventia Atual (VSA)

Fonte: DNER, 1998

- Os segmentos avaliados tiveram extensões menores do que dois quilômetros. O VSA adotado foi a média dos resultados obtidos por avaliadores que ignoraram a análise, problemas geométricos, bem como problemas ligados à resistência de derrapagem, recalques em aterros e bueiros. Posteriormente, procurou-se estabelecer, através da análise de regressão múltipla, correlações entre os resultados da avaliação subjetiva efetuada e certos atributos medidos objetivamente, inerentes às condições de superfície dos pavimentos inspecionados.

Sales et al. (1987) observaram que a AASHTO, em 1974, formulou equações que representavam o fator de equivalência de uma carga P correspondente ao tipo de eixo. Estas equações são apresentadas a seguir.

Equações obtidas experimentalmente pela AASHTO (1974):

- Eixo simples de roda simples:

$$nss = \left( P_{ss} / 7,77 \right)^{4,32} \quad (5)$$

- Eixo tandem-duplo:

$$ntd = \left( P_{td} / 15,08 \right)^{4,14} \quad (6)$$

Equações obtidas por Treybirg e Von Quintus (1976 apud SALES et al., 1987):

- Eixo simples de roda duplas:

$$nsd = \left( P_{sd} / 8,17 \right)^{4,32} \quad (7)$$

- Eixo tandem-triplo:

$$ntt = \left( P_{tt} / 22,95 \right)^{4,22} \quad (8)$$

Balbo (1997) observou que não existe um critério universalmente aceito para o cálculo dos FEC, pois o pavimento pode apresentar ruptura determinada por diversos fatores. A utilização dos danos com base nas solicitações de tração nas fibras inferiores de camadas betuminosas e cimentadas, no que se refere à fadiga, pode resultar FEC entre cargas superiores aos tradicionais fatores tanto da metodologia da USACE como da AASHTO.

Balbo (1997) ainda ressalta que o FEC da AASHTO procura sanar tal aspecto por meio da diferenciação entre os FEC para pavimentos com diferentes Números Estruturais (SN) que na verdade não resolve por completo o problema, pois todos os fatores giram em torno da lei de quarta potência, não sendo muito diferentes entre si.

Albano (2005) cita que os FEC obtidos da equação geral de comportamento das pistas da AASHTO são influenciados pela estrutura do pavimento e, no caso da USACE, pela estrutura do pavimento e suporte do subleito.

Pinto e Preussler (2002) comentam que o FEC/AASHTO baseia-se na variação de serventia, dependendo do tipo de pavimento e do número estrutural (SN). Já o FEC/USACE

avalia os efeitos do carregamento considerando a deformação permanente (afundamento das trilhas de roda).

As maiores críticas ao cálculo do número N ocorrem devido aos procedimentos altamente empíricos nos quais está fundamentada a determinação dos FEC, expresso em dano relativo à configuração de uma padrão de 8,2 tf (TIMM E NEWCOMB, 2002 apud ALBANO, 2005). Os autores afirmam que pesquisas desenvolvidas em inúmeras pistas experimentais indicam que os FEC são dependentes do tipo de pavimento (flexível ou rígido), espessura do pavimento, tipo do conjunto de eixos e do valor da carga por eixo, pressão de inflação e condições ambientais.

Segundo Pinto e Preussler (2002) um pavimento bem projetado, apresenta ao usuário, após sua conclusão, um alto grau de serventia traduzido por 2 fatores: conforto e segurança. Com passar do tempo, sob efeito do tráfego e das intempéries, o pavimento vai diminuindo sua serventia, devido ao aparecimento de:

- a) deformações no seu perfil longitudinal e transversal devido a afundamentos de trilhas de roda.
- b) a presença de remendos que, num bom serviço de conservação corretiva rotineira vão substituindo as inevitáveis fissuras, afundamentos localizados e panelas.

### 2.3 Fator de veículos

Balbo (1997), define que a somatória dos valores ( $p_i \times \text{FEC}_{i,p}$ ) computados fornece o valor chamado FV ou fator de caminhão ou equivalência de operações, relativo ao perfil de tráfego verificado em pesagens por 100 veículos da amostra. O valor absoluto do fator de veículo será:

$$\text{FV} = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i \times \text{FEC}_{i,p})}{100} \quad (9)$$

Onde:

- $p_i$  é o valor da percentagem de eixos tabulados em relação ao número total de veículos e  $\text{FEC}_{i,p}$  é o cômputo do produto para cada porcentagem de eixo indicada.

Senço (1997) o define como sendo um fator que transforma o tráfego real, no sentido dominante, no período de projeto, em um tráfego equivalente de eixos padrão, podendo-se

considerar que, para um FV, relativo ao veículo, e sendo  $p_i$  a percentagem com que esse veículo contribui para o tráfego total  $V_t$ , o FV será:

$$FV_t = \frac{[\sum p_i \times FV_j]}{100} \quad (10)$$

Pinto e Preussler (2002) citam que a determinação de solicitação do tráfego para a vida de projeto pode ser obtida a partir do cálculo dos FV. Conhecendo-se os FV individuais (FV<sub>j</sub>), para as diferentes categorias de veículos, determinados numa estação de pesagem representativa da região, e das percentagens  $P_j$  com que estas categorias de veículos que ocorrem na estrada que está sendo considerada, tem-se que:

$$FV = \frac{\sum(P_j \times FV_j)}{100} \quad (11)$$

Os FV<sub>j</sub> para automóveis e caminhões leves, não são tão relevantes, interessando, especialmente os FV<sub>j</sub> para caminhões médios, pesados, reboques e semi-reboques.

Albano (2005) cita que o FV deve ser interpretado como o número equivalente de operações do eixo padrão provocado pelo deslocamento de um veículo médio representativo da frota. O FV representa também uma grandeza proporcional ao dano ou consumo provocado pela ação do tráfego sobre o pavimento, podendo se entender que as modificações importantes no FV de uma frota podem indicar uma alteração no desempenho esperado do pavimento devido a ações do tráfego não previstas.

## **2.4 Cargas máximas legais**

Tratar-se-á neste item das cargas máximas permitidas para trânsito de veículos comerciais definidas pelas legislações pertinentes.

### **2.4.1 Histórico**

A atual legislação referente à pesagem de veículos em vigor no Brasil é constituída por uma série de artigos cuja origem é o Decreto nº 62.127/68 que aprovou o Código Nacional de Trânsito. A partir deste, uma série de decretos e leis introduziram modificações na legislação

original. Em um breve resumo a legislação específica sobre o assunto teve a seguinte evolução histórica:

- Decreto n°. 62.127 de 16/01/1968 que aprovou o Regulamento do Código Nacional de Trânsito e estabeleceu as condicionantes para o transporte de cargas rodoviárias conforme mencionado acima esse Decreto ficou conhecido como a Lei da Balança (BRASIL, 1968).
- Lei n°. 7.408 de 25/11/1985 que estabeleceu uma tolerância máxima de 5% sobre o Peso Bruto Total (PBT) e Peso Bruto Transmitido por Eixo (BRASIL, 1985).
- Decreto n°. 98.933 de 07/02/1990 que alterou o limite do Peso Bruto Total Transmitido pelo ESRS e regulamentou o ETD constituído por dois eixos com seis rodas (BRASIL, 1990).
- Resolução n°. 12 de 06/02/98 que estabeleceu limites de peso e dimensões para veículos por vias terrestres (CONTRAN, 1998a).
- Resolução n°.62 de 21/05/98 que regulamentou o uso de pneus extralargos em eixos tandem de semi-reboques e reboques de suspensão pneumática (CONTRAN, 1998b).
- Resolução n°. 68 de 23/09/98 que estabeleceu os requisitos de segurança necessários à circulação de Composição de Veículos de Cargas (CONTRAN, 1998c).
- Resolução n°. 102 de 31/08/99 que estabeleceu os requisitos necessários à circulação de CVC's (CONTRAN, 1999a).
- Resolução n°. 104 de 21/12/99 que dispôs sobre a tolerância máxima de peso bruto de veículos e estabeleceu critério do PBT para aplicação de multas (CONTRAN, 1999b).

Pela importância dessa Resolução (n° 104/99), os seguintes artigos são transcritos:

Artigo 1° - “Enquanto não estiverem concluídos os estudos e pesquisas e atualização dos limites de peso por eixo, bem como não for fixada a metodologia de aferição de peso de veículos, serão adotados os critérios de Peso Bruto Total e Peso Bruto Total Combinado para aferição do peso para aplicação de multa isentando-se de multa os excessos de peso verificados nos eixos isolados ou conjunto de eixos.”

Artigo 2° - “Os limites de Peso Bruto Total e Peso por Eixo permanecem sendo aqueles estabelecidos nas Resolução n° 12/98 do CONTRAN”.

Artigo 3º - “O percentual de tolerância de 7,5% no Peso por Eixo permanecerá como o estabelecido na Resolução nº 102/99 do CONTRAN e o percentual de tolerância de 5% para o Peso Bruto Total e Peso Bruto Total Combinado permanece como estabelecido na Lei nº 7.408/85”.

Artigo 4º - “A fiscalização dos limites de peso, por meio do peso declarado na nota fiscal, será exercida somente naquelas rodovias desprovidas de equipamentos de pesagem”.

Artigo 5º - “Quando o peso aferido estiver igual ou inferior ao Peso Bruto Total ou Peso Bruto Total Combinado estabelecidos para o veículo acrescido da tolerância de 5% embora havendo excesso de peso em alguns dos eixos ou conjuntos de eixo, não será aplicada a multa. Nesse caso a carga deverá ser remanejada ou ser efetuado transbordo, de modo a que os excessos por eixo sejam eliminados”.

Parágrafo único – O veículo somente poderá prosseguir viagem depois de sanada a irregularidade.

Artigo 6º - “Quando o peso aferido estiver acima do Peso Bruto Total ou Peso Bruto Total Combinado estabelecido para veículo, acrescido da tolerância de 5%, aplicar-se-á multa correspondente com peso excedente a parcela relativa à tolerância”.

Parágrafo único – O veículo somente poderá prosseguir viagem depois de efetuado o transbordo.

Artigo 7º - “Nos casos de impossibilidade de remanejamento ou transbordo da carga será aplicado o disposto no artigo 275 e seu parágrafo único e demais dispositivo do Código de Trânsito Brasileiro aplicáveis ao assunto”.

- Resolução nº. 108 de 21/12/99 que dispôs sobre a responsabilidade pelos pagamentos de multas (CONTRAN, 1999c).
- Resolução nº. 144/2000 de 05/05/2000 que complementou a Resolução nº 104/99 e autorizou uma tolerância de 5,0% sobre o peso bruto declarado na Nota Fiscal (CONTRAN, 2000).
- Resolução nº. 164/04 de 10/09/2004 que estabeleceu dispensas de Autorização Especial de Trânsito (AET), para os veículos com Peso Bruto Total Combinado (PBTC) superior a 45 toneladas e até 57 toneladas, desde que tenham no máximo 7 eixos e comprimento máximo de 19,80 m e mínimo de 17,50 m (CONTRAN, 2004).
- Resolução nº. 185/05 de 21/10/2005 que alterou as Resoluções 12/98 e 68/98 e que de acordo com o item b do Inciso I do Artigo 2º permitiu CVC com PBTC



de até 57 toneladas, com duas ou mais unidades, incluída a unidade tratora (CONTRAN, 2005).

O quadro 6 mostra uma síntese da evolução das cargas máximas admissíveis no Brasil, de acordo com Decretos, Leis e Resoluções do CONTRAN.

Tipos de Eixos	Decreto 62.127/68	Lei 7.408/85	Decreto 98.933/90	Resolução 104/90	Resolução 164/04
	Cargas Máximas (kg)	Cargas Máximas (kg) 5% tolerância PBT e eixos (c/ multa)	Cargas Máximas (kg)	Cargas Máximas (kg) 5% tolerância PBT (c/ multa) e 7,5% eixos (s/ multa)*	Cargas Máximas (kg)
Simplex de Roda Simplex (direcional)	5.000	5.250	6.000	6.450	
Simplex de Roda Dupla c/ 4 pneus	10.000	10.500	10.000	10.750	
Tandem Duplo c/ 8 pneus 1,20m < d ≤ 2,40m	17.000	17.850	17.000	18.275	
Não em tandem 1,20m < d ≤ 2,40m			15.000	16.125	
Dois eixos (6 pneus) 1 eixo com 4 pneus 1 eixo com 2 pneus 1,20m < d ≤ 2,40m			13.500	14.512	
Tandem Triplo 1,20m < d ≤ 2,40m	25.500	26.780	25.500	27.413	
PBT	45.000	47.250	45.000	47.250	57.000**

\* Acima desse limite torna-se obrigatório transbordo de carga

\*\* Acima desse limite somente com Autorização Especial de Trânsito

#### Quadro 6 – Resumo da evolução das cargas máximas admissíveis no Brasil

Esta alteração da configuração legal, que ordena as relações e regras de trânsito no país, ainda está em processo de adaptação pela população de usuários do sistema através de mudanças nos hábitos dos condutores de veículos, pedestres e autoridades, seguramente direcionados no sentido de uma necessária diminuição dos conflitos existentes.

Por último, no ano (2014) a CONTRAN regulamentou, através da Resolução n.º. 489, de 5 de junho de 2014, novas regras para o carregamento de veículos comerciais. Na nova resolução, a tolerância de sobrecarga por eixo passa a ser de 10%, isso quando o veículo está dentro dos 5% de limite para o peso bruto total (PBT). Quando o veículo estiver acima deste limite, a tolerância é 7,5%.

É importante lembrar que o veículo pode ser autuado duas vezes em uma única passagem pela balança rodoviária, uma pelo excesso de peso do Peso Bruto Total (PBT) e

outra pelo excesso nos eixos. Para melhor interpretação da nova resolução é apresentado o quadro 7.

PBT, PBTC ou CMT	Tolerância por eixo	
Abaixo de 5,0% não será autuado	Tolerância de 10,0%	Abaixo de 10,0% não será autuado
		Acima de 10,0% será autuado
Acima de 5,0% será autuado	Tolerância de 7,5%	Abaixo de 7,5% não será autuado
		Acima de 10,0% será autuado pela segunda vez

Quadro 7 – Limites da Resolução n°. 489/2014 da CONTRAN

Por exemplo, se um veículo comercial, com capacidade de carga de 23,00 toneladas, pesar 24,15 toneladas na balança, ele está dentro dos 5% de tolerância. Então, seu eixo dianteiro, que pode levar até 6,00 ton, não é multado se pesar até 6,60 toneladas (10% a mais). Para os traseiros, que levam 17 ton, o limite fica em 18,70 toneladas. Ou seja, é perceptível que não pode-se considerar o limite para colocar carga extra, pois se somar 6,60 + 18,70, tem-se 25,30 ton, logo o peso total passa dos 5%.

Se o mesmo veículo estiver com 25 toneladas, ele já ultrapassa a tolerância de 5%, então o limite por eixo baixa para 7,5%, ou seja, 6,45 toneladas no dianteiro e 18,27 toneladas nos traseiros.

A resolução atesta ainda que para quem estiver com até 5% de excesso em peso bruto, só haverá transbordo ou remanejamento a partir de 12,5% de excesso nos eixos. Até este limite, o veículo será apenas multado. Para quem estiver com excesso acima de 5% de peso bruto, valem as regras antigas.

No que se refere à área de legislação, particularmente sobre o transporte de cargas, encontra-se uma literatura técnica ampla dentre a qual destacam-se, além do texto da Lei 9.503/97, as seguintes publicações com informações e comentários: Coletânea de Legislação de Trânsito (PORTÃO, 2000) e Código de Trânsito Brasileiro (1997).

#### 2.4.2 Código de trânsito brasileiro

Em 23/09/1997, após longa tramitação no Congresso Nacional, foi sancionada pelo Presidente da República a Lei n°. 9503/1997 que institui o novo Código de Trânsito Brasileiro (CTB), que entrou em vigor em 22/01/98, transcorrido cento dias de sua publicação no Diário

Oficial da União (BRASIL, 1997). Essa alteração da configuração legal que ordenou as relações do trânsito no Brasil, objetivou mudanças no sentido óbvio de melhorar o sistema anteriormente vigente.

Segundo as resoluções vigentes em âmbito nacional, o quadro 8 mostra os limites de cargas no Brasil.

Limite Máximo de PBT.	57,0 tf
Limite máximo de peso bruto por eixo simples com roda simples (ESRS).	6,0 tf
Limite máximo de peso bruto por eixo simples com roda dupla (ESRD).	10,0 tf
Limite máximo de peso bruto por eixo tandem duplo, quando a distância entre dois planos verticais que contenham os centros da roda for superior a 1,20 m ou inferior a 2,40 m.	17,0 tf
Limite máximo de peso bruto por eixo tandem triplo (somente do tipo semi-reboque), quando a distância entre três planos verticais que contenham os centros da roda for superior a 1,20 m ou inferior a 2,40 m.	25,5 tf

Quadro 8 – Limites de cargas no Brasil

Fonte: Resoluções 104/90 e 164/04 do CONTRAN

Observações:

- Os limites máximos de carga por eixo tandem equipado com pneu extralargo são de 17,0 tf e 25,5 tf, respectivamente, para eixos tandem-duplos e tandem-triplos.
- Nenhum veículo ou combinação de veículo poderá transitar com PBT ou PBTC superior ao fixado pelo fabricante, nem ultrapassar a capacidade máxima de tração da unidade tratora.

Uma das características do Código de Trânsito Brasileiro que tem recebido maior destaque nas discussões da sociedade, principalmente nos primeiros anos de vigência, é em relação ao rigor das penalidades, não só pelo valor pecuniário das multas, mas também por outras consequências, como a pontuação que pode implicar na suspensão do direito de dirigir.

Pode-se admitir que o CTB ainda está em processo de aperfeiçoamento, necessitando maiores discussões por especialistas e pela sociedade. Como exemplo pode-se citar a necessidade de regulamentação e implementação da inspeção veicular. A missão do CTB é boa, pois sem legislação nada pode se fazer no sentido de melhorar o sistema. Observa-se, na exposição de motivos ao presidente da República feita pelo Ministro da Justiça (BRASIL,

1993) quando do encaminhamento do projeto de Lei, que o novo Código, além de dar novas atribuições, poderes e responsabilidade aos órgãos responsáveis pelo trânsito, visa a segurança uma vez que está focado no seguinte princípio: “o trânsito seguro passa a ser um direito de cidadania”.

A legislação aponta os seguintes conceitos e limites de carga com interesse para a presente dissertação:

- Peso Bruto Total é o peso máximo que o veículo pode transmitir ao pavimento, considerando a tara mais a lotação (carga máxima útil);
- Peso Bruto Total Combinado (PBTC) e/ou Capacidade Máxima de Tração (CMT) é o peso máximo que pode ser transmitido ao pavimento pela combinação de um caminhão trator mais seu semirreboque ou de caminhão trator mais seu reboque;
- São considerados eixos tandem, dois ou mais eixos que constituam em conjunto integral de suspensão, podendo ou não qualquer deles ser motriz;
- O limite máximo do PBT ou PBTC é de 450 kN (45tf);
- O limite máximo do peso bruto por eixo simples isolados, equipado com rodado duplo é de 100 kN (10tf);
- O limite máximo de peso bruto por eixo simples isolado, equipado com rodado simples é de 60 kN (6 tf);
- O limite máximo de peso bruto por eixo tandem duplo, quando a distância entre dois planos verticais que contenham os centros das rodas foi superior a 1,20 m ou inferior (ou igual) a 2,40 m é de 170 kN (17tf);
- O limite máximo do peso bruto por eixo tandem triplo (aplicável somente para semirreboques), quando a distância entre os três planos verticais que contenham os centros das rodas for superior a 1,20 m e inferior (ou igual) a 2,40 m é de 255 kN (25,5 tf);
- Os limites máximos de carga por eixo tandem equipado com pneu extralargo são de 160 kN e 240 kN, respectivamente, para eixos em tandem duplo e triplo.

## 2.5 Análise empírico-mecanística de pavimentos flexíveis

O dimensionamento de maneira adequada é fundamental para o bom desempenho de pavimentos asfálticos, a fim de assegurar que a passagem dos eixos dos veículos não venham a provocar trincamento excessivo da camada de revestimento dentro do período de projeto, além de garantir que as espessuras e características das camadas que o compõem sejam capazes de minimizar os efeitos gerados pelo afundamento de trilha de roda (FRANCO, 2007).

Atualmente, existem dois métodos de dimensionamento de pavimentos tradicionalmente utilizados, o método semi-empírico e o método empírico-mecanístico, ou seja, o dimensionamento de pavimentos vem tomando novos rumos com o passar dos anos.

O método de dimensionamento do DNER, baseado nos métodos do USACE (United States Army Corps of Engineers) e da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), dimensiona a estrutura do pavimento com o objetivo de proteger o subleito contra deformações plásticas excessivas durante a vida útil de projeto. Este método, pelo fato de ter extrapolações numéricas, não é considerado puramente empírico, e sim, um método semi-empírico. No Brasil, sua utilização se mostra eficaz pela incomum ocorrência de danos por afundamento de trilha de roda de grande magnitude. No entanto, o método necessita de complementações com análises que considerem no dimensionamento o problema do trincamento por fadiga nas camadas asfálticas de pavimentos flexíveis. Para garantir essa análise com eficiência o procedimento mais adequado é a modelagem empírico-mecanística. Essa nova modelagem além de ser baseada em propriedades mecânicas do solo, ela também traz propriedades dos materiais de pavimentação, possibilitando, dessa forma, a melhoria no dimensionamento da estrutura do pavimento (BRASIL, 2006; HONG, PEREIRA E PROZZI, 2006).

Os resultados da análise estrutural do pavimento (tensões, deformações e deslocamentos), com o uso do sistema empírico-mecanístico, devem ser comparados com critérios pré-definidos, visando garantir que as deformações permanentes e trincamentos por fadiga sejam evitados (BENEVIDES, 2000 apud BERNUCCI et al., 2008; MOTTA, 1991 apud BERNUCCI et al., 2008).

A análise empírico-mecanística busca uma solução mais adequada aos projetos rodoviários, procurando apresentar uma análise o mais real possível da solicitação do tráfego em campo, ou seja, em cada uma das rodovias para qual se pretende executar um novo pavimento ou até mesmo uma restauração.

Medina e Motta (2005) sugerem um roteiro para o dimensionamento empírico-mecanístico, apresentado da seguinte forma:

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

No método empírico-mecanístico, o dimensionamento de pavimentos flexíveis baseia-se pelo diagrama apresentado na figura 5. O diagrama mostra esquematicamente os dados de entrada (fatores ambientais, tráfego, materiais e técnicas construtivas), o processamento por via empírico-mecanística e os critérios de decisão que devem se integrar de forma a evitar que a degradação por qualquer tipo de ruptura atinja valores maiores que os estabelecidos para o trecho específico, antes de alcançar o número N de projeto. No dimensionamento mostrado no esquema, parte-se das espessuras admitidas e calcula-se o estado de tensões e deformações, os quais são comparados aos valores limites estabelecidos. Por meio de várias interações e tentativas, atinge-se a uma estrutura satisfatória. Cabe lembrar que o procedimento é genérico e pode ser utilizado para qualquer estrutura, sendo que os ajustes particulares são feitos na consideração do tráfego e no método de cálculo das tensões e deformações (MEDINA e MOTTA, 2005).

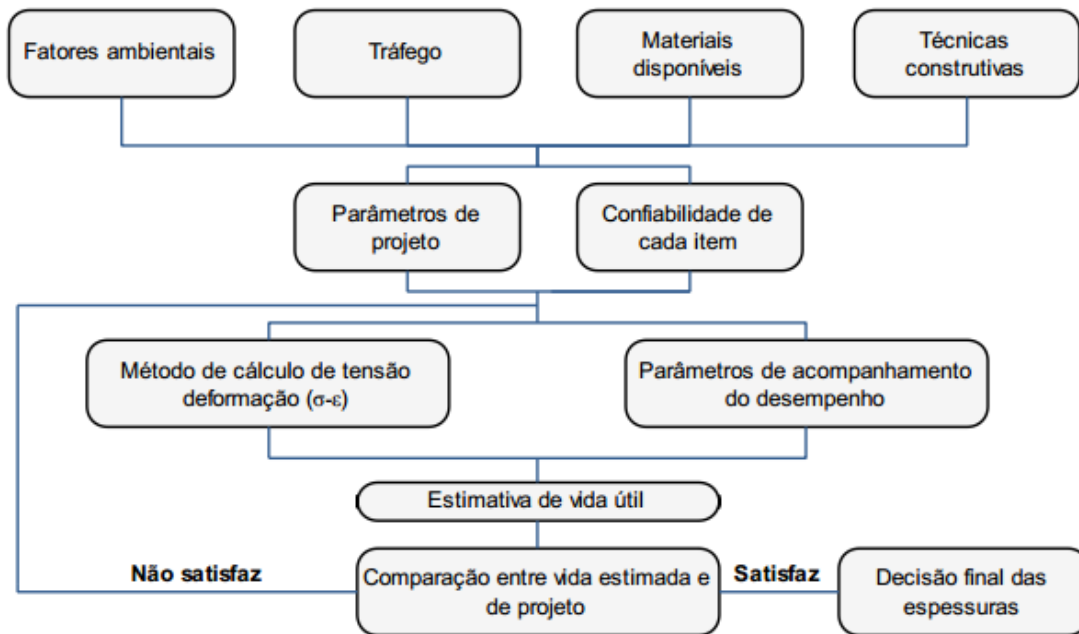


Figura 5 - Diagrama de dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos

Fonte: Adaptado de MEDINA e MOTTA, 2005

Mesmo com a criação de programas computacionais como Paviflex, SisPav, Guia de Projetos da AASHTO, Pave, etc., que calculam pavimentos por métodos empírico-mecanísticos, a maioria dos projetos realizados atualmente são feitos por meio da análise semi-empírica, com base no CBR. O dimensionamento por métodos empírico-mecanísticos ainda não está muito difundido, principalmente no Brasil, devido haver uma cultura muito grande do uso de métodos semi-empíricos, aliado pela falta de uma metodologia de cálculo de simples compreensão que gere uma percepção confiável de resultados (FRANCO, 2007).

Sabe-se também que, em um projeto de pavimento, o tráfego é um dos principais parâmetros de dimensionamento da espessura das camadas. Em todos os projetos, um estudo de tráfego deve ser realizado a fim de definir a demanda que a via deverá satisfazer com o nível de serviço especificado. Medina e Motta (2005) afirmam isso apontando que uma das dificuldades no dimensionamento de pavimentos é a previsão da evolução do tráfego ao longo do tempo e avaliação do poder de destruição que exercem as várias cargas a diferentes níveis de repetição.

Portanto, a dificuldade de previsão da evolução do tráfego e seu respectivo poder de destruição, em conjunto com a falta de metodologias adequadas de dimensionamento fazem com que o Brasil, cada vez mais, apresente problemas em suas rodovias, gerando desconforto e, principalmente, insegurança aos usuários.

### 2.5.1 Mecânica dos pavimentos

Um pavimento pode ser definido como um sistema de múltiplas camadas semi-infinitas destinado à: distribuir os esforços verticais e horizontais oriundos do tráfego, proteger as camadas inferiores das intempéries e proporcionar aos usuários uma superfície segura e regular de maneira a permitir o deslocamento com segurança e economia (MEDINA e MOTTA 2005, PAPAGIANNAKIS e MASSAD, 2008).

Os pavimentos, de maneira geral, são classificados em dois tipos diferentes, em função do seu comportamento estrutural (BALBO, 2007):

- a) Flexíveis: é o pavimento no qual a absorção de esforços se dá de forma dividida entre várias camadas, onde as tensões verticais em camadas inferiores concentram-se em regiões próximas da área de aplicação da carga. O termo refere-se ao comportamento do pavimento, pois em termos de tensões, por exemplo, um pavimento semi-rígido apresenta um comportamento flexível à medida que sua camada cimentada degrada;
- b) Rígidos: é o pavimento no qual uma camada, absorvendo grande parcela de esforços horizontais solicitantes, gera pressões verticais bastante aliviadas e bem distribuídas sobre camadas inferiores. O termo também se refere ao comportamento. Se um revestimento asfáltico for muito espesso e apresentar módulo de resiliência muito acima dos padrões normais, podendo conceber comportamento rígido ao pavimento;

Balbo (1993) apresenta a diferença de aplicação de carga em pavimento rígido e flexível (Figura 6). A aplicação de cargas em pavimentos flexíveis gera um campo de tensões concentrado nas proximidades da aplicação da carga. Já em pavimentos rígidos, o campo de tensões é mais disperso e a distribuição de cargas é semelhante em toda a dimensão da placa.



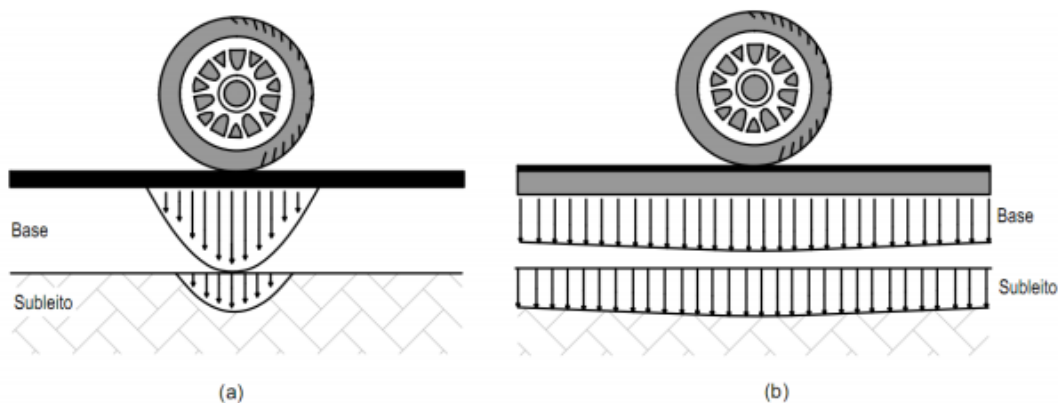


Figura 6 - (a) campo de tensões de pavimento flexível; (b) campo de tensões de pavimento rígido.

Fonte: adaptado de Balbo, 1993

É importante para escolha da estrutura a utilizar fazer-se uma análise do tráfego atuante, ou seja, fazer uma análise aprofundada de quais os veículos predominantes no local, avaliando assim de forma mais adequada qual a estrutura para cada situação, visando sempre o bom desempenho e a vida útil do pavimento, evitando-se intervenções precocemente.

Balbo (2007) ressalta que a escolha do tipo de pavimento e dos materiais a serem utilizados é um fator limitante na concepção de um projeto rodoviário para as agências e operadores viários e está diretamente relacionada com a minimização de custos. A boa pesquisa e respectiva escolha de materiais disponíveis na região em conjunto com a dificuldade de extração e transporte desses materiais são aspectos fundamentais em uma obra de pavimentação.

Segundo Franco (2007, p. 23), “a estrutura de um pavimento asfáltico é representada por um meio estratificado, submetido a um carregamento superficial distribuído em uma área circular podendo ser modelada por meio da teoria da elasticidade”. A figura 7 apresenta a forma mais comum de representação de um pavimento e as principais deformações e deslocamentos atuantes no interior da estrutura.

Outro fator a ser relatado é quanto à deformação permanente, causadora do afundamento de trilha de roda. Dependendo da magnitude das cargas do tráfego e da resistência relativa das camadas do pavimento, a deformação permanente pode ocorrer no subleito, nas camadas de base ou nas camadas asfálticas utilizadas como revestimento. A vulnerabilidade dessas camadas variam nas diferentes épocas do ano. Por exemplo, a deformação permanente no revestimento asfáltico é mais comum durante os meses quentes do verão do que no inverno, enquanto que as camadas granulares de base tornam-se mais

susceptíveis aos afundamentos em épocas chuvosas. Outro fator importante é o nível de tensão numa camada individual do pavimento, o qual é função das espessuras das camadas e dos materiais utilizados, e também das cargas aplicadas pelos veículos pesados.

Entretanto, uma causa comum de ATR é a deformação permanente associada à camada de revestimento asfáltico, especialmente em rodovias de tráfego pesado, com elevadas cargas por eixo e alta pressão de pneus. Muitos destes afundamentos podem ser atribuídos à dosagem imprópria da mistura asfáltica (ROBERTS et al., 1996). O emprego de quantidades excessivas de ligante asfáltico é um dos grandes causadores do ATR. Isto se deve ao fato de que o maior volume de asfalto irá agir como lubrificante e reduzir o atrito interno e o intertravamento do esqueleto pétreo da mistura. HOFSTRA e KLOMP (1972) também mostraram que a deformação no concreto asfáltico era maior próximo à superfície solicitada e gradualmente se reduzia com a profundidade. Este decréscimo foi atribuído, na época, ao aumento da tensão confinante com a profundidade, o que resultava em maior resistência ao escoamento plástico, e também à diminuição das tensões cisalhantes. A resistência ao ATR também foi relacionada com a espessura do revestimento asfáltico. UGE e VAN DE LOO (1974) relataram que a deformação nesta camada não cresce com o aumento de sua espessura a partir de um determinado limiar (aproximadamente 13 cm). Em outras palavras, revestimentos asfálticos com espessuras inferiores a 13 cm deformarão mais quanto maior a sua espessura.

No entanto, em revestimentos com espessuras maiores do que este limite, o seu aumento não exerce influência no afundamento. Medidas feitas nas pistas da AASHO mostraram que o ATR apresenta valor máximo em espessuras de aproximadamente 25 cm de concreto asfáltico. Camadas mais espessas, por sua vez, não apresentaram afundamento adicional. Estes resultados sugerem que o aumento de espessura em revestimentos delgados contribui para o desenvolvimento de trilhas de roda, oriundas desta camada.

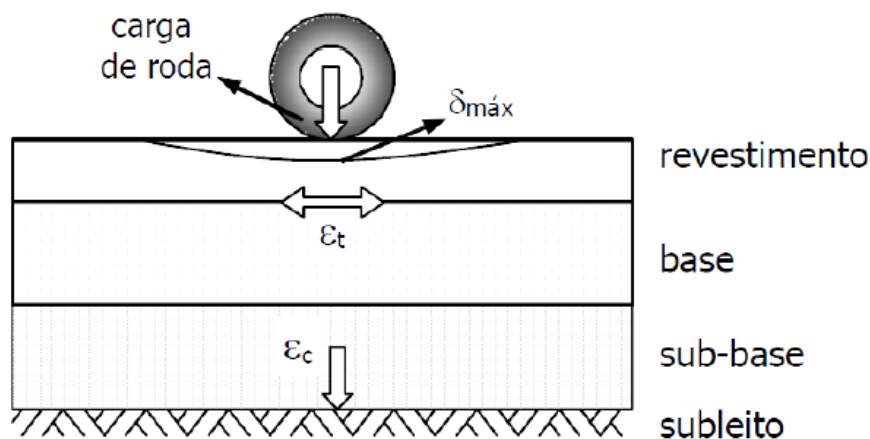


Figura 7 – Tensões, deformações e deslocamentos em um pavimento asfáltico

Fonte: Franco, 2007

Outro fator relevante na estrutura do pavimento é o efeito acumulado de fadiga, o qual começou a ser estudado por Miner. No seu estudo, o pesquisador analisou o efeito acumulado de fadiga de estruturas metálicas utilizadas em aviões (MINER, 1945 apud MEDINA, 1997). A teoria apresentada pelo pesquisador diz que a carga cíclica senoidal foi aplicada nos corpos-de-prova, a diferentes razões de tensões de tração mínimas e máxima, admitindo-se que todo o trabalho aplicado contribui para a fadiga e que o início de uma trinca corresponde a ruptura. O pesquisador aplicou níveis de tensões tais que a ruptura ocorresse a mais de  $10^7$  ciclos.

Miner (MINER, 1945 apud MEDINA, 1997) estabeleceu que a ruptura da peça solicitada dinamicamente ocorre quando:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (12)$$

Onde:  $n_i$  é o número de ciclos aplicados de tensão máxima e  $N_i$  é o número que provoca a ruptura, por meio de uma carga  $P_i$ .

Por meio desta teoria pode-se tirar como conclusão que na trilha de roda na fibra inferior do revestimento asfáltico a trinca surja quando se tenha a condição expressa na equação 12. Onde, neste caso,  $N_i$  é o número de repetições de carga  $P_i$  que causa a ruptura incipiente e  $n_i$  é o número de repetições esperado de  $P_i$  na vida de projeto. Devido o módulo de resiliência da mistura asfáltica variar com a temperatura,  $N_i$  ficará em função do estado de rigidez no momento da solicitação. Ainda, o estado de tensões varia de posição em função do

modo de aplicação da carga (transversal e longitudinal) e com a velocidade do veículo (MONISMITH e DEACON, 1969 apud MEDINA, 1997).

Para aplicação dos modelos para avaliar a deformação permanente e a fadiga é de importância conhecer cada um dos parâmetros utilizados para sua respectiva aplicação, principalmente a metodologia aplicada para o cálculo do número N.

Como exemplo, têm-se os modelos mais utilizados para estas análises como sendo a do Instituto do Asfalto dos Estados Unidos - MS-1, de 1969 e reeditado pela nona vez em 1991, com o objetivo de avaliar a deformação permanente no topo do subleito; e para avaliar a deformação de tração da fibra inferior do revestimento tem-se o modelo da FHWA (Federal Highway Administration). Em ambos os casos, o número N conhecido para aplicação dos modelos é o calculado pela metodologia FEC da AASHTO, com base na pista experimental da AASHO (atual AASHTO).

O modelo mais difundido no Brasil é o proposto por FRANCO (2007), com a finalidade de analisar a deformação de tração na fibra inferior do revestimento. Este modelo, por ser considerado brasileiro, leva em conta o número N calculado pela metodologia FEC da USACE, mesma utilizada pelo DNIT (2006) para dimensionamento de pavimentos.

### 2.5.2 Softwares de dimensionamento de pavimentos

O guia proposto pela AASHTO/2002 é um dos métodos mais conhecido para dimensionamento de pavimentos. Sua abordagem empírico-mecanística permite avaliar o comportamento estrutural dos pavimentos de forma coerente e analítica, sendo isso, fruto da calibração de modelos teóricos com dados experimentais obtidos em campo e laboratório.

De acordo com o relatório do NCHRP (2004), o guia proporciona um conjunto de procedimentos para o dimensionamento de pavimentos novos e reabilitados, tanto do tipo flexível como do tipo rígido. O formato empírico-mecanístico permite trabalhar com uma estrutura para que contínuos melhoramentos sejam feitos no futuro, acompanhando, assim, as mudanças nos veículos, materiais, técnicas de construção, conceitos de projetos, tecnologia de computadores, etc. O guia está dividido em quatro partes distintas e apêndices:

- Parte I: apresenta uma visão global sobre o guia, abrangendo desde os objetivos até a previsão do desempenho do pavimento;
- Parte II: apresenta definições e procedimentos de como obter os dados de entrada necessários para projetos novos ou de reconstrução, bem como de reabilitação;

- Parte III: inclui um material detalhado para auxiliar na compreensão do usuário dos conceitos usados no desenvolvimento do guia e na aplicação adequada dos procedimentos de dimensionamento;
- Parte IV: aborda como o processo empírico-mecanístico pode ser utilizado no dimensionamento de pavimentos sujeitos a baixos volumes de tráfego;
- Apêndices A a D: contém informações detalhadas sobre algumas considerações adicionais de projeto, como por exemplo: lista com diretrizes para comparação de estratégias alternativas de dimensionamento; informações sobre análises econômicas das estratégias e um guia do usuário do software.

Nas últimas décadas a vida útil do pavimento foi verificada em bases semi-empíricas e expressa em termos de número equivalente de solicitações do eixo padrão de 8,2 toneladas, usando a lei da quarta potência para converter o tráfego misto em cargas equivalentes por eixo. Com a tendência de substituição da tradicional base semi-empírica pela empírico-mecanística, vários métodos de dimensionamento foram desenvolvidos sendo o mais conhecido o da AASHTO/2002, proposto pelo National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) no projeto 1-37A, que introduziu uma nova forma para a caracterização do tráfego: os espectros de carga por eixo (Axle Load Spectra).

O método de dimensionamento proposto pelo NCHRP é uma mudança radical do método semi-empírico. O método utiliza a partir da quantificação das características de tráfego usando diretamente todas as cargas por eixo, sendo possível analisar os impactos das variações das cargas de tráfego no pavimento e promover um adequado dimensionamento da estrutura do pavimento (JIANG et al., 2008).

O Guia AASHTO/2002 contém procedimentos para o dimensionamento e análises de todos os tipos de pavimentos, novos ou reabilitados (flexível, rígido e semi-rígido). Quando há possibilidade, as metodologias de dimensionamento para vários tipos de pavimentos são integrados, de forma que o dimensionamento de reforços não favoreça propriamente qualquer tipo de pavimento. Quanto ao dimensionamento de reforços de pavimento, o guia enfatiza da seguinte maneira:

- Procedimentos para avaliação de pavimentos existentes;
- Recomendações nos tratamentos de reabilitação, drenagem superficial e melhorias na fundação;
- Procedimentos nas análises dos custos do ciclo de vida e análises de tráfego;
- Procedimentos de calibração para condições locais;

- Orientação para as instituições desenvolverem manuais de procedimentos;
- Acessos hierárquicos que possam promover múltiplas ações de dimensionamentos, dependendo da classe rodoviária.

Os Guias antigos para Dimensionamento de Estruturas de Pavimentos de AASHTO serviram por quase quatro décadas, existindo, então, sérias limitações para continuidade dos seus usos atualmente. Segundo Peterlini (2006), essas limitações podem ser:

- Procedimentos de dimensionamento de reforços não foram considerados na pista experimental na AASHO (atual AASHTO). Atualmente, as necessidades são veementes em termos de dimensionamento de reforços;
- A pista experimental se localizava numa área geográfica específica, Ottawa, Illinois, norte dos Estados Unidos, com dificuldades de simular os efeitos de diferentes condições climáticas de outras regiões nas performances dos pavimentos.
- Somente um tipo de subleito foi usado para todas as seções de testes da pista experimental. Existem muitos outros tipos dentro do próprio Estados Unidos;
- Somente bases granulares densas não-estabilizadas foram incluídas nas principais seções do pavimento. Diferentes tipos de bases são agora usados frequentemente em todo o mundo;
- Veículos, suspensões, configurações de eixos e tipos de pneus eram representativos dos usados no final dos anos 50. Grande maioria está em desuso nos dias de hoje;
- Nenhum sistema de drenagem profunda foi incluído nas seções da pista experimental.

Segundo Peterlini (2006), outra grande diferença entre os procedimentos anteriores da AASHTO com os atuais é a magnitude entre a pista experimental e as modernas rodovias atuais no que se refere ao carregamento. Na pista experimental houve a aplicação de cerca de 10 milhões de carga-eixo; menor do que os carregamentos que sofrem os modernos pavimentos em seus primeiros anos de uso devido ao elevado crescimento do tráfego de veículos nos últimos anos.

As equações básicas originais dos primeiros procedimentos foram baseadas nas análises de regressões estatísticas dos dados da pista experimental. Desse modo, aplicações dos procedimentos para modernos fluxos de tráfego, têm significado aos projetistas, criatividade e experiência muito além dos dados básicos das pesquisas realizadas há muito

tempo. Claramente, os resultados têm mostrado que os projetistas têm dimensionado com carregamentos muito altos, resultando em significativas perdas econômicas (PETERLINI, 2006).

Mais uma grande extrapolação foi sobre a vida de projeto. A pesquisa foi de curta duração, logo, os efeitos de longo prazo das condições climáticas e envelhecimento dos materiais não foram considerados. As pesquisas da pista experimental da AASHO duraram apenas 1 ano e 1 mês, enquanto vidas de projetos para muitos dos pavimentos atuais são de 20 a 50 anos.

Peterlini (2006) relata em seu trabalho que os procedimentos da AASHTO/1973/1986/1993 relacionam a espessura dos revestimentos para análise de desempenho. Porém, critérios de desempenhos observados nos pavimentos têm revelado que muitos deles necessitam reabilitações pelo fato de não estarem diretamente relacionadas às espessuras do revestimento, como por exemplo, afundamento de trilha de roda, trincas térmicas, etc. A medida primária do desempenho dos pavimentos nos procedimentos anteriores era o Índice de Serventia Atual (PSI) e o fator dominante dessa serventia era, sem dúvida, o tráfego.

Para melhorar a confiabilidade no dimensionamento de pavimentos e encontrar as necessidades de gerenciamento, os critérios devem se ater aos mesmos fatores de desempenho. Para ajudar a diminuir esses problemas se utiliza, por exemplo, o Índice de Rugosidade Internacional (IRI) como um dos critérios de desempenho (PETERLINI, 2006).

O projeto NCHRP além de proporcionar o Guia de Projetos da AASHTO/2002 para dimensionamento de estruturas de pavimentos novos e reabilitados, possui um software computacional, conhecido como MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide). Além do MEPDG outros softwares já foram desenvolvidos ou estão sendo desenvolvidos.

No Brasil, um dos softwares mais conhecidos e de fácil manuseio é o SisPav, criado por FRANCO (2007), na COPPE, no Rio de Janeiro.

O software SisPav foi desenvolvido com o objetivo de realizar análises e dimensionamentos de estruturas de pavimentos segundo os conceitos relativos ao estado da arte da mecânica dos pavimentos. Um dos critérios definidos foi o de criar uma interface de fácil utilização, com entrada de dados simplificada e com valores sugeridos para fins de anteprojeto.

O SisPav utiliza a teoria da elasticidade, por meio de um programa analítico de Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC. A abordagem da análise elástica não linear

é realizada de forma simplificada, com a divisão das camadas com este comportamento em três subcamadas.

Duas opções de análise são possíveis de serem realizadas. A primeira delas é o dimensionamento da estrutura propriamente dito, em que o programa analisa os dados de entrada e, por meio um algoritmo similar ao de busca binária em tabela ordenada, encontra a espessura da camada que atenda os requisitos de projeto. A segunda análise só realiza uma verificação dos dados e requisitos definidos pelo projetista e informa a vida de projeto que a estrutura pode suportar.

Nas duas análises o programa verifica os danos acumulados por fadiga no revestimento asfáltico ou, se for o caso, na base das camadas cimentadas, além da verificação da tensão limite no topo do subleito. O programa fornece também as estimativas de deformação permanente das camadas do pavimento.





### 3 MÉTODO DA PESQUISA

#### 3.1 Planejamento da pesquisa

A concepção da presente pesquisa constitui-se, primeiramente, na coleta de dados de tráfego de rodovias concessionadas das Regiões Sul e Sudeste do Brasil, na plena intenção de calcular a taxa de crescimento anual de cada uma das rodovias, atualizando-os em função, principalmente, do volume de veículos. Além disso, em uma segunda etapa, é apresentado um estudo de caso da BR 116, onde busca-se propor diferentes cenários nos veículos comerciais e diferentes taxas de crescimento (real e do DNIT), para posterior dimensionamento de pavimentos novos e reforços. Por fim, realiza-se uma análise de custo dos pavimentos. Portanto, a pesquisa busca gerar novos dados que permitam ajudar os projetistas de estruturas de pavimentos, visando uma melhor e mais segura avaliação do tráfego brasileiro.

Um fluxograma resumido dos procedimentos a serem seguidos na pesquisa é apresentado na figura 8, com intuito de melhor explicar a metodologia de trabalho.

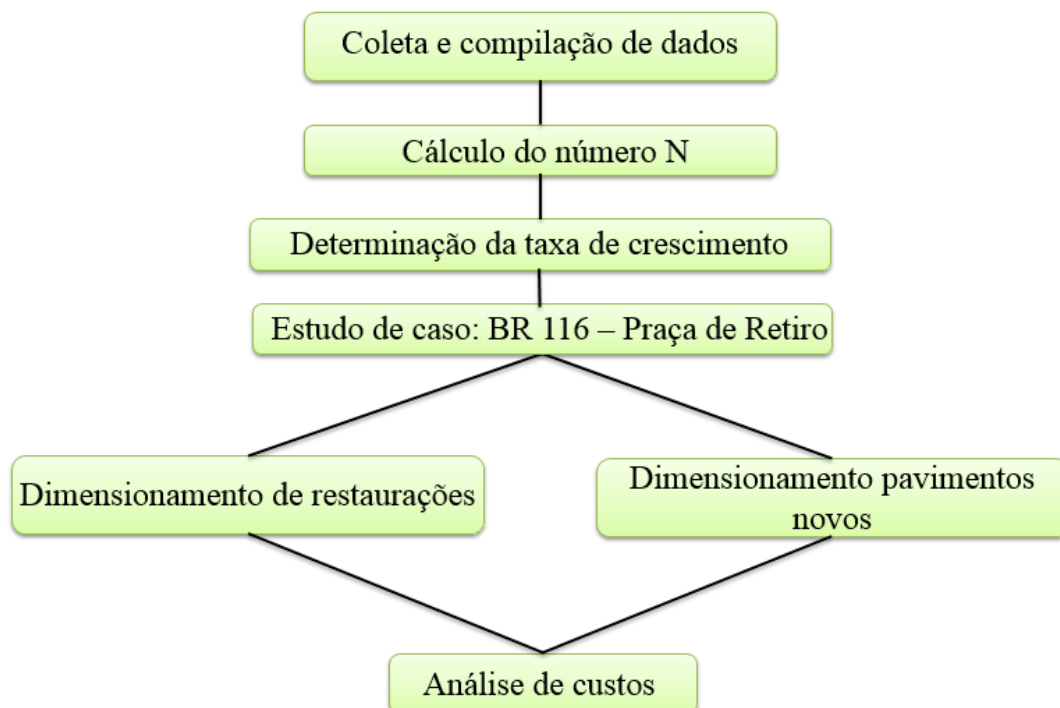


Figura 8 - Fluxograma de pesquisa

Os dados de tráfego das rodovias são fornecidos pelas Empresas Concessionárias de Rodovias do Estado do Rio Grande do Sul e do Estado do Rio de Janeiro, sendo as praças de

pedágio (contagem classificatória do tráfego) P1, P2 e P3 situadas na região metropolitana do Estado do Rio Grande do Sul; as praças P7, P8 e P9, P10 e P11 na região Sul do Rio Grande do Sul; as praças P4 e P5 situadas no Rio de Janeiro; e a praça P6 situada em Minas Gerais. Cada uma das séries históricas contém o volume de tráfego por categoria de veículo, para todos os meses de cada ano, desde 1997 até 2013, a depender da praça. O quadro 9 apresenta a localização das praças de pedágio das rodovias de onde foram obtidos os dados, bem como o período de série histórica considerado.

<b>Praça</b>	<b>Localização</b>	<b>Estado</b>	<b>Período Série Histórica de Dados</b>
<b>P1</b>	BR 290 - km 19 - Santo Antônio da Patrulha	RS	2009 - 2013
<b>P2</b>	BR 290 - km 77 - Gravataí	RS	2009 - 2013
<b>P3</b>	BR 290 - km 110 - Eldorado do Sul	RS	2009 - 2013
<b>P4</b>	BR 040 - km 104 - Duque de Caxias	RJ	1997 - 2012
<b>P5</b>	BR 040 - km 45 - Petrópolis	RJ	1997 - 2012
<b>P6</b>	BR 040 - km 816 - Simão Pereira	MG	1997 - 2012
<b>P7</b>	BR 392 - km 111 - Glória	RS	2002 - 2013
<b>P8</b>	BR 116 - km 510 - Retiro	RS	2001 - 2013
<b>P9</b>	BR 116 - km 430 - Cristal	RS	2001 - 2013
<b>P10</b>	BR 392 - km 52 - Capão Seco	RS	2001 - 2013
<b>P11</b>	BR 116 - km 541 - Pavão	RS	2002 - 2013

Quadro 9 – Localização e período de série histórica de cada praça de pedágio

Para melhor identificação, a figura 9 mostra a localização por região das praças de pedágio no Brasil e nas figuras 10, 11 e 12 são apresentados mapas com a localização de cada uma das praças de pedágio em estudo na sua área de concessão.

Os dados fornecidos pelas empresas concessionárias contêm as séries históricas de valores anuais de tráfego, divididos em categorias de veículos, para cada uma das praças de pedágios. Para fins de exemplo, as tabelas 4 e 5 apresentam série histórica de volume de tráfego fornecida pela concessionária para praça de pedágio de Retiro, no km 510 da BR 116, no Estado de Rio Grande do Sul.

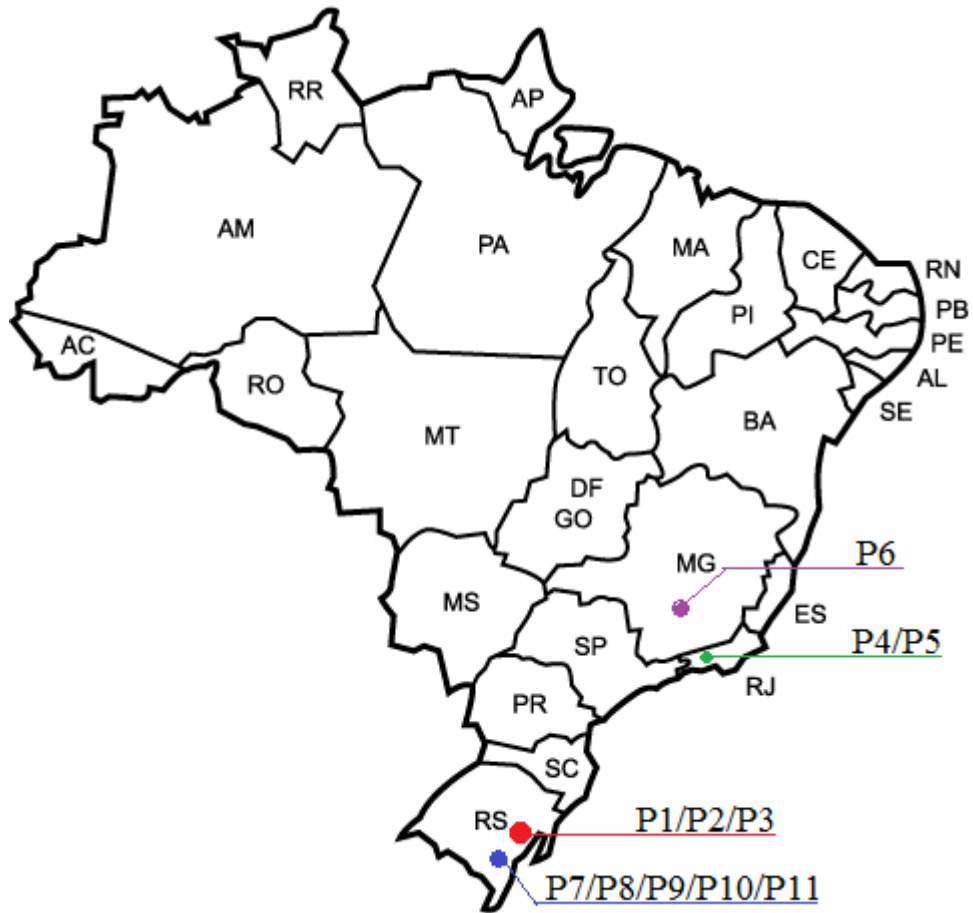


Figura 9 - Mapa do Brasil com localização regional das praças de pedágio

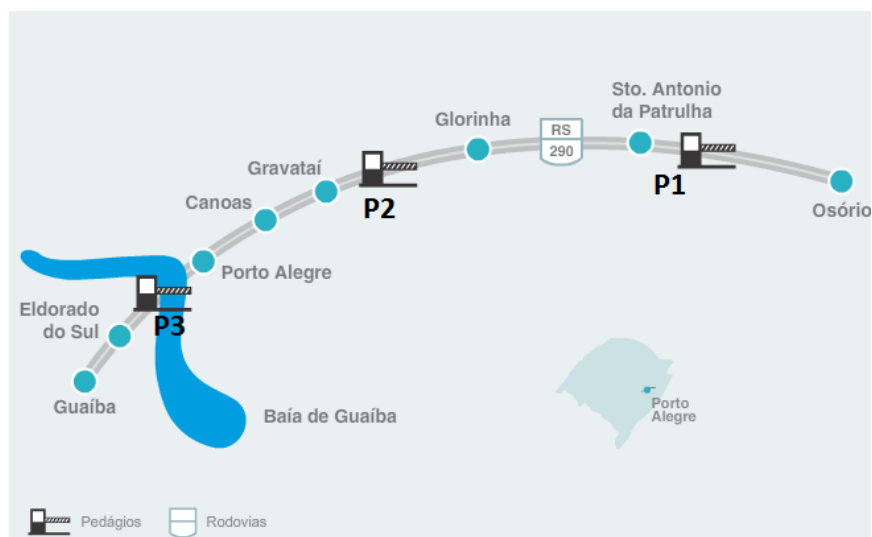


Figura 10 - Mapa de localização das praças P1, P2 e P3

Fonte: Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (2014)

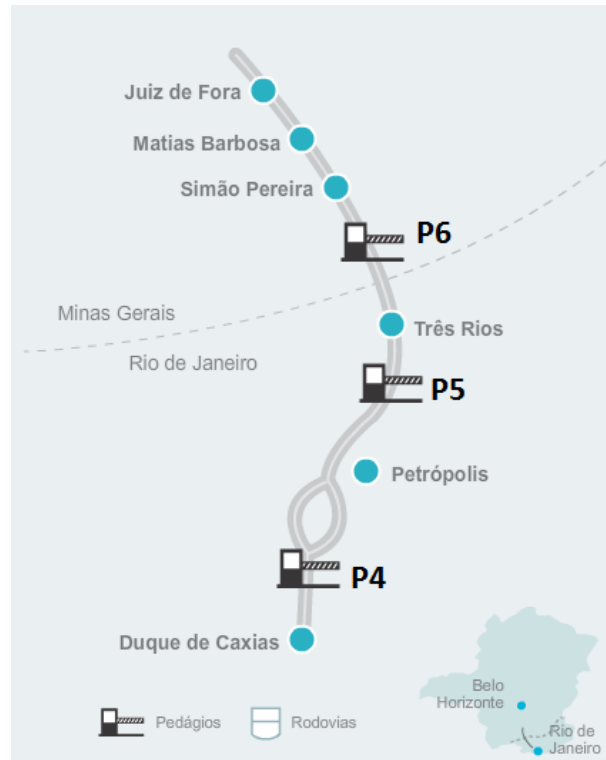


Figura 11 - Mapa de localização das praças P4, P5 e P6

Fonte: Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (2014)

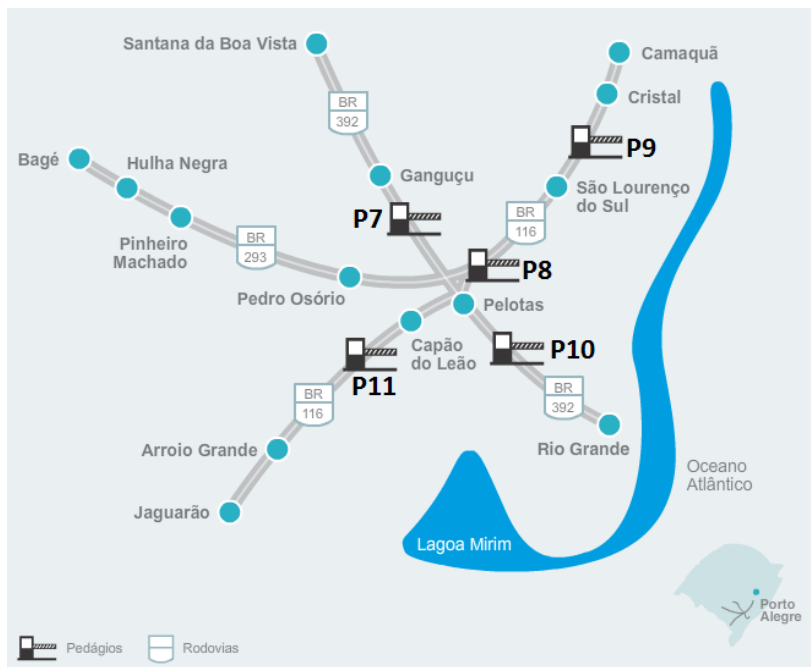


Figura 12 - Mapa de localização das praças P7, P8, P9, P10 e P11

Fonte: Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (2014)

Tabela 4 – Série histórica de volume de tráfego (2001 – 2007) – Praça Retiro/RS – BR 116

CAT/ANO	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>CAT1</b>	754.521	920.243	880.247	936.110	915.181	930.586	1.027.580
<b>CAT2</b>	216.798	267.734	262.292	208.856	205.658	192.516	203.697
<b>CAT3</b>	5.567	7.345	8.629	9.736	8.289	7.668	8.258
<b>CAT4</b>	176.743	201.271	191.795	235.141	213.153	193.429	205.201
<b>CAT5</b>	1.194	1.241	1.541	1.723	1.637	1.423	2.130
<b>CAT6</b>	105.218	126.075	127.732	23.366	25.536	22.599	29.418
<b>CAT7</b>	159.540	165.954	189.623	270.491	227.582	204.235	220.803
<b>CAT8</b>	44.152	50.868	63.816	105.243	106.157	101.971	127.921
<b>CAT 10</b>	3.020	4.531	11.037	18.978	16.844	16.475	17.031
<b>CAT 11</b>	112	130	179	36	23	13	47
<b>CAT 12</b>	725	1.119	2.081	4.036	3.419	3.111	4.057
<b>CAT 15</b>	1.112	1.301	2.083	2.163	2.911	2.039	7.504
<b>TOTAL</b>	<b>1.468.702</b>	<b>1.747.812</b>	<b>1.741.055</b>	<b>1.815.879</b>	<b>1.726.390</b>	<b>1.676.065</b>	<b>1.853.647</b>

Tabela 5 - Série histórica de volume de tráfego (2008 – 2013) – Praça Retiro/RS – BR 116

CAT/ANO	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<b>CAT1</b>	1.154.721	1.226.491	1.356.221	1.444.486	1.545.412	1.650.844
<b>CAT2</b>	197.743	193.593	204.264	208.883	210.472	217.749
<b>CAT3</b>	9.934	9.229	8.899	12.625	12.694	9.626
<b>CAT4</b>	209.782	193.738	206.858	207.884	207.158	228.612
<b>CAT5</b>	3.100	2.329	2.128	2.419	2.454	1.874
<b>CAT6</b>	33.147	30.943	34.430	39.627	39.985	43.999
<b>CAT7</b>	216.433	184.032	171.330	169.572	157.788	156.135
<b>CAT8</b>	148.696	145.309	180.232	190.528	196.311	225.244
<b>CAT 10</b>	21.596	19.376	19.545	18.712	21.667	22.584
<b>CAT 11</b>	319	423	532	372	430	551
<b>CAT 12</b>	5.871	3.907	5.331	6.324	8.333	8.698
<b>CAT 15</b>	8.418	6.296	275	10	10	12
<b>TOTAL</b>	<b>2.009.760</b>	<b>2.015.666</b>	<b>2.190.045</b>	<b>2.301.442</b>	<b>2.402.714</b>	<b>2.565.928</b>

### 3.2 Cálculo do número N

O número N é o número de repetições dos eixos dos veículos equivalentes às solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf durante o período de vida útil do pavimento. Na equação do número N (equação 13) busca-se encontrar o valor do número N, com crescimento linear.

$$N = 365 \times VDM \times \left( \frac{(1+P.t)^2 - 1}{2.t} \right) \times Fv \times Ff \times Fs \times Fd \times Fc \quad (13)$$










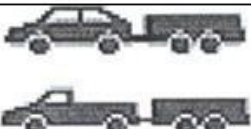














Onde cada um dos fatores da equação são apresentados conforme segue.

O VDM médio anual total fornecido é dividido por 365 dias, a fim de obter o VDM diário, total e por categoria de veículo. Cabe lembrar que são considerados veículos comerciais os veículos das categorias 2, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12 e 15, conforme quadro 10. Os demais são considerados veículos de passeio.

Depois de obtidos os valores de VDM diários, define-se a configuração dos veículos no âmbito da pesquisa. Para isso, no quadro 10 é apresentada a configuração dos veículos por categoria, em função do número de eixos.

Outro fator interveniente no cálculo do número N é o Fv (Fator de Veículo). Os valores dos Fv finais são obtidos pelos valores totais de equivalência de cada tipo de veículo, dividindo-se pelo número de cada um deles. Ou seja, o fator de veículo transforma um veículo qualquer, com um carregamento qualquer, em uma quantidade de solicitações equivalente do eixo padrão de 8,2 toneladas que causaria o mesmo efeito destrutivo no pavimento. Para isso faz-se necessário o cálculo do FEC (Fator de Equivalência de Carga).

Para determinação do FEC realiza-se a separação de cada conjunto de eixo, onde é possível depurar cada tipo de eixo por veículo em: eixo simples de roda simples (ESRS) ou eixo dianteiro; eixo simples de roda dupla (ESRD); eixo tandem duplo (ETD); e eixo tandem triplo (ETT). A tabela 6 mostra a quantidade de eixos considerada em cada uma das categorias, com base no quadro 10. É importante ressaltar que conforme quadro 10 os veículos das categorias 1, 3 e 5 são de passeio, por isso da desconsideração de seus eixos.

CATEGORIA	TIPO	EIXOS	RODAGEM	MODELO
<b>1</b>	Automóvel Caminhonete Furgão	2		
<b>2</b>	Caminhão Leve Furgão Caminhão-trator	2		
<b>3</b>	Automóvel com semi-reboque Caminhonete com semi-reboque	3		
<b>4</b>	Caminhão Caminhão-trator Caminhão-trator c/ semi-reboque Ônibus	3		
<b>5</b>	Automóvel com reboque Caminhonete com reboque	4		
<b>6</b>	Caminhão com reboque Caminhão trator c/ semi-reboque	4		
<b>7</b>	Caminhão com reboque Caminhão trator c/ semi-reboque	5		
<b>8</b>	Caminhão com reboque Caminhão trator c/ semi-reboque	6		
<b>10</b>	Caminhão com reboque Caminhão trator c/ semi-reboque	7		
<b>11</b>	Caminhão com reboque Caminhão trator c/ semi-reboque	8		
<b>12</b>	Caminhão com reboque Caminhão trator c/ semi-reboque	9		
<b>15</b>	Caminhão com reboque Caminhão trator c/ semi-reboque	10		

Quadro 10 - Configuração dos veículos por categoria



Tabela 6 – Número de eixos considerados em cada categoria

Categoria	Eixos de Veículos			
	ESRS <sup>1</sup>	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

<sup>1</sup> - Eixo Dianteiro

No cálculo dos FEC são utilizadas as equações originais da USACE, também usadas pelo DNIT (2006). Cabe lembrar que também são calculados os valores de N com as equações de FEC da AASHTO, com o objetivo de encontrar a relação  $N_{USACE}/N_{AASHTO}$ , com o intuito, também, de analisar a influência dos dois métodos no valor do número N.

O quadro 11 mostra as equações da USACE utilizadas para o cálculo do FEC, as mesmas utilizadas pelo DNIT (2006). Já o quadro 12 mostra as equações utilizadas pela AASHTO para determinação do FEC.

Já o Fator de Frota (Ff) define-se pela porcentagem do VDM que é constituída exclusivamente de veículos comerciais circulantes em cada uma das rodovias. Para cada ano é realizada a correlação entre o total de veículos comerciais de um ano com o total de veículos do mesmo ano, dividindo-se o primeiro pelo segundo.

Outro fator, o qual tem finalidade de definir a porcentagem de veículos que trafegam em um sentido, é o Fator de Sentido (Fs). Para as rodovias em estudo, quando a praça é unidirecional utiliza-se o Fator de Sentido igual a 1,0. Já para as rodovias bidirecionais, utiliza-se o Fator de Sentido igual a 0,5. Ou seja, considera-se que metade do volume dos veículos circulam em um sentido.

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

Quadro 11 - Fatores de Equivalência de Carga da USACE

Fonte: DNIT (2006)

<b>Tipo de eixo</b>	<b>FEC (P em tf)</b>
<b>Simple de rodagem simples</b>	$FEC = (P/7,77)^{4,32}$
<b>Simple de rodagem dupla</b>	$FEC = (P/8,17)^{4,32}$
<b>Tandem-duplo</b>	$FEC = (P/15,08)^{4,14}$
<b>Tandem-triplo</b>	$FEC = (P/22,95)^{4,22}$
P = Carga por eixo	

Quadro 12 - Equações dos FEC da AASHTO

Fonte: DNER, 1998

Já o Fator de Distribuição (Fd) tem por finalidade definir a porcentagem de veículos comerciais que trafegam na faixa mais carregada, normalmente a faixa da direita. Para definição deste fator são obtidos os números de faixas por sentido de cada rodovia, onde, para pesquisa, se optou por utilizar os fatores médios dos propostos pelo DNIT (2006) para a distribuição dos veículos comerciais na faixa de projeto. O quadro 13 apresenta os fatores propostos pela norma e os fatores considerados nesta pesquisa.

<b>N. Faixas/Sentido</b>	<b>Fd (DNIT)</b>	<b>Fd considerado</b>
<b>1</b>	1,0	1,0
<b>2</b>	0,7-0,96	0,83
<b>3 ou mais</b>	0,5-0,96	0,73

Quadro 13 – Fator de distribuição (Fd)

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

O quadro 14, por sua vez, apresenta o Fator de Distribuição utilizado em cada uma das praças de pedágio, bem como o número de faixas e a caracterização quanto ao sentido (unidirecional ou bidirecional).

<b>Praça</b>	<b>Unidirecional ou Bidirecional</b>	<b>N° de Faixas por sentido</b>	<b>Fd utilizado</b>
<b>P1</b>	Unidirecional	3	0,73
<b>P2</b>	Bidirecional	3	0,73
<b>P3</b>	Unidirecional	2	0,83
<b>P4</b>	Bidirecional	2	0,83
<b>P5</b>	Bidirecional	2	0,83
<b>P6</b>	Bidirecional	2	0,83
<b>P7</b>	Bidirecional	1	1
<b>P8</b>	Bidirecional	1	1
<b>P9</b>	Bidirecional	1	1
<b>P10</b>	Bidirecional	1	1
<b>P11</b>	Bidirecional	1	1

Quadro 14 – Características das praças de pedágio em estudo quanto sentido e faixas de tráfego

Por último, tem-se o Fator de Clima (Fc). Este fator considera a variação de umidade dos materiais constituintes dos pavimentos durante um ano. Para esse fator, costumeiramente, utiliza-se o valor de 1,0. Logo, optou-se por utilizar esse valor para todas as praças em estudo.

Com todos os fatores apresentados consegue-se, então, definir o número N anual de cada uma das praças de pedágio para cada ano da série histórica.

Ressalta-se que para o posterior dimensionamento dos pavimentos novos e de restaurações, para o estudo de caso da BR 116 – Praça Retiro são utilizados os mesmos procedimentos para o cálculo do número N.

### **3.3 Determinação da taxa de crescimento**

Além de obter o Número N de cada rodovia para cada ano da série histórica, tem-se também por finalidade fornecer a taxa de crescimento do tráfego anual em função do número N, comparando-a com a taxa de crescimento fornecida pelo DNIT (2006) para dimensionamento de pavimentos. Segundo o DNIT (2006, p. 234), “a experiência mostra que

o tráfego costuma crescer a taxas anuais de variação relativamente lenta. Ultimamente tem sido comum adotar, à falta de informações de variáveis socioeconômicas, uma taxa de crescimento anual de 3%, próxima da taxa de crescimento econômico do país como um todo, o que resulta em uma função exponencial”.

Para a pesquisa, buscou-se encontrar a taxa de crescimento linear de cada ano para as praças de pedágio em estudo adotou-se a equação (14):

$$t(\%) = \left( \frac{N_n - N_{n-1}}{N_n} \right) \times 100 \quad (14)$$

Onde:

t – Taxa de crescimento em porcentagem;

$N_n$  – Valor de número N no ano n;

$N_{n-1}$  – Valor de número N no ano (n-1).

Para melhor representar o comportamento linear da forma do crescimento do tráfego é apresentada a figura 13.

Busca-se, ainda, fazer uma correlação entre variação do tráfego com valores de variação do PIB e da venda de caminhões do país, por meio de séries históricas. Por fim, por meio da taxa de crescimento média de tráfego de cada uma das regiões, calcula-se o número N futuro para cada praça de pedágio em estudo, aplicando-se uma projeção de 10 anos. Este valor é comparado com o número N calculado com a taxa de crescimento do DNIT, com a mesma projeção.

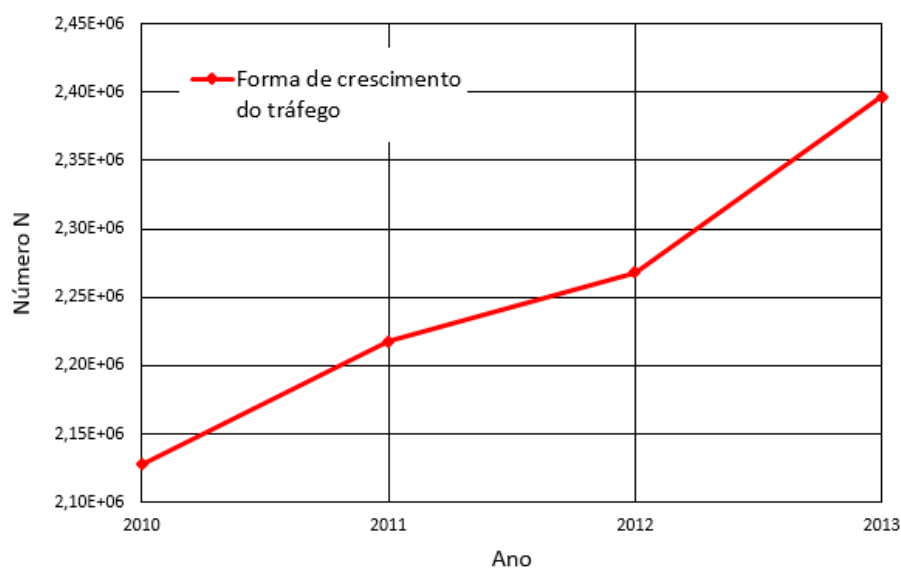


Figura 13 – Comportamento linear da forma do crescimento de tráfego

### 3.4 Dimensionamento de pavimentos novos

Para esta etapa da pesquisa é realizado um estudo de caso de BR 116 – Praça de Retiro, utilizando então o VDM do último ano (2013) para o cálculo do número N pela metodologia USACE, e adotado um período de projeto de 10 anos. Além disso, nesta etapa faz-se necessária a definição da porcentagem de veículos com sobrecarga e a porcentagem de sobrecarga em veículos comerciais. Por último, quanto à taxa de crescimento, são utilizados dois valores: a taxa de crescimento proposta pelo DNIT e a taxa de crescimento média da rodovia em estudo. Portanto, primeiramente antes do dimensionamento são definidos diferentes cenários que envolverão as seguintes variáveis: porcentagem de veículos com sobrecarga, porcentagens de sobrecarga nestes veículos e diferentes taxas de crescimento.

Para isso, com base em um estudo realizado no Rio Grande do Sul, PRIME (2013), é possível definir a porcentagem de veículos com sobrecarga e a porcentagem de sobrecarga em veículos comerciais. O estudo mostra que em torno de 9,63% de veículos trafegam com alguma sobrecarga em algum eixo e que a sobrecarga nesses veículos apresenta uma média de 9,31%. Ainda, segundo o estudo 3,48% dos veículos apresentaram uma sobrecarga média de 14,7% no segundo eixo.

Em vista disso, para o presente estudo busca-se trabalhar com diferentes porcentagens de veículos com sobrecarga e diferentes porcentagens de sobrecarga nesses veículos. Propõe-se trabalhar com três fatores diferentes em cada uma dessas variáveis (5%, 10% e 15% de veículos com alguma sobrecarga; 10%, 15% e 20% de sobrecarga nestes veículos), além de considerar duas taxas de crescimento diferentes, a taxa de crescimento média encontrada para a praça de Retiro neste estudo (4,86%) e a taxa proposta pelo DNIT (3,00%).

Outro fato importante a ser relatado é a carga por eixo a ser utilizada. Seguindo o pressuposto do estudo (LASTRAN e DAER, 2003), define-se que 80% da frota trafega com carga máxima no valor máximo estabelecido pelo CTB, sem considerar a tolerância de 10% e que 20% dos veículos trafegam vazios na busca de carga ou retornando para as bases. A partir deste, mantém-se constante os veículos vazios e variam-se as porcentagens de veículos com sobrecarga e a sobrecarga nestes veículos. A carga por eixo para os veículos vazios foi considerada como a carga mínima por eixo apresentada por Balbo (2007), sendo para ESRS = 0,5 tf; ESRD = 1,0 tf; ETD = 4,0 tf; ETT = 5,0 tf. Para os demais veículos foi considerada a carga máxima legal e acrescida às respectivas sobrecargas nas respectivas porcentagens de veículos. Para melhor representar, o quadro 15 apresenta as cargas e sobrecargas de cada eixo utilizadas no presente estudo.

Cargas e Sobrecargas	Eixos			
	ESRS	ESRD	ETD	ETT
<b>CML (tf)</b>	6,00	10,00	17,00	25,50
<b>Carga mínima (tf)</b>	0,50	1,00	4,00	5,00
<b>10% SC (tf)</b>	6,60	11,00	18,70	28,05
<b>15% SC (tf)</b>	6,90	11,50	19,55	29,33
<b>20% SC (tf)</b>	7,20	12,00	20,40	30,60

CML = Carga Máxima Legal; SC = Sobrecarga

Quadro 15 – Cargas e sobrecargas utilizadas no estudo

Partindo dos pressupostos já apresentados, os cenários para dimensionamento de pavimentos deste estudo ficam dispostos da seguinte maneira, conforme quadro 16.

Cenários	% Veículos com CML	% Veículos com SC	% SC	% Veículos vazios	T.C. (%)
1	80	0	0	20	3,00
2	80	0	0	20	4,86
3	75	5	10	20	3,00
4	75	5	10	20	4,86
5	75	5	15	20	3,00
6	75	5	15	20	4,86
7	75	5	20	20	3,00
8	75	5	20	20	4,86
9	70	10	10	20	3,00
10	70	10	10	20	4,86
11	70	10	15	20	3,00
12	70	10	15	20	4,86
13	70	10	20	20	3,00
14	70	10	20	20	4,86
15	65	15	10	20	3,00
16	65	15	10	20	4,86
17	65	15	15	20	3,00
18	65	15	15	20	4,86
19	65	15	20	20	3,00
20	65	15	20	20	4,86

CML = Carga Máxima Legal; SC = Sobrecarga; T.C. = Taxa de Crescimento

Quadro 16 – Cenários considerados para pesquisa

Ressalta-se ainda que o dimensionamento dos pavimentos novos é realizado em duas etapas: Na primeira etapa é utilizado o método consagrado do DNIT criado pelo antigo DNER (1981). Em uma segunda etapa, é realizada uma análise empírico-mecânica dos

pavimentos, a qual tem por finalidade determinar a espessura do revestimento, com relação aos principais mecanismos de degradação, sendo eles as deformações permanentes e trincamento por fadiga, prevendo assim o desempenho do pavimento. Para esta etapa se utilizará da Ferramenta AEMC do software SiPav para encontrar os valores de deformação de tração na fibra inferior do revestimento e da deformação vertical no topo do subleito.

Para ambas as etapas é definida uma estrutura típica de pavimento composta com materiais usuais do estado do RS. O quadro 17 apresenta os materiais e seus respectivos valores de coeficiente de poisson e módulo de resiliência. Cabe ressaltar que são estudados três cenários diferentes de CBR de subleito: CBR = 4%, CBR = 10% e CBR = 16%.

Camada	Material da Camada	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Aderência
Revestimento	CBUQ	5000	0,30	Não Aderido
Base	BGS	250	0,35	Aderido
Sub-Base	Macadame Seco	300	0,35	Aderido
Sub-leito	Solos finos, siltosos ou argilosos	40/100/160 <sup>1</sup>	0,40	Aderido

<sup>1</sup> Varia de acordo com CBR

Quadro 17 – Características dos materiais constituintes do pavimento

### 3.4.1 Dimensionamento pelo método do DNIT

O método do DNIT para o dimensionamento de pavimentos flexíveis desenvolve-se por meio da ordem colocada a seguir:

(1º) A partir da observação da figura 14, devem-se adotar as simbologias apresentadas de modo a determinar a espessura de cada camada do pavimento.

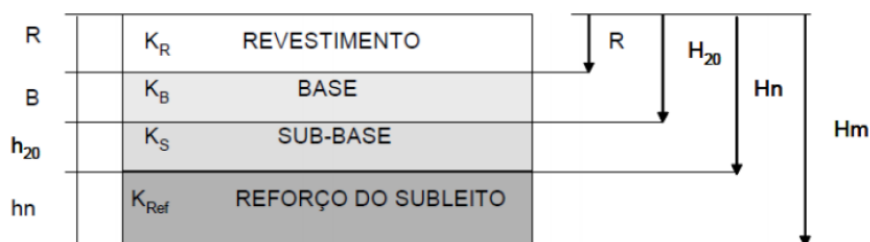


Figura 14 – Espessuras do Pavimento

Fonte: DNIT (2006)

Onde:

- $K_R$  é o coeficiente de equivalência estrutural do pavimento;
- $R$  é a espessura do revestimento;
- $K_B$  é o coeficiente de equivalência estrutural da base;
- $B$  é a espessura da base;
- $H_{20}$  é a espessura de pavimento necessária para proteger a sub-base;
- $K_S$  é o coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;
- $h_{20}$  é a espessura da sub-base;
- $H_n$  é a espessura de pavimento necessária para proteger o reforço do subleito;
- $K_{Ref}$  é o coeficiente de equivalência estrutural do reforço do subleito;
- $h_n$  é a espessura do reforço do subleito;
- $H_m$  é a espessura total de pavimento necessária para proteger o subleito.

(2º) A equação 15, apresentada a seguir, tem sua importância na definição das espessuras de  $H_{20}$ ,  $H_n$  e  $H_m$  do pavimento. Deve-se ressaltar que os valores obtidos são função direta do número  $N$  e do CBR da camada cuja proteção contra a ruptura se quer efetuar.

$$H_t = 77,67 * N^{0,0482} * CBR^{-0,598} \quad (15)$$

Onde:  $N$  - número equivalente de solicitações do eixo rodoviário de 8,2 tf calculado pela metodologia FEC/USACE.

Observações:

- Aconselha-se a utilização de um CBR igual a 20% para a sub-base, mesmo que na realidade esse valor venha a ser superior. Admite-se tal critério porque a espessura requerida para a segurança da sub-base somente é alcançada com seu CBR em 20%.
- A utilização desta fórmula é recomendada quando o número  $N$  atinge valores maiores que  $10^6$ . Distanciando-se desta condição, verifica-se um superdimensionamento dos pavimentos que apresentam número  $N$  muito reduzido, da faixa de  $N \leq 10^5$ .



(3º) A determinação das espessuras da base (B), sub-base (h20) e reforço do subleito (hn), advém do emprego das inequações 16, 17 e 18 relacionadas na sequência.

$$R * KR + B * KB \geq H20 \quad (16)$$

$$R * KR + B * KB + h20 * KS \geq Hn \quad (17)$$

$$R * KR + B * KB + h20 * KS + hn * Kref \geq Hm \quad (18)$$

Caso ocorra o valor de 40% para o CBR da sub-base concomitantemente a um número  $N \leq 10^6$ , deve-se substituir H20 por  $H20 * 0,8$ , enquanto que se o número  $N \geq 10^7$  recomenda-se a substituição de H20 por  $H20 * 1,20$ .

Na intenção de amenizar as causas da ruptura do revestimento e proteger a base dos carregamentos impostos pelo tráfego, adotam-se, em função do número N, as espessuras e os tipos de revestimentos encontrados na tabela apresentada no quadro 18.

<b>N</b>	<b>Espessura mínima de revestimento betuminoso</b>
$N \leq 10^6$	Tratamento superficial
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimento betuminoso com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Quadro 18 – Espessura mínima de revestimento betuminoso

Fonte: DNIT (2006)

Conforme observado nas inequações apresentadas anteriormente, há inseridos nas mesmas, coeficientes de equivalência estrutural no cálculo da espessura de cada camada. O coeficiente de equivalência estrutural, quadro 19, corresponde a uma relação, em termos de suporte de carga, entre o material escolhido para integrar determinada camada do pavimento e o material granular padrão. É por meio dessa relação que se tem uma prévia do comportamento estrutural do material selecionado.

Componentes do pavimento	K
Revestimento de concreto betuminoso – CBUQ	2,00
Revestimento pré- misturado a quente, de graduação densa – PMQ	1,80
Revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa – PMF	1,40
Revestimento betuminoso por penetração – PMAF, MB, TSS, TSD, TST	1,20
Camada de materiais granulares – BGS, MH, BC, SB	1,00
Material estabilizado com cimento, resistência a compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm <sup>2</sup>	1,70
Material estabilizado com cimento, resistência a compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm <sup>2</sup> e 28 kg/cm <sup>2</sup>	1,40
Material estabilizado com cimento, resistência a compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm <sup>2</sup> e 21 kg/cm <sup>2</sup>	1,20
Material estabilizado com cimento, resistência a compressão a 7 dias, menor que 21 kg/cm <sup>2</sup>	1,00
Material estabilizado com cal – Solo-cal	1,20

Quadro 19 – Coeficientes estruturais para os componentes do pavimento

Fonte: DNIT (2006)

Deve-se considerar como espessura mínima para camadas granulares, quando empregadas em determinado pavimento, a magnitude de 15 cm. Para o Macadame Seco, em particular, deve ser considerada a espessura mínima de 16 cm e máxima de 21cm. Caso a espessura for maior que 21 cm deve ser executada em mais de uma camada.

### 3.4.2 Dimensionamento empírico-mecanístico

Esta etapa é auxiliada pela ferramenta AEMC do software SisPav para análise da  $\epsilon_t$  (deformação de tração na fibra inferior do revestimento) e da  $\epsilon_v$  (deformação vertical no topo do subleito), partindo das estruturas dimensionadas pelo método do DNIT.

Os modelos para estimativa do número N de eixos padrões foram selecionados de acordo com os dois principais fatores de degradação dos pavimentos flexíveis, sendo eles:

*Afundamento na trilha de roda:* efeito da deformação permanente é caracterizado pelos afundamentos ao longo da trilha de roda e pelas irregularidades na superfície do pavimento que, por sua vez, dificultam a drenagem e aumentam o risco de aquaplanagem. Esses efeitos têm consequência direta na redução dos níveis de segurança e no conforto ao rolamento das estradas. Muitos autores identificam a deformação permanente, também denominada como afundamento de trilha de roda, como um dos principais mecanismos de ruptura de pavimentos e que deve ser considerado no dimensionamento da estrutura. O modelo para avaliar a deformação permanente no topo do subleito pode ser encontrado no

manual de dimensionamento de pavimentos de rodovias e ruas do Instituto do Asfalto dos Estados Unidos - MS-1, de 1969 e reeditado pela nona vez em 1991, como segue:

$$N_f = 1,365 \cdot 10^{-9} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_v} \right)^{4,47} \quad (19)$$

Onde:

$N_f$  = número de ciclos até a ruptura por deformações permanentes nas trilhas de roda calculado pela metodologia FEC/AASHTO;

$\varepsilon_v$  = deformação vertical no topo do subleito.

*Trincamento por fadiga:* nos materiais asfálticos e cimentados, a fadiga ocorre pela repetição da aplicação das cargas oriundas do tráfego de veículos sobre os pavimentos, gerando microfissuras na estrutura que resultam na perda de rigidez do material. Ao longo do tempo, as microfissuras vão se acumulando até a ruptura do material. A fadiga das misturas asfálticas é considerada como um importante fator para o bom dimensionamento de estruturas de pavimentos e, portanto, seu comportamento deve ser bem conhecido e devidamente caracterizado. O primeiro modelo utilizado para avaliar a fadiga pode ser encontrado em Franco (2007), como segue:

$$N = fcl \cdot 1,904 \cdot 10^{-6} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{2,821} \cdot \left( \frac{1}{MR} \right)^{0,74} \quad (20)$$

Onde:

$N$  = número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf, calculado pelo método da FEC/USACE;

$fcl$  = fator campo laboratório (10000);

$\varepsilon_t$  = deformação de tração na base do revestimento;

$MR$  = Módulo de resiliência do concreto asfáltico (MPa);

O segundo modelo para avaliar a fadiga do revestimento (tração) foi utilizado o modelo do FHWA:

$$N = 1,092 \cdot 10^{-6} \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3,512} \quad (21)$$

Onde:

N = vida de fadiga da camada asfáltica calculado pelo método FEC/AASHTO;

$\varepsilon_t$  = deformação de tração;

Depois de dimensionar pelo DNIT, busca-se, então, fazer uma análise empírico-mecânica por meio do AEMC a fim de encontrar valores de  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_v$  críticos, ou seja, menores do que os calculados pelo modelo para o tráfego considerado. Tal processo é realizado alterando-se apenas a espessura do revestimento, ou seja, variar-se-á a espessura de revestimento até que ambos os casos ( $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_v$ ) atendam aos requisitos dos modelos. Para isto, é considerado o eixo rodoviário padrão de 8,2 tf com pressão de inflação dos pneus de 0,56 MPa.

As leituras de trincamento por fadiga (na fibra inferior do revestimento) são realizadas nos pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e as leituras de deformações permanentes (no topo do subleito) são realizadas nos pontos 7, 8, 9, 10, 11 e 12, como mostrados na figura 15.

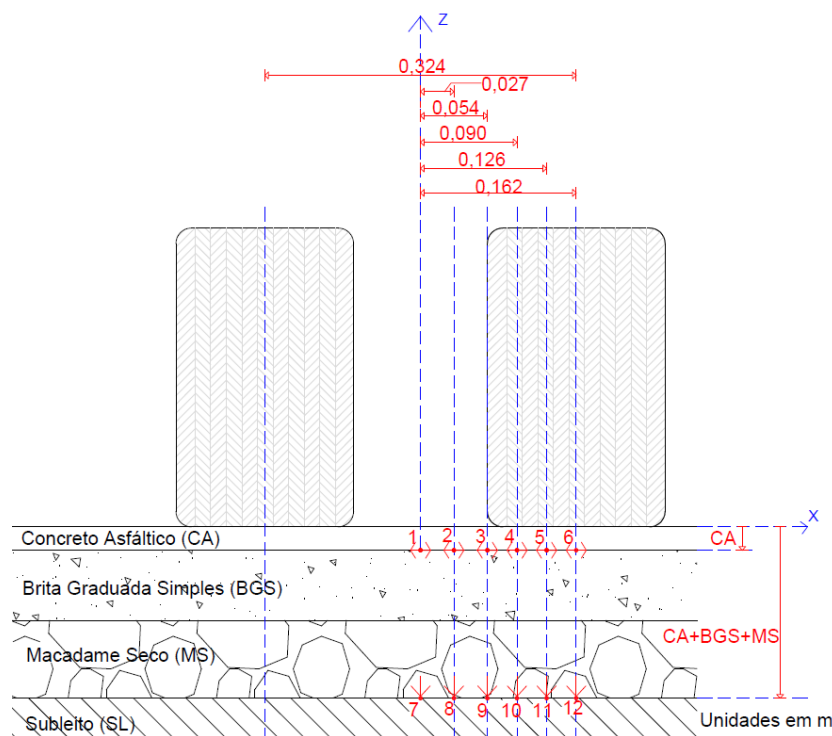


Figura 15 – Locais de leitura do  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_v$

### 3.5 Dimensionamento de restaurações

O dimensionamento das restaurações é realizado segundo o método PRO11 (DNER, 1979), o qual diz que para que não surjam trincas na camada de revestimento, deve-se manter a deflexão abaixo de um valor máximo  $D_{adm}$  (deflexão admissível), e o raio de curvatura  $R_C$  do pavimento acima de valor mínimo. No estudo, é considerado que o raio de curvatura não tem influência no dimensionamento, ou seja, raio de curvatura é o mínimo exigido por norma ( $R_C \geq 100$  m).

O valor de  $D_{adm}$  pode ser retirado de um ábaco ou através da equação 21. Esta equação considera um pavimento flexível, constituído de revestimento betuminoso em CBUQ sobre camada de base granular, sendo solicitado por um determinado número  $N$  de passagens do eixo padrão de 8,2 tf calculado pelo método FEC/USACE:

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N \quad (21)$$

É admitido que o pavimento possua ainda vida restante, ou seja, que não atingiu a fase de fadiga, quando: a deflexão de projeto está abaixo da deflexão admissível para um valor de  $N$  (tráfego já suportado pelo pavimento).

Pelo critério deflectométrico, ou também chamado de critério de deformabilidade, é considerando que o reforço venha a ser constituído exclusivamente de concreto asfáltico. Para isto, deve-se seguir a seqüência apresentada a seguir para o cálculo de espessura de reforço:

$$h = K \times \log \frac{D_p}{D_{adm}} \quad (22)$$

Onde:

$h$  = espessura do reforço do pavimento (cm).

$D_p$  = deflexão de projeto determinada para o subtrecho homogêneo, objeto do dimensionamento ( $10^{-2}$  mm).

$D_{adm}$  = deflexão admissível após a execução do reforço do pavimento ( $10^{-2}$  mm).

$K$  = fator de redução de deflexão, próprio do material usado no reforço. Quando o reforço for constituído em concreto asfáltico, pode ser usado o valor de  $K = 40$ .

Dessa forma, para presente pesquisa, são utilizados os mesmos cenários de carregamento utilizados para dimensionamento de pavimentos novos, com respectivos valores

de número N. Com base nisto, é realizado o dimensionamento de restaurações para deflexões características encontradas em pavimentos, resultando, se necessário, em uma espessura de reforço para o pavimento existente.

São adotadas deflexões características típicas encontradas em pavimentos, com valores de 50, 75, 100 e 125 ( $10^{-2}$ mm). Estas são comparadas com as deflexões admissíveis calculadas por meio do número N de cada um dos cenários de carregamento, buscando com isso, encontrar a espessura de reforço para cada uma das deflexões características.

### 3.6 Análise de custos

O levantamento dos custos unitários de referência para os serviços empregados nas estruturas definidas é realizado utilizando-se as composições do sistema SICRO II do DNIT (<http://www.dnit.gov.br/servicos/sicro/sul>), tendo como referência o mês de maio de 2014. A moeda adotada foi o Real, considerando-se apenas os custos de pavimentação para uma rodovia classe I, com seção tipo indicada na figura 16 e suas camadas constituintes na figura 17 (pavimentos novos). Já para as restaurações é considerada a seção mostrada na figura 18 e as camadas constituintes conforme figura 19. Para ambos os casos, restaurações e pavimentos novos, o rebaixo do acostamento foi considerado como sendo 2,5 cm.

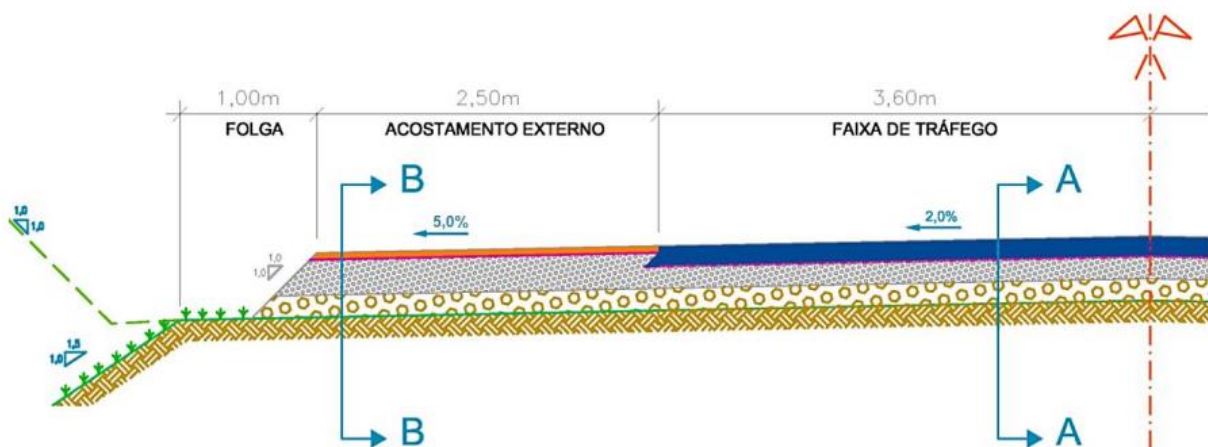


Figura 16 – Seção tipo rodovia classe I (pavimentos novos) para levantamento de custos

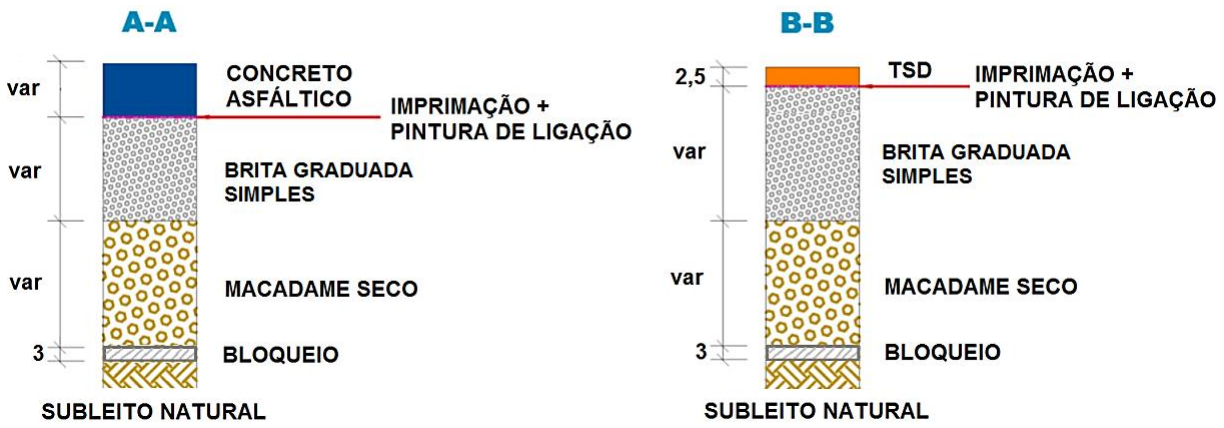


Figura 17 – Seções transversais A-A e B-B demonstrando a composição das camadas (pavimentos novos)

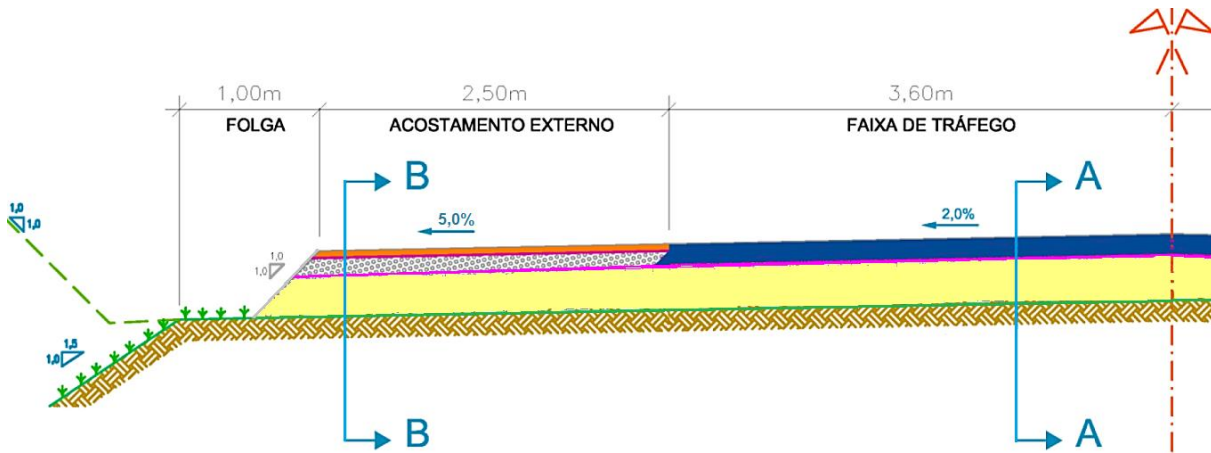


Figura 18 – Seção tipo rodovia (restaurações) para levantamento de custos

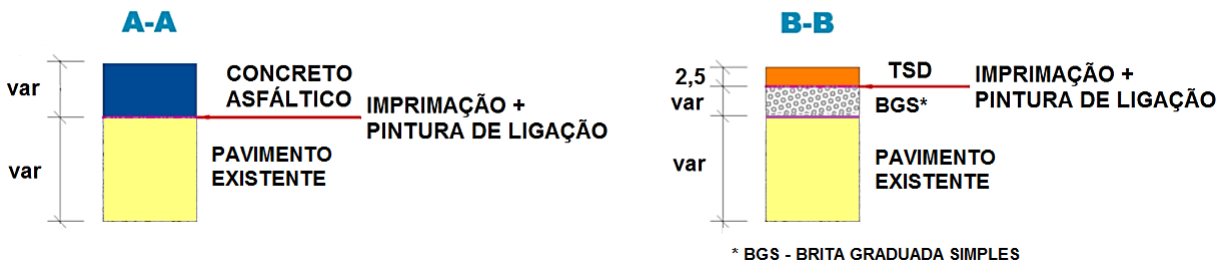


Figura 19 – Seções transversais A-A e B-B demonstrando a composição das camadas (restaurações)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Cálculo do número N

Para o cálculo do número N anual, sem considerar a taxa de crescimento, observou-se a “lei da balança”, isto é, que os eixos estariam trafegando com a carga máxima legal, a fim de encontrar a taxa de crescimento anual real em cada uma das rodovias em estudos. O cálculo do número N para este caso foi por meio da metodologia USACE. Os limites carga por eixo utilizados no estudo são os definidos pela CONTRAN, já apresentados no quadro 8. A equação 23 mostra como foi realizado o cálculo para esta etapa.

$$N = 365 \times VDM \times Fv \times Ff \times Fs \times Fd \times Fc \quad (23)$$

O VDM, como citado anteriormente, foi obtido por meio das empresas concessionárias de rodovias.

O Fator de Veículo (Fv) foi calculado conforme apresentado na metodologia, ou seja, os valores dos Fv finais foram obtidos pelos valores totais de equivalência de cada tipo de veículo, pela metodologia USACE com eixos com a CML. Os resultados da evolução dos mesmos apresentados na tabela 7 e nas figuras 20, 21 e 22.

Tabela 7 – Fator de Veículo (Fv) anual para as rodovias em estudo

Ano	Fator de Veículo (Fv)										
	Praças										
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
1997	-	-	-	8,80	11,36	12,90	-	-	-	-	-
1998	-	-	-	9,85	11,49	13,19	-	-	-	-	-
1999	-	-	-	10,42	12,30	13,61	-	-	-	-	-
2000	-	-	-	10,65	13,33	14,19	-	-	-	-	-
2001	-	-	-	10,53	12,90	13,78	-	9,33	9,86	10,19	-
2002	-	-	-	11,08	13,56	14,44	10,34	9,17	9,75	9,84	7,14
2003	-	-	-	12,44	14,43	15,19	10,81	9,61	10,19	10,53	7,40
2004	-	-	-	11,91	14,49	15,09	12,06	10,53	11,10	11,53	8,15
2005	-	-	-	12,30	14,83	15,54	10,91	10,47	11,12	11,22	8,36
2006	-	-	-	12,44	15,38	15,98	12,84	10,46	11,10	12,14	8,43
2007	-	-	-	12,86	15,87	16,18	13,93	10,85	11,26	12,66	8,93
2008	-	-	-	15,25	15,69	16,93	13,92	11,21	11,55	12,70	8,63
2009	18,64	17,36	16,89	16,53	15,97	17,48	14,68	11,05	11,44	13,28	9,13
2010	18,69	17,38	16,92	17,06	16,63	18,16	15,27	11,05	11,63	13,20	8,98
2011	18,84	17,44	17,05	17,40	17,48	18,75	15,96	11,10	11,66	13,94	9,30
2012	19,06	17,46	16,77	17,51	17,59	19,20	15,41	11,20	11,81	13,81	9,77
2013	19,42	17,79	17,26	-	-	-	16,88	12,33	11,83	14,63	9,82



A figura 20 apresenta para as praças de pedágio da região metropolitana do RS os valores de Fv, que são obtidos pelos valores totais de equivalência de cada tipo de veículo, crescem conforme avança a vida útil do pavimento, ou seja, como o fator de veículo transforma um veículo qualquer, com um carregamento qualquer, em uma quantidade de solicitações equivalente do eixo padrão de 8,2 toneladas que causaria o mesmo efeito destrutivo no pavimento, o aumento do Fv indica que ao passar dos anos o pavimento está sendo mais solicitado e ao mesmo tempo diminuindo sua vida útil em função do efeito destrutivo.

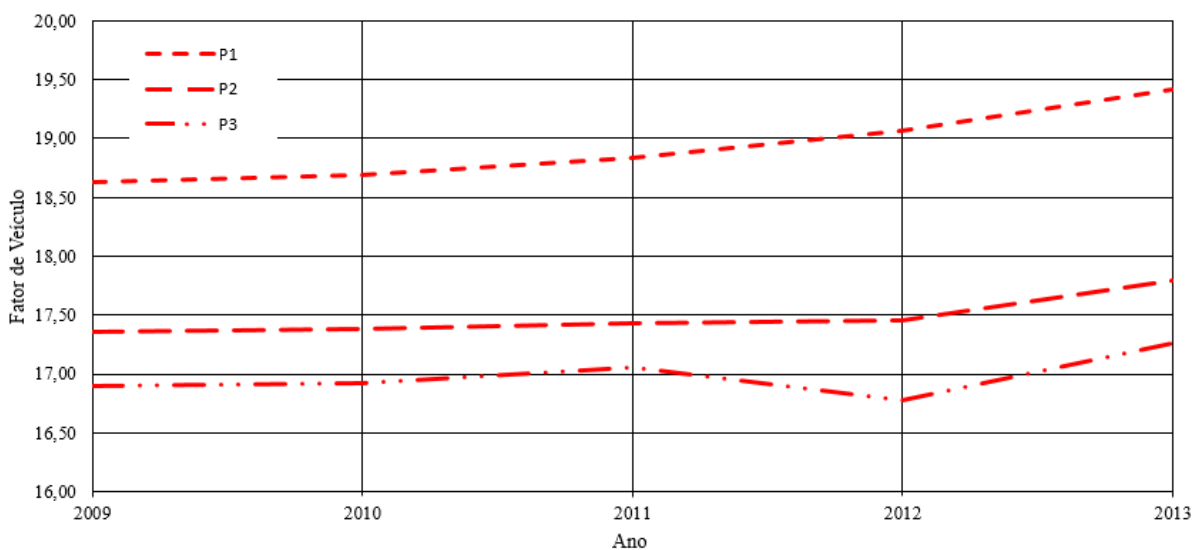


Figura 20 - Evolução do Fv das praças de pedágio região metropolitana do RS

Na figura 21 são apresentados para as praças de pedágio do RJ e MG os valores dos Fv finais, os quais apresentam a mesma tendência das rodovias da região metropolitana do RS, com o crescimento dos valores com o passar dos anos, mostrando novamente o quão mais solicitado estão os pavimentos brasileiros. Além disso, fica clara a tendência do crescimento da solicitação do pavimento para os próximos anos.

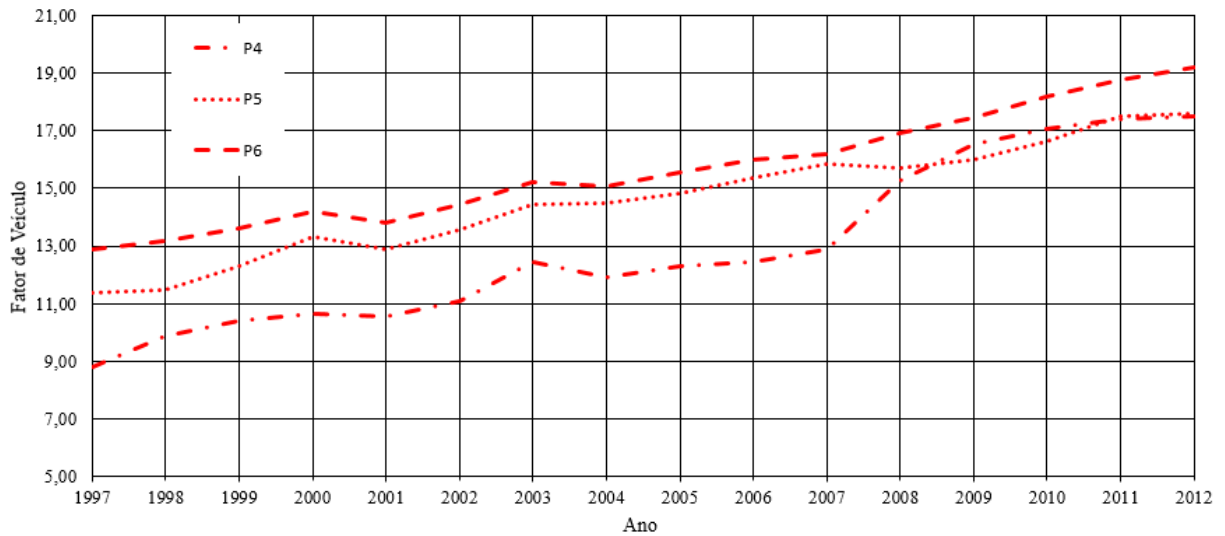


Figura 21 – Evolução do Fv das praças de pedágio do RJ e MG

Já na figura 22 são apresentados para as praças de pedágio da região sul do RS os valores dos Fv finais, os quais apresentam a mesma tendência das rodovias da região metropolitana do RS e das rodovias do RJ e MG, com o crescimento dos valores com o passar dos anos. Nota-se, também, que P7 teve uma redução considerável no Fv no ano de 2005, provavelmente creditada a forte seca no estado do RS no ano de 2005. No ano de 2006 há um retorno considerável no crescimento, ano este em que a safra de grãos foi muito boa no estado. A diferença nos valores de Fator de Veículo de um ano para outro é péssima para o desempenho do pavimento, o que pode representar a degradação mais severa e precoce à estrutura.

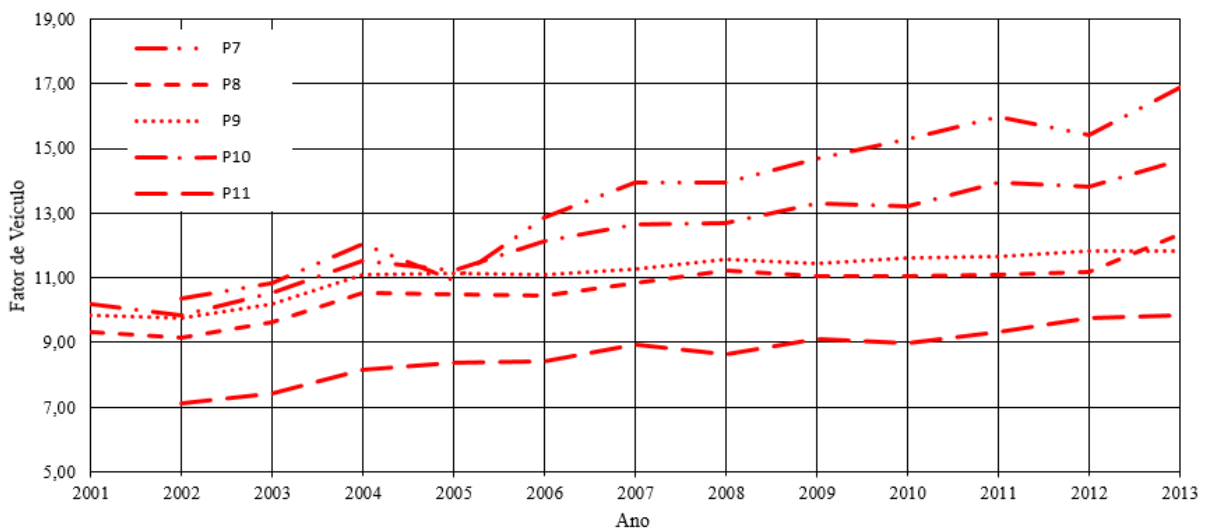


Figura 22 – Evolução do Fv das praças de pedágio da região sul do RS

Através da tabela 7 e das figuras 20, 21 e 22 é possível concluir que no último ano, 2013, o Fator de Veículo para região metropolitana do RS ficou com média de 18,16 e a região sul do RS com 13,10. Já para o último ano das praças do RJ e MG, 2012, a média do Fv ficou igual a 18,10, aproximando-se em termos de Fv da região metropolitana do RS. O Fator de veículo das rodovias em estudo ficou entre 9,82 e 19,42 para o último ano, 2013, com média global de 14,99.

Já os valores da evolução do Fator de Frota (Ff) das praças de pedágio em estudo são apresentados na tabela 8 e nas figuras 23, 24 e 25. Cabe lembrar que o Ff define-se pela porcentagem do VDM que é constituída exclusivamente de veículos comerciais circulantes em cada uma das rodovias.

Tabela 8 – Fator de Frota (Ff) anual para as rodovias em estudo

Ano	Fator de Frota (Ff)										
	Praças										
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
1997	-	-	-	0,22	0,24	0,31	-	-	-	-	-
1998	-	-	-	0,21	0,23	0,30	-	-	-	-	-
1999	-	-	-	0,21	0,25	0,31	-	-	-	-	-
2000	-	-	-	0,21	0,27	0,32	-	-	-	-	-
2001	-	-	-	0,21	0,27	0,32		0,48	0,52	0,51	
2002	-	-	-	0,21	0,28	0,33	0,52	0,47	0,49	0,45	0,32
2003	-	-	-	0,21	0,29	0,34	0,58	0,49	0,52	0,49	0,33
2004	-	-	-	0,20	0,28	0,33	0,53	0,48	0,51	0,48	0,32
2005	-	-	-	0,21	0,30	0,32	0,48	0,46	0,49	0,45	0,32
2006	-	-	-	0,21	0,30	0,32	0,54	0,44	0,47	0,45	0,30
2007	-	-	-	0,21	0,31	0,32	0,57	0,44	0,46	0,47	0,29
2008	-	-	-	0,25	0,30	0,33	0,53	0,42	0,45	0,45	0,25
2009	0,24	0,18	0,33	0,27	0,29	0,31	0,55	0,39	0,41	0,43	0,25
2010	0,24	0,18	0,32	0,28	0,30	0,33	0,56	0,38	0,40	0,44	0,22
2011	0,23	0,17	0,32	0,28	0,31	0,33	0,58	0,37	0,39	0,45	0,21
2012	0,21	0,18	0,29	0,28	0,30	0,33	0,53	0,35	0,37	0,41	0,21
2013	0,21	0,18	0,29	-	-	-	0,60	0,35	0,38	0,43	0,21

Na figura 23 apresenta-se o Fator de Frota (Ff) para as rodovias da região metropolitana do RS. As praças P1 e P3 apresentam um decréscimo na porcentagem de veículos comerciais circulantes. Já a P2 apresentou um leve aumento nesta relação. A diminuição da porcentagem de veículos comerciais pode ser citada ao fato da grande venda de veículos de passeio, creditada também pela sua facilidade de financiamento.

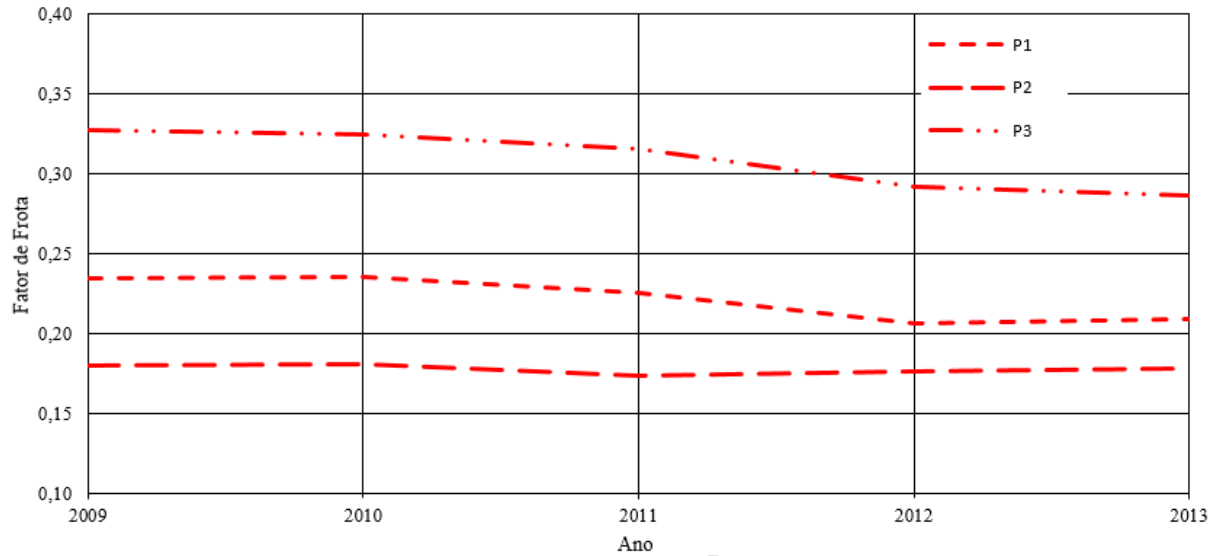


Figura 23 - Evolução do Ff das praças de pedágio região metropolitana do RS

Na figura 24 são mostrados os valores de Fator de Frota (Ff) para as rodovias do RJ e MG, os quais apresentaram oscilações de porcentagem de veículos comerciais com o passar dos anos. A P4 apresentou um grande aumento dos veículos comerciais circundantes da rodovia nos últimos anos, porém de 2011 para 2012 já mostra uma tendência de redução desse valor, assim como a P5, que também apresenta uma tendência de diminuição desta relação. Já a P6, nos últimos anos, parece estar praticamente estável, não tendendo a crescer e nem a reduzir nos próximos anos.

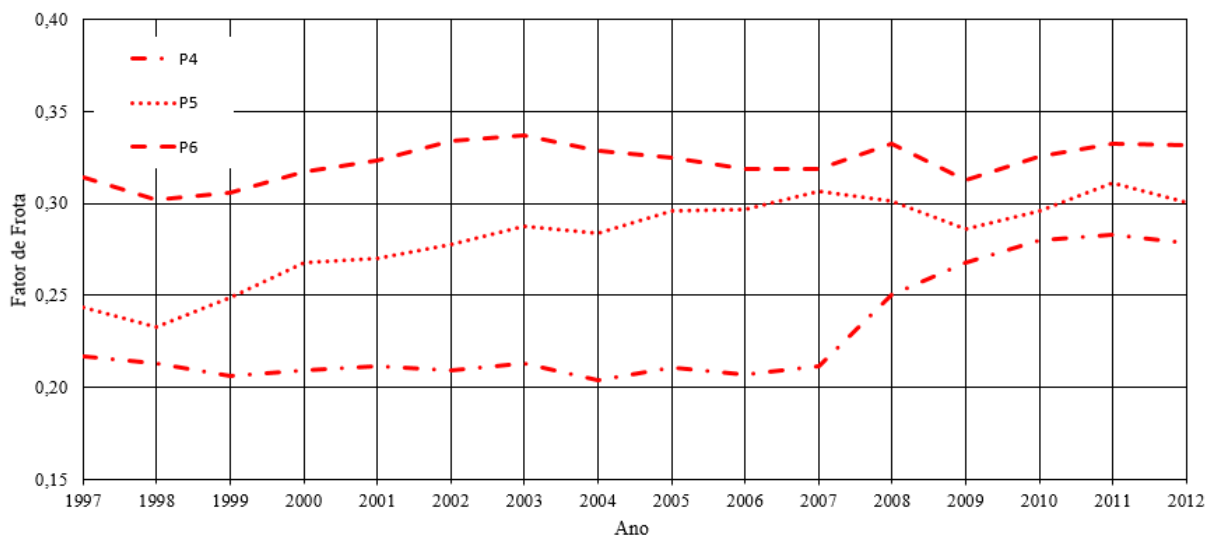


Figura 24 - Evolução do Ff das praças de pedágio do RJ e MG

A região sul do RS, como mostrado na figura 25, apresentou, em geral, redução no Ff com o passar dos anos. Apenas a P7 apresentou comportamento distinto, com oscilações durante a série histórica apresentada. Assim como no Fv, no Ff no ano 2005 houve um decréscimo nos veículos comerciais e posterior acréscimo no ano de 2006, creditado também ao fato da grande seca no ano de 2005. Nota-se ainda que a P7 é a rodovia mais solicitada por veículos comerciais por ser rota de cargas de grãos para o porto de Rio Grande, isso faz com que no ano de 2013 a rodovia tenha aproximadamente 60% da frota contida por veículos comerciais, explicando a precoce degradação dos pavimentos.

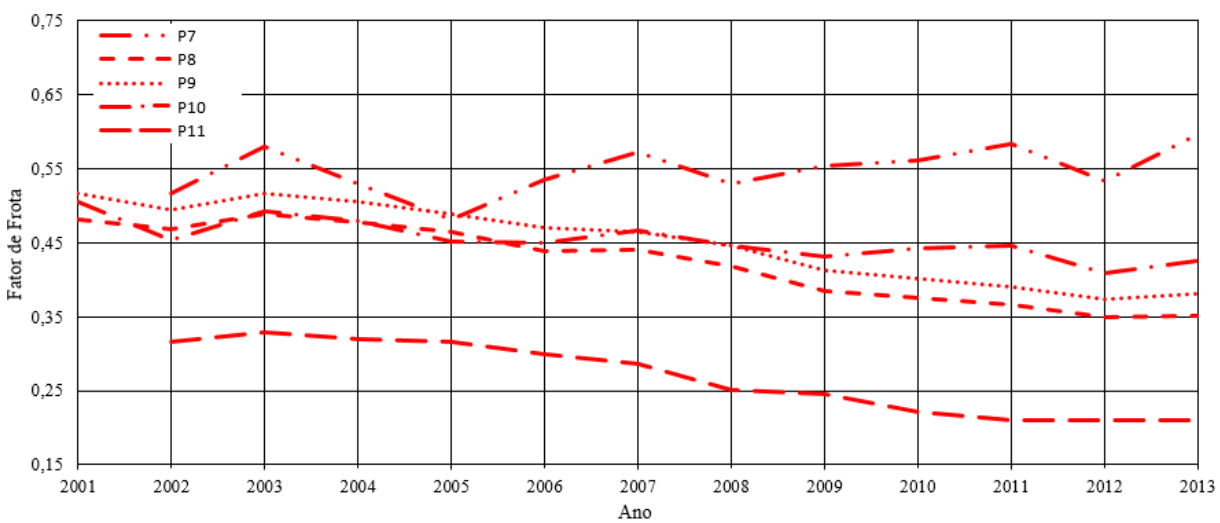


Figura 25 - Evolução do Ff das praças de pedágio da região sul do RS

Por meio da tabela 8 e das figuras 23, 24 e 25 é possível concluir que no último ano, 2013, o Fator de Frota para região metropolitana do RS ficou com média de 0,22 e a região sul do RS com 0,39. Já para o último ano das praças do RJ e MG, 2012, a média do Ff ficou igual a 0,30. O Fator de frota das rodovias em estudo ficou entre 0,18 e 0,60 para o último ano, 2013, com média global de 0,33.

A tabela 9 apresenta os valores de NUSACE e NAASHTO encontrados para as praças de pedágios em estudo, considerando os veículos comerciais com 100% da carga máxima legal. Esta etapa foi realizada com intuito de calcular a relação NUSACE/NAASHTO real para cada uma das rodovias, já que quando não se sabe este valor costuma-se usar 3,0 para esta relação.

Na tabela 9 percebe-se um aumento no número N com o passar dos anos, destacando-se a P4, dentre as estudadas, como a rodovia mais solicitada em termos de número N. Nota-se, também, que o tráfego tem evoluído em todas as regiões do país, demonstrando a importância do estudo do volume de tráfego para dimensionamentos e intervenções em pavimentos. Além

disso, quanto à relação  $N_{USACE}/N_{AASHTO}$  percebe-se que este valor varia de 1,96 até 4,16 nas praças em estudo, no entanto, ficando com a média da série histórica de cada uma das rodovias próximas a 3,00. A média global da relação  $N_{USACE}/N_{AASHTO}$  ficou igual a 2,92. Com isto, observa-se também o quão influentes são as diferentes considerações para cálculo do FEC, interferindo também no dimensionamento de pavimentos.

Com base na tabela 9, apresenta-se a evolução do número N com o passar dos anos da série histórica em estudo, para as praças de pedágio da região metropolitana do RS, para as praças do RJ e MG e para as praças da região sul do RS, nas figuras 26, 27 e 28, respectivamente. Para elaboração das figuras utilizou-se o número N calculado pela metodologia USACE, a mesma utilizada pelo DNIT.

Praça	N	Ano												Média					
		1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008		2009	2010	2011	2012	2013
P1	NUSACE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,08E+06	2,13E+06	2,22E+06	2,27E+06	2,40E+06
	NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,92E+05	7,05E+05	7,27E+05	7,41E+05	7,78E+05
	NUSACE/NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,00	3,02	3,05	3,06	3,08
P2	NUSACE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,26E+06	2,35E+06	2,53E+06	2,78E+06	2,95E+06
	NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,89E+05	8,18E+05	8,83E+05	9,64E+05	1,01E+06
	NUSACE/NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,87	2,88	2,87	2,89	2,91
P3	NUSACE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,06E+06	2,12E+06	2,28E+06	2,28E+06	2,55E+06
	NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,15E+05	7,35E+05	7,62E+05	7,90E+05	8,65E+05
	NUSACE/NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,88	2,89	2,91	2,88	2,94
P4	NUSACE	5,28E+06	6,01E+06	6,15E+06	6,04E+06	6,14E+06	6,66E+06	6,04E+06	6,57E+06	6,32E+06	6,80E+06	1,08E+07	1,34E+07	1,51E+07	1,65E+07	1,72E+07	1,72E+07	-	-
	NAASHTO	2,53E+06	2,77E+06	2,74E+06	2,65E+06	2,68E+06	2,81E+06	2,81E+06	2,57E+06	2,79E+06	2,70E+06	2,83E+06	4,38E+06	5,35E+06	5,95E+06	6,47E+06	6,67E+06	-	-
	NUSACE/NAASHTO	2,09	2,17	2,25	2,28	2,29	2,37	2,37	2,35	2,36	2,34	2,40	2,47	2,50	2,53	2,56	2,58	-	-
P5	NUSACE	2,51E+06	2,34E+06	2,64E+06	3,06E+06	2,84E+06	2,98E+06	3,15E+06	3,43E+06	3,63E+06	4,33E+06	4,60E+06	4,70E+06	5,40E+06	6,42E+06	6,67E+06	-	-	
	NAASHTO	9,88E+05	9,20E+05	1,01E+06	1,15E+06	1,07E+06	1,12E+06	1,16E+06	1,18E+06	1,28E+06	1,36E+06	1,59E+06	1,69E+06	1,73E+06	1,95E+06	2,28E+06	2,33E+06	-	-
	NUSACE/NAASHTO	2,55	2,54	2,61	2,65	2,66	2,67	2,70	2,71	2,69	2,68	2,73	2,72	2,72	2,76	2,81	2,86	-	-
P6	NUSACE	3,59E+06	3,58E+06	3,72E+06	3,94E+06	3,94E+06	3,94E+06	4,07E+06	4,10E+06	4,28E+06	4,42E+06	4,85E+06	5,82E+06	5,97E+06	6,78E+06	7,44E+06	8,09E+06	-	-
	NAASHTO	1,34E+06	1,34E+06	1,38E+06	1,46E+06	1,37E+06	1,45E+06	1,47E+06	1,48E+06	1,55E+06	1,60E+06	1,74E+06	2,08E+06	2,14E+06	2,40E+06	2,59E+06	2,75E+06	-	-
	NUSACE/NAASHTO	2,67	2,68	2,69	2,70	2,72	2,72	2,76	2,77	2,76	2,76	2,79	2,80	2,79	2,83	2,88	2,94	-	-
P7	NUSACE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,48E+06	1,96E+06	2,89E+06	3,86E+06	4,15E+06
	NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,30E+05	6,68E+05	9,95E+05	1,26E+06	1,30E+06
	NUSACE/NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,67	2,69	2,91	2,92	3,14
P8	NUSACE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,30E+06	3,75E+06	4,09E+06	4,30E+06	4,55E+06
	NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,24E+06	1,43E+06	1,57E+06	1,42E+06	1,50E+06
	NUSACE/NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,66	2,67	2,96	3,02	3,10
P9	NUSACE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,64E+06	3,55E+06	4,08E+06	3,93E+06	4,23E+06
	NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,57E+05	1,30E+06	1,43E+06	1,33E+06	1,39E+06
	NUSACE/NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,76	2,73	3,07	3,11	3,19
P10	NUSACE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,03E+06	5,05E+06	7,62E+06	8,09E+06	9,32E+06
	NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,84E+06	1,88E+06	2,47E+06	2,57E+06	3,34E+06
	NUSACE/NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,74	2,69	3,00	3,15	3,21
P11	NUSACE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,40E+05	6,77E+05	9,02E+05	8,43E+05	9,45E+05
	NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,32E+05	2,88E+05	3,30E+05	3,14E+05	3,27E+05
	NUSACE/NAASHTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,32	2,35	2,70	2,69	2,75
Média Global																	2,92		

Tabela 9 – Número N para as praças de pedágio (Eixos com a Carga Máxima Legal)

A figura 26 mostra a evolução do número N das praças de pedágio da região metropolitana do RS, onde, percebe-se que com o passar dos anos há um aumento no valor de número N nas três praças em estudo. Isto demonstra a realidade da região, onde o número de veículos comerciais tem aumentado e, como consequência, uma maior solicitação é imposta no pavimento, resultando na degradação precoce do pavimento.

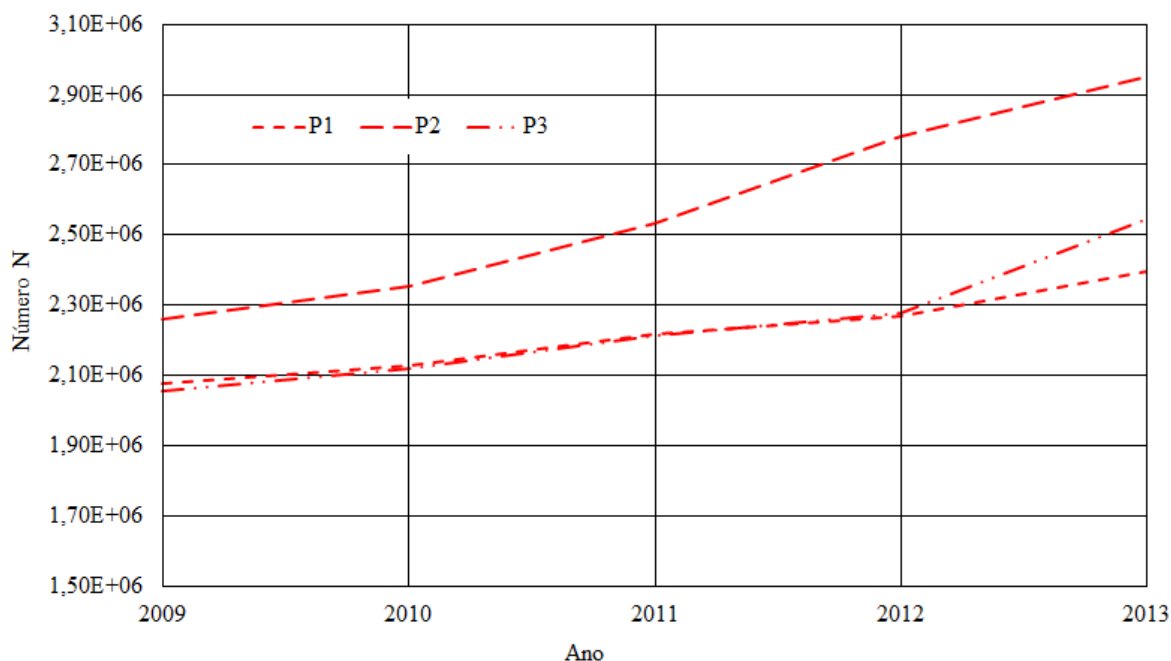


Figura 26 - Evolução do número N por ano das praças de pedágio da região metropolitana do RS

Na figura 27 é mostrada a evolução do número N ao longo do período da série histórica para as praças do RJ e MG. Nota-se, neste caso, que as praças P5 e P6 apresentam tendência semelhante de comportamento, com leve aumento do número N com o tempo. Diferentemente, a praça P4 mostra-se distinta quanto ao quesito, apresentado um elevado acréscimo do número N, principalmente nos últimos 5 anos. Este aumento relevante nos últimos anos, se não previsto no dimensionamento da estrutura, pode resultar graves problemas estruturais no pavimento.



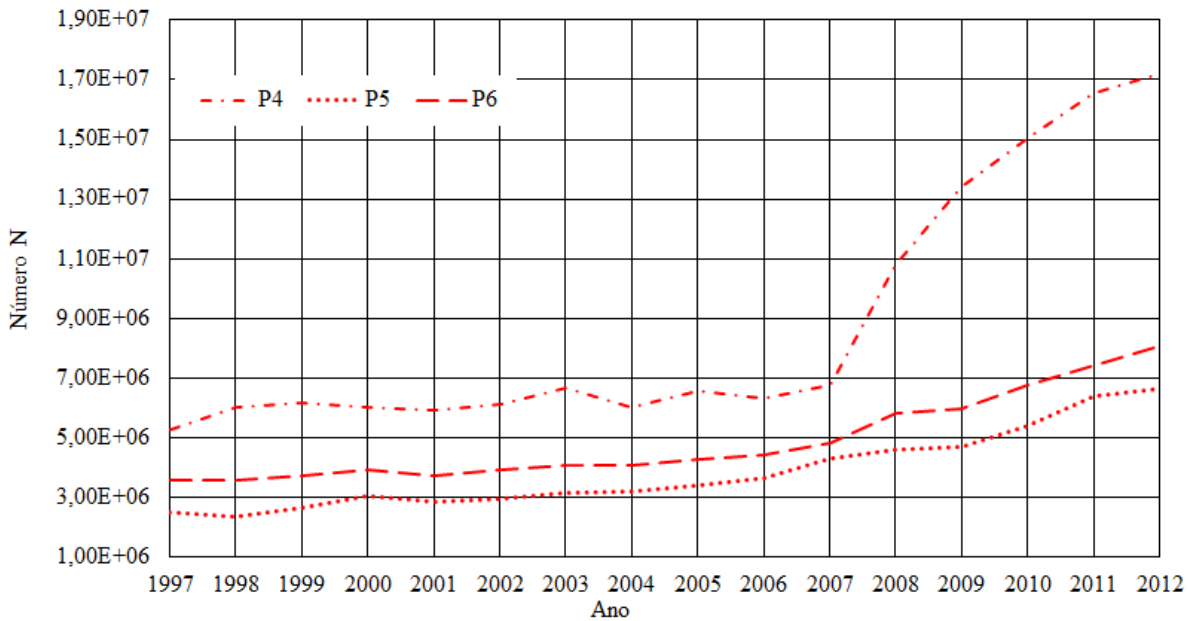


Figura 27 - Evolução do número N por ano das praças de pedágio do RJ e MG

A figura 28, que apresenta a evolução do número N com o passar dos anos para as praças de pedágio da região sul do RS, mostra-se semelhante, em termos de comportamento, nas praças P8 e P9, com leve crescimento do número N na série histórica. Nesta região destacam-se a P7 e P10, com crescimento no número N elevado e variações de solicitação ao longo do tempo, o que vem a tona a precoce deterioração de pavimentos, em função da falta de estudo de tráfego para diferentes regiões.

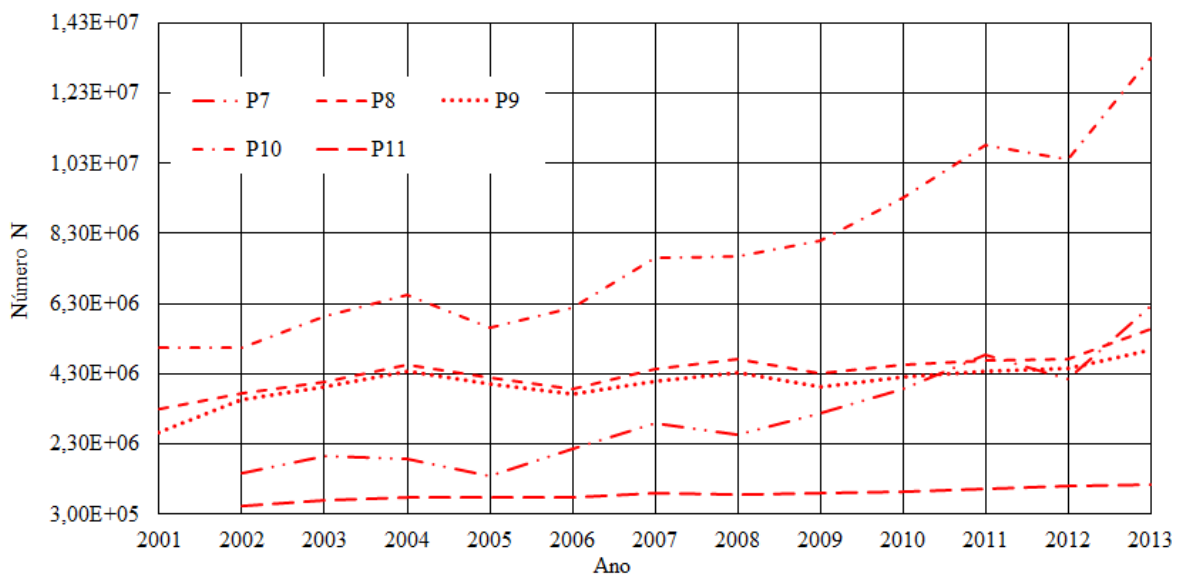


Figura 28 - Evolução do número N por ano das praças de pedágio da região sul do RS

Por fim, embasado nos gráficos apresentados nas figuras 26, 27 e 28 foram obtidas as equações para previsão futura do tráfego, ou seja, prever um número NUSACE e, as respectivas correlações de cada curva de número N por período de tempo. No quadro 20 são mostradas as equações lineares para projeção de tráfego, ou seja, é possível entrar com um valor de número N e um período de projeção desejado, estimando, assim, o valor de N futuro. Nota-se que obteve-se diferentes correlações para as diferentes praças em estudo, conseguindo-se boas correlações, na ordem de 0,98, no caso da praça P2.

<b>Praça</b>	<b>Equação Linear - Projeção do número N</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
P1	$N_{fut} = (Nano) + (77600 \times Anosprojeção) + 2,0 \cdot 10^6$	0,9723
P2	$N_{fut} = (Nano) + (180750 \times Anosprojeção) + 2,0 \cdot 10^6$	0,9803
P3	$N_{fut} = (Nano) + (113643 \times Anosprojeção) + 2,0 \cdot 10^6$	0,8989
P4	$N_{fut} = (Nano) + (760005 \times Anosprojeção) + 2,0 \cdot 10^6$	0,7213
P5	$N_{fut} = (Nano) + (266480 \times Anosprojeção) + 2,0 \cdot 10^6$	0,8777
P6	$N_{fut} = (Nano) + (279481 \times Anosprojeção) + 3,0 \cdot 10^6$	0,8249
P7	$N_{fut} = (Nano) + (375922 \times Anosprojeção) + 2,3 \cdot 10^5$	0,8459
P8	$N_{fut} = (Nano) + (119550 \times Anosprojeção) + 4,0 \cdot 10^6$	0,6925
P9	$N_{fut} = (Nano) + (111731 \times Anosprojeção) + 3,0 \cdot 10^6$	0,6138
P10	$N_{fut} = (Nano) + (608278 \times Anosprojeção) + 4,0 \cdot 10^6$	0,8824
P11	$N_{fut} = (Nano) + (45567 \times Anosprojeção) + 5,2 \cdot 10^5$	0,9271
Nfut: número N futuro para o período desejado; Nano: Número N do ano base para projeção futura; Anosprojeção: Quantidade de anos para qual se pretende projetar o tráfego.		

Quadro 20 – Equações e correlações de número N pelo tempo das praças de pedágio

#### 4.2 Determinação da taxa de crescimento

A taxa de crescimento anual de cada uma das praças em estudo foi obtida com a finalidade de comparar com a taxa de crescimento proposta pelo DNIT (2006) para dimensionamento de pavimentos, que é de 3,00%.

A figura 29 apresenta as taxas de crescimento anuais de tráfego de cada praça, bem como a média de crescimento da região metropolitana do RS, comparada com a taxa de crescimento do DNIT.

Na figura 29, pode-se observar evolução da taxa de crescimento do tráfego nas rodovias situadas na região metropolitana do RS. Percebe-se que as praças P1 e P3 apresentaram um decréscimo em 2012 e um acréscimo nos anos de 2011 e 2013. Já, a praça P2 apresentou comportamento distinto das duas anteriores. Observa-se, ainda, que a média de crescimento de cada praça manteve-se acima da taxa de crescimento proposta pelo DNIT (3,00%), praticamente em todo período da série histórica. O crescimento médio na região foi de 5,35%. Isso mostra que a taxa de crescimento proposta pelo DNIT está fora de realidade para as rodovias em estudo, reportando a concepção de que os pavimentos atuais estão sendo dimensionados com taxas menores que os reais, o que pode prejudicar a sua vida útil.

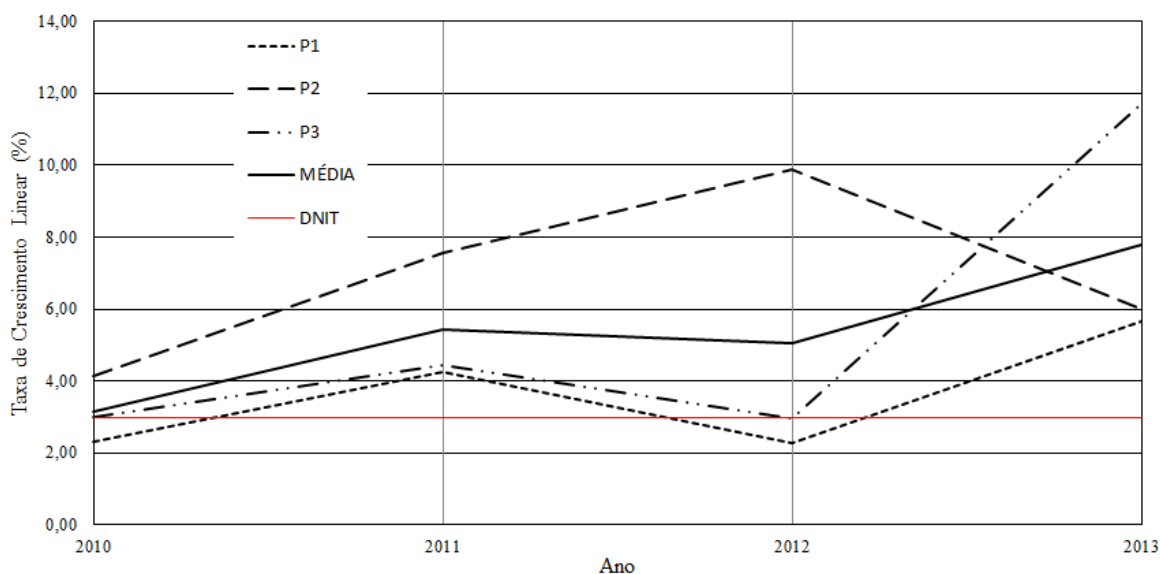


Figura 29 - Evolução da taxa de crescimento de tráfego: região metropolitana do RS e DNIT

A figura 30 apresenta as taxas de crescimento anuais de tráfego de cada praça, bem como a média de crescimento das rodovias do RJ e MG, comparada com a taxa de crescimento do DNIT.

Na Figura 30 é importante observar que, assim como nas rodovias da região metropolitana do RS, a taxa de crescimento médio das rodovias do RJ e MG mantém-se acima da taxa de crescimento proposta pelo DNIT (3,00%), o que mostra novamente a imprudência em continuar dimensionando pavimentos com a taxa de crescimento do DNIT. O crescimento médio de tráfego na região chegou a 7,29%. Nesta região é notável que, a partir

do ano de 2007, tem-se um novo cenário de crescimento do tráfego, com valores maiores de taxa de crescimento.

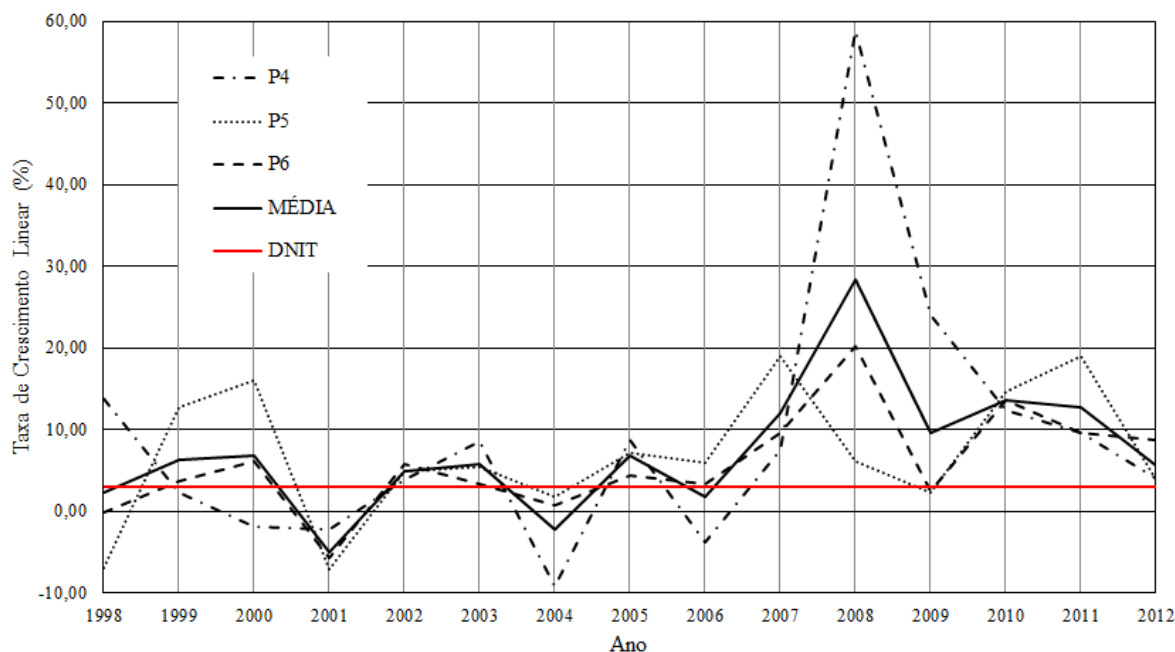


Figura 30 - Evolução da taxa de crescimento de tráfego: Estados do RJ e MG e DNIT

A figura 31 apresenta as taxas de crescimento anuais de tráfego de cada praça, bem como a média de crescimento da região sul do RS, comparada com a taxa de crescimento do DNIT.

Na figura 31 observa-se a evolução da taxa de crescimento do tráfego das rodovias da região Sul do Estado do RS. Assim como nas rodovias da região metropolitana do RS e nas rodovias do RJ e MG, as rodovias da região Sul do RS mantêm o pressuposto de que a taxa de crescimento proposta pelo DNIT está fora da realidade, pois a taxa de crescimento média de tráfego das rodovias apresenta-se superior a taxa do DNIT, chegando a 8,84% na região. Percebem-se, ainda, grandes picos de crescimento de tráfego de um ano para o outro, como por exemplo, na praça P7, nos anos 2005 e 2006. Este caso específico pode ser creditado a forte seca no ano de 2005, o que ocasionou uma baixa safra de grãos. Logo, em 2006, com a alta na safra o crescimento do tráfego foi intenso, proporcionando um enorme crescimento de um ano para o outro, na ordem de 75%. Este último fato, corrobora com os resultados já apresentados para Fator de Frota, Fator de Veículo e número N.

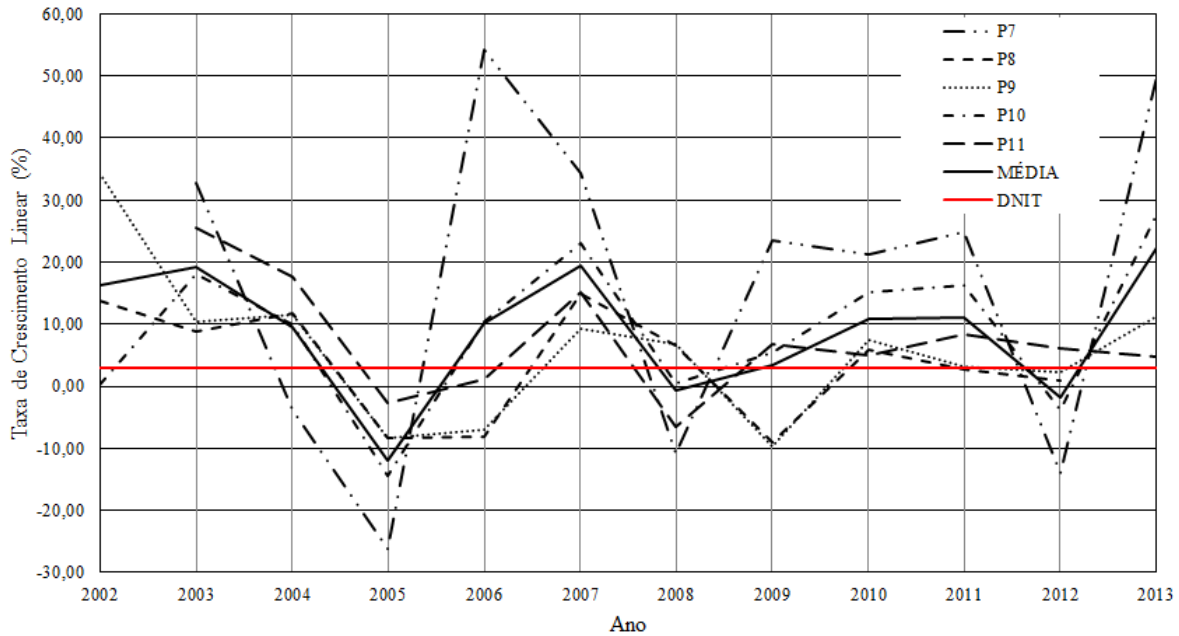


Figura 31 - Evolução da taxa de crescimento de tráfego: região sul do RS e DNIT

O quadro 21 mostra a taxa de crescimento média de cada uma das praças, de cada região e global.

Percebe-se pelo quadro 21, que a média da taxa de crescimento, em função da série histórica, manteve-se acima da taxa de crescimento do DNIT (3,00%) em todas as praças, ficando mais de 13,00% acima da taxa do DNIT na praça P7. A média de cada praça, de cada região e global também se mantiveram acima da taxa do DNIT, demonstrando que atualmente o tráfego em distintas regiões do país mostra-se com uma dinâmica diferente e influenciado por fatores regionais, de forma a incentivar projetistas a analisar de forma mais adequada o tráfego, visando qualificar cada vez mais os projetos de pavimentos no Brasil.

<b>Taxa de Crescimento (%)</b>		
<b>Praça</b>	<b>Média/Praça</b>	<b>Média/Região</b>
<b>P1</b>	3,63	5,35
<b>P2</b>	6,90	
<b>P3</b>	5,53	
<b>P4</b>	9,13	7,29
<b>P5</b>	7,01	
<b>P6</b>	5,73	
<b>P7</b>	16,93	8,84
<b>P8</b>	4,86	
<b>P9</b>	5,98	
<b>P10</b>	9,07	
<b>P11</b>	7,38	
<b>Média Global</b>		<b>7,16</b>

Quadro 21 - Taxa de crescimento médio das praças, de cada região e global

Com o objetivo de definir do número N real de projeto para cada uma das regiões adotou-se a taxa de crescimento média de todos os anos da série histórica em cada uma das praças de pedágio, pois com a média de todos os anos trabalha-se com o período mais longo de tráfego de cada uma das rodovias. Para este cálculo, ainda considerou-se um período de projeto de 10 anos. Dessa forma, a tabela 10 apresenta os valores do número NUSACE com a taxa de crescimento real de cada rodovia e com a taxa de crescimento do DNIT (3,00%) para as rodovias estudadas.

Ao analisar a tabela 10 pode-se observar que é considerável o aumento do valor do número N se considerarmos os valores de taxa de crescimento real e compará-los com o número N calculado com a taxa de crescimento do DNIT, de 3,00%. O aumento médio foi na ordem de 19,42% no número N. Dessa forma, percebe-se o quão importante é o estudo da taxa de crescimento do tráfego para projetos de pavimentos, pois se não considerarmos o crescimento real do tráfego estaremos diminuindo a vida útil do pavimento e, em consequência, o mesmo necessitará de intervenções mais precocemente.

Tabela 10 – Número N em função das diferentes taxas de crescimento

Praça	NÚMERO NUSACE		
	N (T.C. DNIT)	N (T.C. Real)	Diferença (%)
<b>P1</b>	2,76E+07	2,83E+07	2,73
<b>P2</b>	3,39E+07	3,97E+07	16,96
<b>P3</b>	2,93E+07	3,25E+07	10,99
<b>P4</b>	1,98E+08	2,51E+08	26,64
<b>P5</b>	7,67E+07	9,00E+07	17,44
<b>P6</b>	9,30E+07	1,04E+08	11,88
<b>P7</b>	7,16E+07	1,15E+08	60,58
<b>P8</b>	6,40E+07	6,92E+07	8,08
<b>P9</b>	5,71E+07	6,45E+07	12,95
<b>P10</b>	1,53E+08	1,93E+08	26,37
<b>P11</b>	1,31E+07	1,56E+07	19,03
<b>Média Global</b>			19,42

T.C. - Taxa de Crescimento

Além disso, buscou-se uma correlação da série histórica da variação de tráfego com séries históricas de três diferentes fatores: a) variação do PIB (INDEX), apresentado na figura 32; e b) variação da venda de caminhões (DENATRAN, 2014), apresentado na figura 33.

A figura 32 mostra a correlação da variação do tráfego com a variação do PIB para uma série histórica de 13 anos (do ano 2000 até o ano 2012), onde, na figura, cada concentração horizontal de pontos corresponde a um ano. Percebe-se, pela linha de tendência da média da variação de tráfego, que não apresentou nenhuma correlação ( $R^2 = 0,1157$ ). A linha de tendência do conjunto de dados apresentou-se pior ainda, com  $R^2 = 0,0109$ , ou seja, nenhuma correlação entre os dados. Fato este, também demonstrado pela linha de igualdade, na qual para se que se tenha uma perfeita concordância, a linha de tendência da média e linha de igualdade deveriam se sobrepor, o que não acontece neste caso. A linha de tendência do conjunto de dados, obviamente pelo fato de ter pior correlação, ficou ainda mais distante da linha de igualdade. Pode-se, então, chegar a conclusão de que a consideração do DNIT, ao tratar a taxa de crescimento de tráfego de 3,00% em função do PIB do país, pode ser equivocada, por não existir correlação entre os dois fatores.

Na figura 33 é apresentada a variação do tráfego com a variação da venda de caminhões para uma série histórica de 9 anos (do ano 2004 até o ano 2012). Nota-se, pela linha de tendência da média variação do tráfego, que a correlação entre esses fatores é inexistente ( $R^2 = 0,0161$ ), ou seja, pior ainda que a correlação com o PIB. Na comparação da linha de tendência da média do tráfego de veículos com a linha de igualdade nota-se que a

distância entre elas é maior que no caso anterior (para o PIB), o que corrobora para a inexistência de correlação entre esses dois fatores. Adicionalmente, a linha de tendência do conjunto de dados apresentou a pior correlação de todas, muito próxima de zero, com  $R^2$  igual a 0,0052, ficando, então, muito distante da correlação perfeita com linha de igualdade.

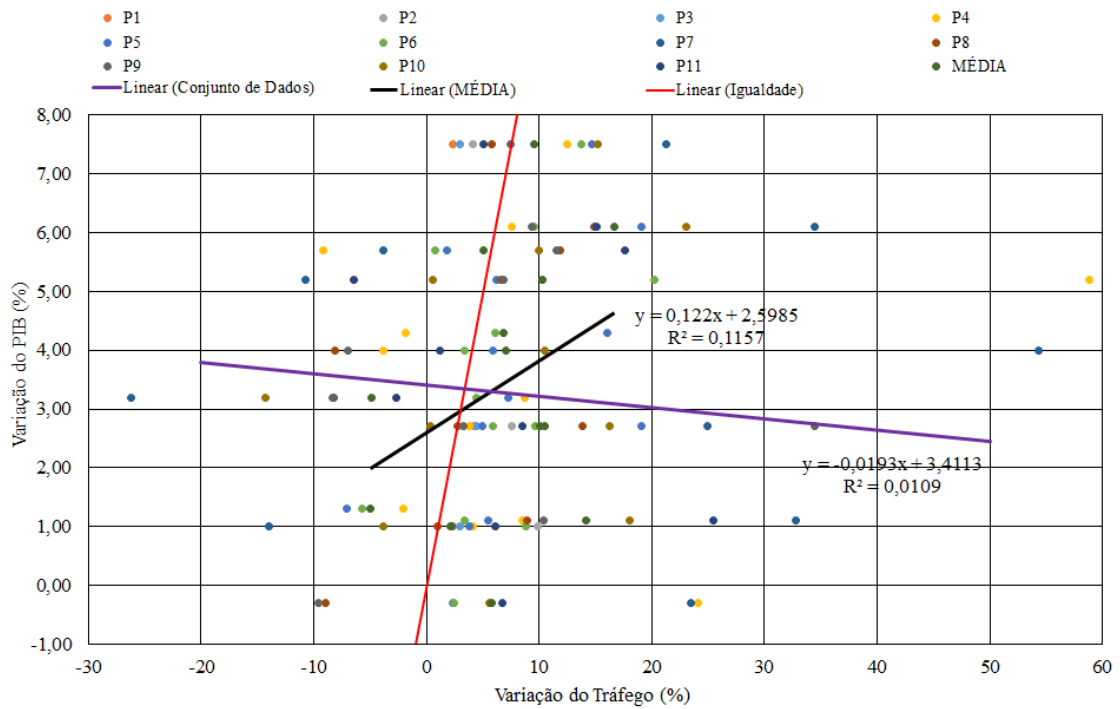


Figura 32 – Variação do tráfego x variação do PIB

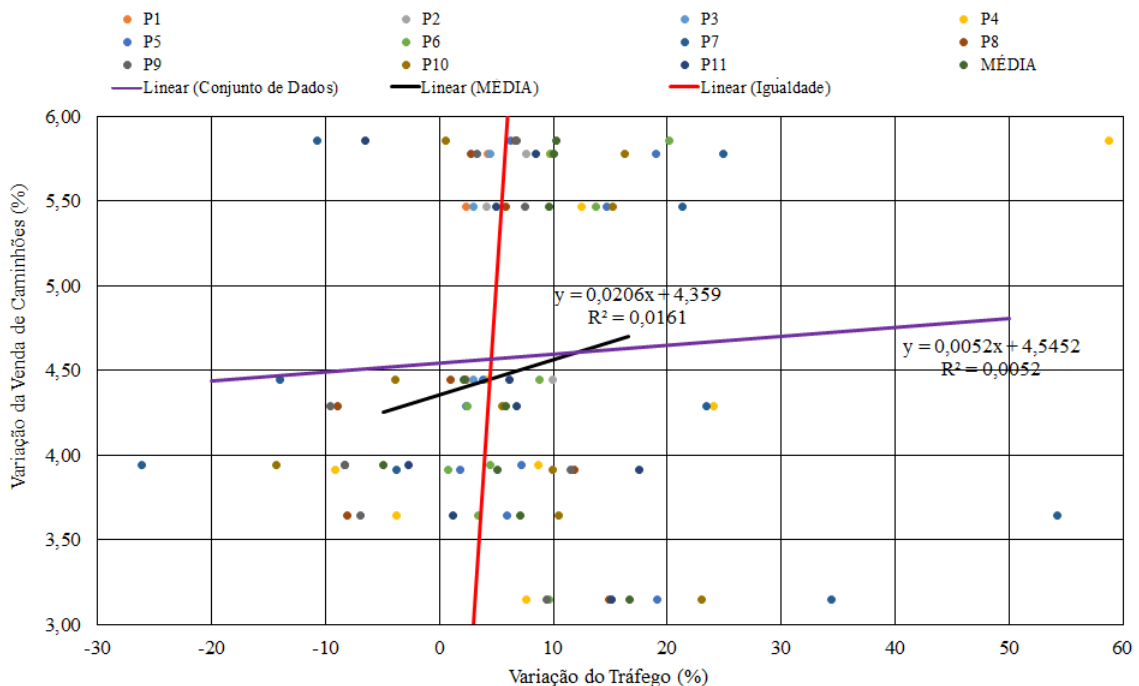


Figura 33 – Variação do tráfego x variação da venda de caminhões



Na figura 34 busca-se a correlação apenas considerando média da variação de tráfego de todas as praças para uma série histórica de 9 anos (do ano 2004 até o ano 2012), com os valores de variação do PIB e venda de caminhões. O valor da média da variação de tráfego na abscissa corresponde a um ano da série histórica em ordem crescente. Nota-se que, considerando somente a média da variação de tráfego, comparadas com os respectivos valores de variação do PIB e da venda de caminhões, a correlação melhora um pouco, ficando a melhor delas com  $R^2$  igual a 0,3345 para a venda de caminhões, mas ainda longe de uma correlação perfeita, ou seja, próxima de 1,0.

Portanto, pelas figuras 32, 33 e 34 pode-se dizer que não existe correlação entre a variação do tráfego com o PIB e com a venda de caminhões no país.

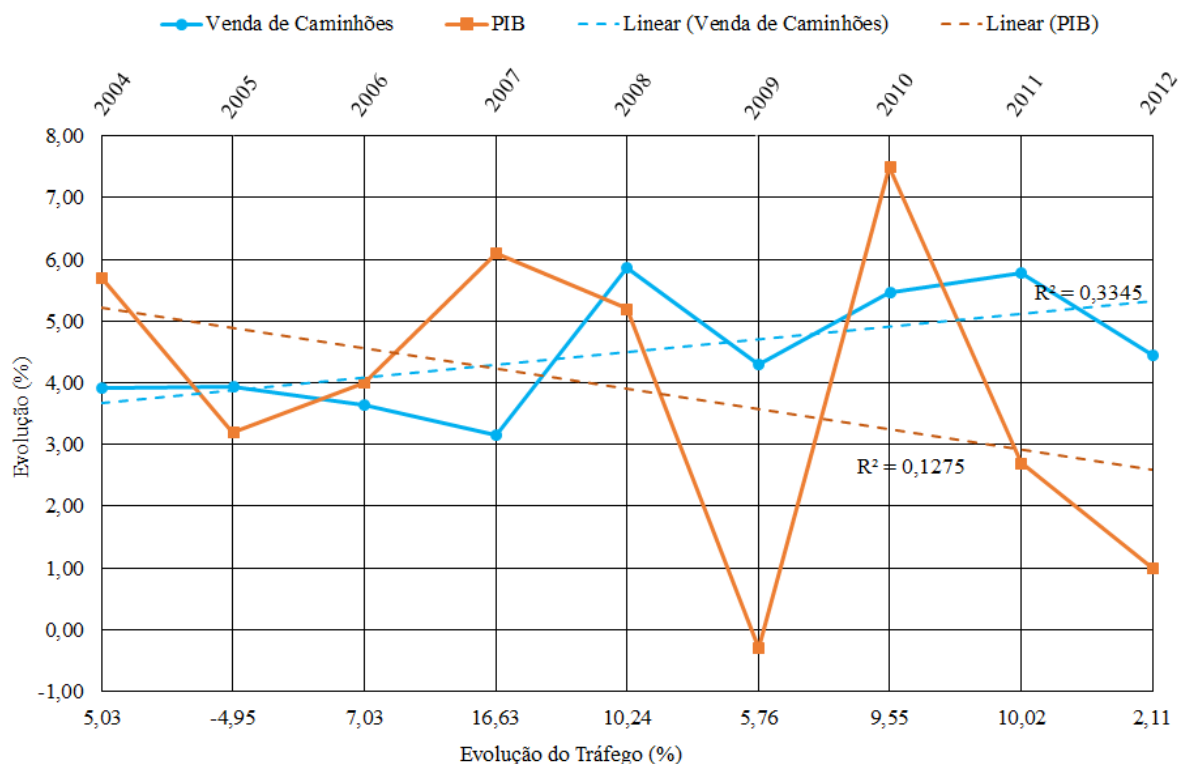


Figura 34 – Evolução do crescimento de tráfego em função da evolução do PIB e da venda de caminhões

Para fins comparativos, as figura 35, 36 e 37 apresentam o comportamento do VDM, do número NUSACE, do Fator de frota (Ff), do Fator de veículo (Fv) e da taxa de crescimento (TC) com o passar dos anos nas praças P1, P7 e P8, respectivamente. Obteve-se por essas praças pelo seguinte fato: as praças P1 e P7 apresentam, respectivamente, a menor e a maior taxa de crescimento média de tráfego; a praça P8 é objeto do estudo de caso desta pesquisa.

Ressalta-se, também, que para realizar este comparativo, parametrizaram-se todos os fatores envolvidos (VDM, N, Ff, Fv e TC) a fim de conseguir interpretá-los de forma conjunta.

Percebe-se, na figura 35, que a P1 embora a taxa de crescimento de tráfego tenha variado com o passar dos anos o VDM, o número N e o Fator de veículos apresentam uma tendência de crescimento para os próximos anos. O contrário acontece com o Fator de frota, ou seja, a tendência do mesmo é diminuir nos próximos anos. Com isso, pode-se concluir então há um crescimento nos veículos circulantes da rodovia, porém, a relação dos veículos comerciais passa a ser menor com o passar dos anos, o que pode ser creditado a alta venda de veículos de passeio.

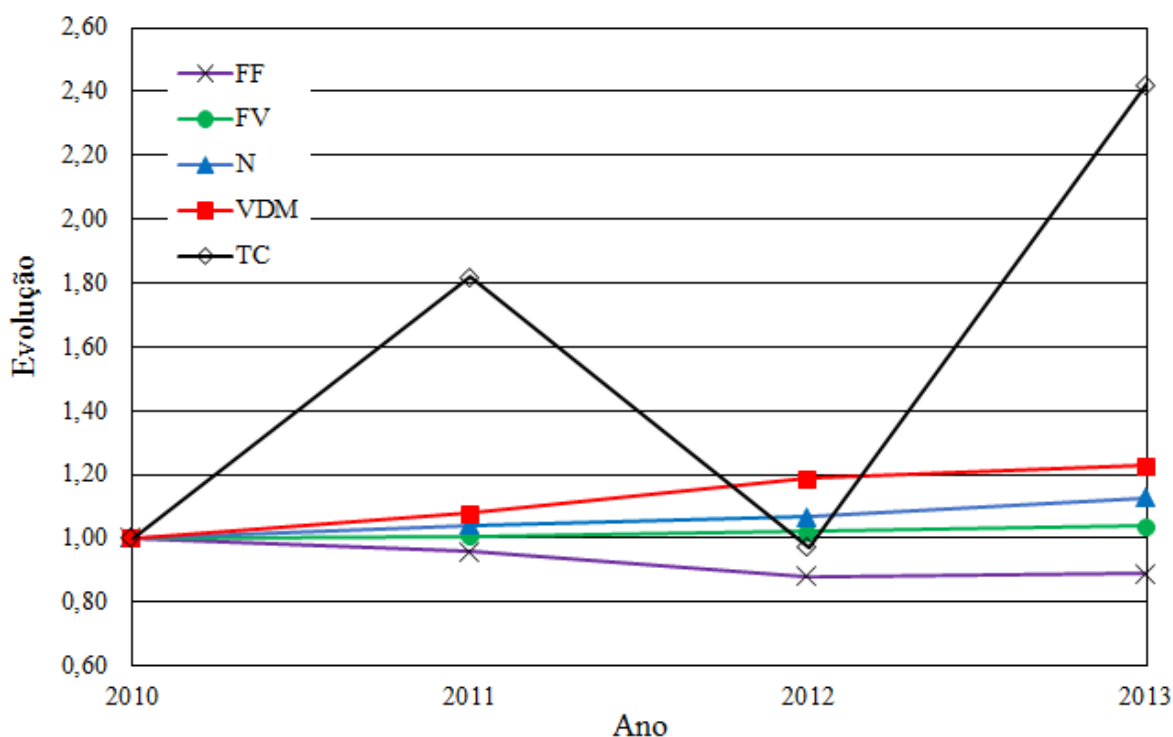


Figura 35 – Comportamento do VDM, N, Ff, Fv e TC da praça P1

A figura 36 mostra que a P7 teve uma grande variação da taxa de crescimento de tráfego em sua série histórica, devido basicamente pelo fato de rota de grãos para o porto de Rio Grande. Por outro lado, o VDM, o número N e o Fator de veículos e o Fator de frota apresentam grande tendência de crescimento para os próximos anos. Portanto, há um crescimento tanto dos veículos comerciais como dos veículos de passeio.

Pela figura 37 percebe-se que a P8 tem um comportamento semelhante a P1, com taxa de crescimento de tráfego variando ao longo da série histórica e o VDM, o número N e o Fator de veículos com tendência de crescimento. O Fator de frota apresenta tendência de redução.

Ou seja, nesta praça conclui-se que há um crescimento nos veículos circulantes da rodovia, porém, a relação dos veículos comerciais passa, também, a ser menor com o passar dos anos.

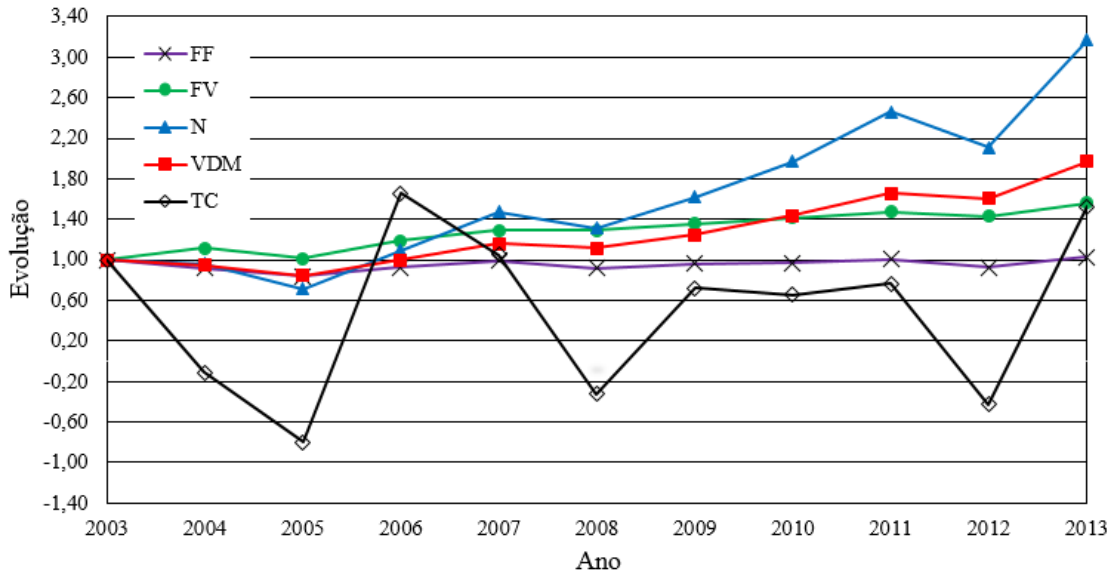


Figura 36 – Comportamento do VDM, N, Ff, Fv e TC da praça P7

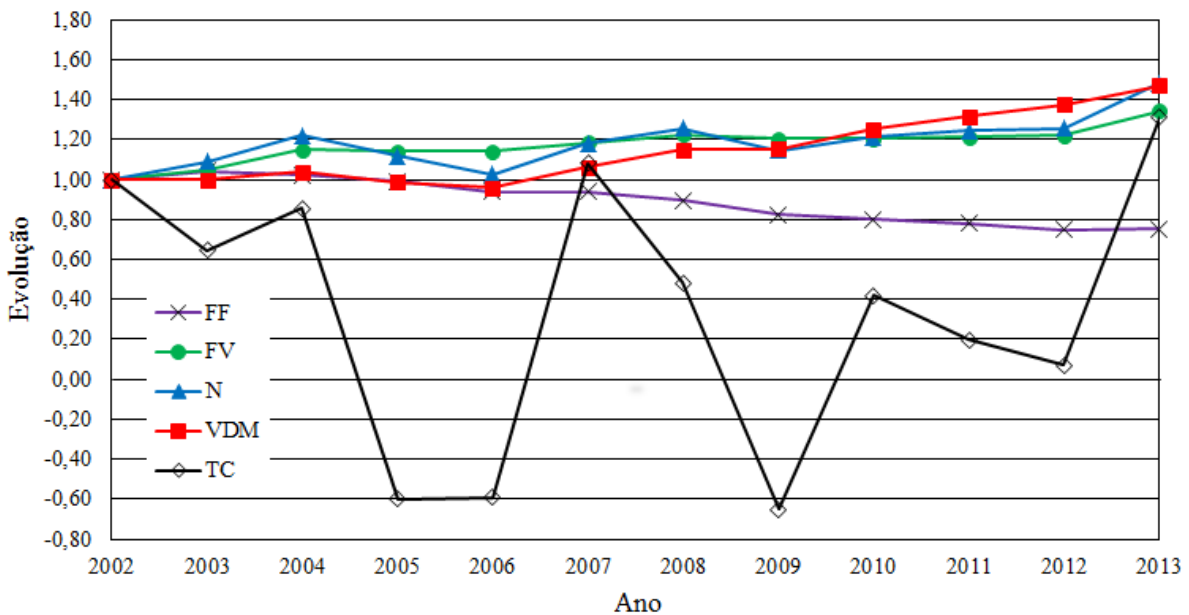


Figura 37 – Comportamento do VDM, N, Ff, Fv e TC da praça P8

### 4.3 Dimensionamento de pavimentos novos

Para o dimensionamento dos pavimentos novos o primeiro passo foi o cálculo do número N para BR 116 (P8 – Praça de Retiro), para qual foi proposto o estudo de caso, considerando um período de projeto de 10 anos e utilizando os cenários já propostos na metodologia com respectivas porcentagens de veículos com carga máxima legal, veículos vazios, veículos com sobrecarga e diferentes taxas de crescimento de tráfego. Para este caso cabe lembrar que o VDM utilizado foi do último ano da série histórica, ou seja, ano de 2013. O quadro 22 apresenta os valores de número N, calculados pela metodologia FEC da USACE, para cada um dos cenários propostos.

No quadro 22 se percebe a influência da sobrecarga no cálculo do número N de pavimentos flexíveis. Se comparar o cenário 1 (menor carregamento) com o cenário 19 (maior carregamento) a diferença no número N é na ordem de 23,11%. Já a influência da taxa de crescimento, no caso em estudo, ao comparar o cenário 1 com o cenário 2, nos quais há apenas a alteração da taxa de crescimento, a diferença é de aproximadamente 7,48% do primeiro para o segundo.

Além disso, pelo mesmo quadro (22) nota-se que ao aumentar a porcentagem de veículos com sobrecarga e diminuir a taxa de crescimento, esta última tem influência no cálculo do número N. Isto pode ser mais bem explicado comparando-se os cenários 10 e 15. Onde no cenário 15 tem-se uma maior porcentagem de veículos com sobrecarga, porém devido ao fato de a taxa de crescimento ser menor que no cenário 10, o mesmo apresenta um valor de número N menor. Enquanto o cenário 10 apresentou um número N igual a  $6,10E+07$  para o cenário 15 obteve-se  $5,85E+07$ . Dessa forma mostra-se, novamente, que a taxa de crescimento também tem influência marcante no cálculo do número N.

Cenários	% Veículos com CML	% Veículos com SC	% SC	% Veículos vazios	T.C. (%)	NUSACE acumulado (10 anos)
1	80	0	0	20	3,00	5,23E+07
2	80	0	0	20	4,86	5,65E+07
3	75	5	10	20	3,00	5,44E+07
4	75	5	10	20	4,86	5,88E+07
5	75	5	15	20	3,00	5,58E+07
6	75	5	15	20	4,86	6,03E+07
7	75	5	20	20	3,00	5,75E+07
8	75	5	20	20	4,86	6,22E+07
9	70	10	10	20	3,00	5,65E+07
10	70	10	10	20	4,86	6,10E+07
11	70	10	15	20	3,00	5,93E+07
12	70	10	15	20	4,86	6,41E+07
13	70	10	20	20	3,00	6,28E+07
14	70	10	20	20	4,86	6,79E+07
15	65	15	10	20	3,00	5,85E+07
16	65	15	10	20	4,86	6,33E+07
17	65	15	15	20	3,00	6,28E+07
18	65	15	15	20	4,86	6,79E+07
19	65	15	20	20	3,00	6,80E+07
20	65	15	20	20	4,86	7,35E+07

CML = Carga Máxima Legal; SC = Sobrecarga; T.C. = Taxa de Crescimento

#### Quadro 22 - Número N para os cenários da BR 116

##### 4.3.1 Dimensionamento pelo método do DNIT

O dimensionamento pelo método do DNIT foi realizado por meio da metodologia apresentada, onde, a partir do número NUSACE para cada um dos cenários, foram obtidas as estruturas para os três diferentes casos em estudo: CBR subleito = 4%; CBR subleito = 10%; e CBR subleito = 16%. Os quadros 23, 24 e 25 mostram os resultados do dimensionamento para os diferentes valores de CBR, respectivamente.

Para a determinação das espessuras das camadas do pavimento, foram adotados os seguintes critérios:

- O revestimento considerado foi o concreto asfáltico, com  $KR = 2$ ;
- Base e sub-base, com  $KB = 1$  e  $KS = 1$ , respectivamente.

O quadro 23, para CBR subleito 4%, mostra que, provavelmente pelo método do DNIT ser semi-empírico, o dimensionamento do pavimento em estudo, para os diferentes cenários, teve alteração de apenas 2,0 cm na camada de sub-base para os cenários com maior valor de número N. As camadas de revestimento e base mantiveram-se inalteradas. Ressalta-se que, como os valores de número N são todos maiores que 5,00E+07 considerou-se,

conforme manual do DNIT, espessura de revestimento igual a 12,5 cm, proporcionando, então, a camada de base igual a 15 cm para todos os cenários. Já a camada de sub-base alterou-se apenas para os dois menores carregamentos (menores valores de número N – cenários 1 e 3) e para o maior carregamento (maior valor de número N – cenário 20).

Neste caso, quando  $CBR = 4\%$ , nota-se que foram obtidas elevadas espessuras de sub-base, o que implicou na opção por duas camadas, pois o material (macadame seco) permite um limite de espessura variando de um mínimo 16 cm até um máximo de 21 cm. Ou seja, quando a espessura for maior que 21 cm, deve ser executada em mais de uma camada.

Cenário	NUSACE acumulado (10 anos)	R (cm)	B (cm)	h20 (cm)	h20 adotado (cm)
1	5,23E+07	12,5	15	40	2 camadas de 20 cm
2	5,65E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
3	5,44E+07	12,5	15	40	2 camadas de 20 cm
4	5,88E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
5	5,58E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
6	6,03E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
7	5,75E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
8	6,22E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
9	5,65E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
10	6,10E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
11	5,93E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
12	6,41E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
13	6,28E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
14	6,79E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
15	5,85E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
16	6,33E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
17	6,28E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
18	6,79E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
19	6,80E+07	12,5	15	41	2 camadas de 21 cm
20	7,35E+07	12,5	15	42	2 camadas de 21 cm

R = revestimento; B = base; h20 = sub-base

#### Quadro 23 – Dimensionamento pavimentos pelo método do DNIT – CBR subleito = 4%

No quadro 24, para CBR subleito 10%, verifica-se que não houve diferença na estrutura do pavimento para diferentes cenários de carregamento (diferentes número N). As camadas de revestimento e base se mativeram com as mesmas espessuras de quando realizado o dimensionamento para  $CBR = 4\%$ , 12,5 cm e 15 cm, respectivamente. Porém, a camada de sub-base dimensionada para este caso foi de 16 cm, creditada a melhor qualidade do material de subleito. Percebe-se, novamente, que o dimensionamento do DNIT acaba por superdimensionar ou sobredimensionar a estrutura, pois mesmo com um aumento no carregamento na ordem de 23,11%, dos cenários de menor para os de maior carregamento, as estruturas continuam as mesmas para todos cenários.

Neste caso, quando CBR = 10%, nota-se que para base e sub-base as espessuras de pavimentos foram às mínimas exigidas pelo método do DNIT. Já para o revestimento, atingiu-se o limite superior de método.

<b>Cenário</b>	<b>NUSACE acumulado (10 anos)</b>	<b>R (cm)</b>	<b>B (cm)</b>	<b>h20 (cm)</b>
<b>1</b>	5,23E+07	12,5	15	16
<b>2</b>	5,65E+07	12,5	15	16
<b>3</b>	5,44E+07	12,5	15	16
<b>4</b>	5,88E+07	12,5	15	16
<b>5</b>	5,58E+07	12,5	15	16
<b>6</b>	6,03E+07	12,5	15	16
<b>7</b>	5,75E+07	12,5	15	16
<b>8</b>	6,22E+07	12,5	15	16
<b>9</b>	5,65E+07	12,5	15	16
<b>10</b>	6,10E+07	12,5	15	16
<b>11</b>	5,93E+07	12,5	15	16
<b>12</b>	6,41E+07	12,5	15	16
<b>13</b>	6,28E+07	12,5	15	16
<b>14</b>	6,79E+07	12,5	15	16
<b>15</b>	5,85E+07	12,5	15	16
<b>16</b>	6,33E+07	12,5	15	16
<b>17</b>	6,28E+07	12,5	15	16
<b>18</b>	6,79E+07	12,5	15	16
<b>19</b>	6,80E+07	12,5	15	16
<b>20</b>	7,35E+07	12,5	15	16

R = revestimento; B = base; h20 = sub-base

#### Quadro 24 – Dimensionamento pavimentos pelo método do DNIT – CBR subleito = 10%

No quadro 25, para CBR subleito 16%, é notável a diferença das estruturas de pavimento se comparadas com as dimensionadas com CBR de subleito igual a 4% e 10%. No caso, para diferentes cenários de carregamento, nota-se que pelo dimensionamento do DNIT não há necessidade da implantação da camada de sub-base, apenas o revestimento e a base resistiriam aos efeitos do tráfego, o que pode ser creditado pela elevada espessura de revestimento e, obviamente, a melhor qualidade do material de subleito.

Cenário	NUSACE acumulado (10 anos)	R (cm)	B (cm)
1	5,23E+07	12,5	15
2	5,65E+07	12,5	15
3	5,44E+07	12,5	15
4	5,88E+07	12,5	15
5	5,58E+07	12,5	15
6	6,03E+07	12,5	15
7	5,75E+07	12,5	15
8	6,22E+07	12,5	15
9	5,65E+07	12,5	15
10	6,10E+07	12,5	15
11	5,93E+07	12,5	15
12	6,41E+07	12,5	15
13	6,28E+07	12,5	15
14	6,79E+07	12,5	15
15	5,85E+07	12,5	15
16	6,33E+07	12,5	15
17	6,28E+07	12,5	15
18	6,79E+07	12,5	15
19	6,80E+07	12,5	15
20	7,35E+07	12,5	15

R = revestimento; B = base

Quadro 25 – Dimensionamento pavimentos pelo método do DNIT – CBR subleito = 16%

Observando os resultados obtidos para o dimensionamento pelo método do DNIT para as diferentes considerações de CBR de subleito, pode-se constatar algumas características e limitações do método, como por exemplo: a espessura do revestimento é apenas função do número N, assim como, em parte também acabam sendo, as espessuras da base e sub-base; o revestimento de 12,5 cm para todos os casos estudados mostra que atingiu-se o limite superior de método; quanto maior o número N, menor fica a espessura da camada de base e sub-base, levando sempre à adoção da espessura mínima indicada; e o dimensionamento se dá apenas em função da qualidade do material de subleito, determinada pelo ensaio de CBR.

#### 4.3.2 Dimensionamento empírico-mecanístico

Esta etapa da pesquisa foi auxiliada pela ferramenta AEMC do software SisPav a fim de encontrar valores de  $\epsilon_t$  (deformação de tração na fibra inferior do revestimento) e  $\epsilon_v$  (deformação vertical no topo do subleito) críticos, ou seja, menores do que os valores



calculados pelos modelos para o tráfego considerado. Para isso, foram consideradas, como dados de entrada na ferramenta, as estruturas dimensionadas pelo método do DNIT. Tal processo é realizado alterando-se apenas a espessura do revestimento, ou seja, variar-se-á a espessura de revestimento até que ambos os casos ( $\epsilon t$  e  $\epsilon v$ ) atendam aos requisitos dos modelos. Além disso, como resultado adicional desta etapa, verifica-se a localização das deformações, já explicitadas na metodologia na figura 15.

Para adequação dos métodos (Asphalt Institute e FHWA) faz-se necessário encontrar o número  $N_{AASHTO}$  para cada um dos cenários. Logo, para isso, utilizou-se a conversão pela relação  $NUSACE/N_{AASHTO}$  encontrada para a praça em estudo, sendo apresentada na equação 24. O valor 3,31 corresponde a média da série histórica da relação  $NUSACE/N_{AASHTO}$ . Os valores de número  $N_{AASHTO}$  para cada um dos cenários é apresentado na tabela 11.

$$N_{AASHTO} = \frac{NUSACE}{3,31} \quad (24)$$

Tabela 11 – NUSACE e  $N_{AASHTO}$  para cada um dos cenários

Cenários	NUSACE	$N_{AASHTO}$
1	5,23E+07	1,58E+07
2	5,65E+07	1,71E+07
3	5,44E+07	1,81E+07
4	5,88E+07	1,96E+07
5	5,58E+07	1,86E+07
6	6,03E+07	2,01E+07
7	5,75E+07	1,92E+07
8	6,22E+07	2,07E+07
9	5,65E+07	1,88E+07
10	6,10E+07	2,03E+07
11	5,93E+07	1,98E+07
12	6,41E+07	2,14E+07
13	6,28E+07	2,09E+07
14	6,79E+07	2,26E+07
15	5,85E+07	1,95E+07
16	6,33E+07	2,11E+07
17	6,28E+07	2,09E+07
18	6,79E+07	2,26E+07
19	6,80E+07	2,27E+07
20	7,35E+07	2,45E+07

Para esta etapa foram realizadas duas comparações: 1ª) análise do  $\epsilon t$  (FHWA) e  $\epsilon v$  (Asphalt Institute); e 2ª) análise do  $\epsilon t$  (FRANCO) e  $\epsilon v$  (Asphalt Institute).

Cabe ressaltar que para os quadros 26, 27, 28, 29, 30, 31 são apresentados os valores de número N calculados pela metodologia USACE apenas para comparação de solicitação dos diferentes cenários/casos. Os modelos de fadiga da FHWA e de deformação permanente do Asphalt Institute foram calculados com os valores de número N da metodologia AASHTO e o modelo de fadiga do FRANCO calculado com o número N da metodologia USACE.

Os quadros 26, 27 e 28 apresentam os dados encontrados para comparação dos métodos  $\epsilon_t$  (FHWA) e  $\epsilon_v$  (Asphalt Institute), para CBR subleito igual a 4%, 10% e 16%, respectivamente. Adicionalmente, é apresentada a figura 38 comparando valores para diferentes CBR de subleito.

Cenário/ Caso	Número NUSACE (10 anos)	FHWA	$\epsilon_t$ crítico ( $\mu\text{strain}$ )	Posição $\epsilon_t$ crítico	ASPHALT INSTITUTE	$\epsilon_v$ crítico ( $\mu\text{strain}$ )	Posição $\epsilon_v$ crítico	Espessura de Revestimento (cm)	Fator determinante
		$\epsilon_t$ ( $\mu\text{strain}$ )			$\epsilon_v$ ( $\mu\text{strain}$ )				
1/1	5,23E+07	178,95	177,00	4,5	-254,90	-194,00	7,8	14	Fadiga
2/2	5,65E+07	175,03	175,00	4,5	-250,50	-187,00	7,8	14	Fadiga
3/3	5,44E+07	172,09	166,00	4	-247,19	-194,00	7,8	15	Fadiga
4/4	5,88E+07	168,32	164,00	4,5	-242,93	-187,00	7,8	15	Fadiga
5/5	5,58E+07	170,82	164,00	4,5	-245,76	-187,00	7,8	15	Fadiga
6/6	6,03E+07	167,08	164,00	4,5	-241,53	-187,00	7,8	15	Fadiga
7/7	5,75E+07	169,34	164,00	4,5	-244,08	-187,00	7,8	15	Fadiga
8/8	6,22E+07	165,63	164,00	4,5	-239,87	-187,00	7,8	15	Fadiga
9/9	5,65E+07	170,26	164,00	4,5	-245,12	-187,00	7,8	15	Fadiga
10/10	6,10E+07	166,53	164,00	4,5	-240,90	-187,00	7,8	15	Fadiga
11/11	5,93E+07	167,89	164,00	4,5	-242,44	-187,00	7,8	15	Fadiga
12/12	6,41E+07	164,21	164,00	4,5	-238,26	-187,00	7,8	15	Fadiga
13/13	6,28E+07	165,18	164,00	4,5	-239,37	-187,00	7,8	15	Fadiga
14/14	6,79E+07	161,57	154,00	4	-235,24	-187,00	7,8	16	Fadiga
15/15	5,85E+07	168,51	164,00	4,5	-243,15	-187,00	7,8	15	Fadiga
16/16	6,33E+07	164,82	164,00	4,5	-238,96	-187,00	7,8	15	Fadiga
17/17	6,28E+07	165,17	164,00	4,5	-239,35	-187,00	7,8	15	Fadiga
18/18	6,79E+07	161,55	154,00	4	-235,22	-187,00	7,8	16	Fadiga
19/19	6,80E+07	161,46	154,00	4	-235,11	-187,00	7,8	16	Fadiga
20/20	7,35E+07	157,92	154,00	4	-231,06	-187,00	7,8	16	Fadiga

$\epsilon_t$  - deformação de tração;  $\epsilon_v$  - deformação vertical no topo do subleito.

Quadro 26 – Análise empírico-mecânica:  $\epsilon_t$  (FHWA) e  $\epsilon_v$  (Asphalt Institute) – CBR 4%

Cenário/ Caso	Número NUSACE (10 anos)	FHWA	$\epsilon_t$ crítico ( $\mu\text{strain}$ )	Posição $\epsilon_t$ crítico	ASPHALT INSTITUTE	$\epsilon_v$ crítico ( $\mu\text{strain}$ )	Posição $\epsilon_v$ crítico	Espessura de Revestimento (cm)	Fator determinante
		$\epsilon_t$ ( $\mu\text{strain}$ )			$\epsilon_v$ ( $\mu\text{strain}$ )				
1/21	5,23E+07	178,95	166,00	4,5	-254,90	-242,00	7	15	Fadiga
2/22	5,65E+07	175,03	166,00	4,5	-250,50	-242,00	7	15	Fadiga
3/23	5,44E+07	172,09	166,00	4,5	-247,19	-242,00	7	15	Fadiga
4/24	5,88E+07	168,32	166,00	4,5	-242,93	-242,00	7	15	Fadiga
5/25	5,58E+07	170,82	166,00	4,5	-245,76	-242,00	7	15	Fadiga
6/26	6,03E+07	167,08	166,00	4,5	-241,53	-232,00	7	15	Fadiga
7/27	5,75E+07	169,34	166,00	4,5	-244,08	-242,00	7	15	Fadiga
8/28	6,22E+07	165,63	155,00	4	-239,87	-232,00	7	16	Fadiga
9/29	5,65E+07	170,26	166,00	4,5	-245,12	-242,00	7	15	Fadiga
10/30	6,10E+07	166,53	166,00	4,5	-240,90	-232,00	7	15	Fadiga
11/31	5,93E+07	167,89	166,00	4,5	-242,44	-242,00	7	15	Fadiga
12/32	6,41E+07	164,21	155,00	4	-238,26	-232,00	7	16	Fadiga
13/33	6,28E+07	165,18	155,00	4	-239,37	-232,00	7	16	Fadiga
14/34	6,79E+07	161,57	155,00	4	-235,24	-232,00	7	16	Fadiga
15/35	5,85E+07	168,51	166,00	4,5	-243,15	-242,00	7	15	Fadiga
16/36	6,33E+07	164,82	155,00	4	-238,96	-232,00	7	16	Fadiga
17/37	6,28E+07	165,17	155,00	4	-239,35	-232,00	7	16	Fadiga
18/38	6,79E+07	161,55	155,00	4	-235,22	-232,00	7	16	Fadiga
19/39	6,80E+07	161,46	155,00	4	-235,11	-232,00	7	16	Fadiga
20/40	7,35E+07	157,92	155,00	4	-231,06	-214,00	7	16	Fadiga

$\epsilon_t$  - deformação de tração;  $\epsilon_v$  - deformação vertical no topo do subleito.

#### Quadro 27 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon_t$ (FHWA) e $\epsilon_v$ (Asphalt Institute) – CBR 10%

Cenário/ Caso	Número NUSACE (10 anos)	FHWA	$\epsilon_t$ crítico ( $\mu\text{strain}$ )	Posição $\epsilon_t$ crítico	ASPHALT INSTITUTE	$\epsilon_v$ crítico ( $\mu\text{strain}$ )	Posição $\epsilon_v$ crítico	Espessura de Revestimento (cm)	Fator determinante
		$\epsilon_t$ ( $\mu\text{strain}$ )			$\epsilon_v$ ( $\mu\text{strain}$ )				
1/41	5,23E+07	178,95	176,00	4	-254,90	-248,00	8,9	14	Fadiga e Def. Perm.
2/42	5,65E+07	175,03	162,00	4,5	-250,50	-248,00	8,9	15	Fadiga
3/43	5,44E+07	172,09	162,00	4,5	-247,19	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
4/44	5,88E+07	168,32	162,00	4,5	-242,93	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
5/45	5,58E+07	170,82	162,00	4,5	-245,76	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
6/46	6,03E+07	167,08	162,00	4,5	-241,53	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
7/47	5,75E+07	169,34	162,00	4,5	-244,08	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
8/48	6,22E+07	165,63	162,00	4,5	-239,87	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
9/49	5,65E+07	170,26	162,00	4,5	-245,12	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
10/50	6,10E+07	166,53	162,00	4,5	-240,90	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
11/51	5,93E+07	167,89	162,00	4,5	-242,44	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
12/52	6,41E+07	164,21	162,00	4,5	-238,26	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
13/53	6,28E+07	165,18	162,00	4,5	-239,37	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
14/54	6,79E+07	161,57	151,00	4	-235,24	-226,00	7,8,9	16	Fadiga
15/55	5,85E+07	168,51	162,00	4,5	-243,15	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
16/56	6,33E+07	164,82	162,00	4,5	-238,96	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
17/57	6,28E+07	165,17	162,00	4,5	-239,35	-226,00	7,8,9	15	Fadiga e Def. Perm.
18/58	6,79E+07	161,55	151,00	4	-235,22	-226,00	7,8,9	16	Fadiga
19/59	6,80E+07	161,46	151,00	4	-235,11	-226,00	7,8,9	16	Fadiga
20/60	7,35E+07	157,92	151,00	4	-231,06	-226,00	7,8,9	16	Fadiga

$\epsilon_t$  - deformação de tração;  $\epsilon_v$  - deformação vertical no topo do subleito.

#### Quadro 28 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon_t$ (FHWA) e $\epsilon_v$ (Asphalt Institute) – CBR 16%

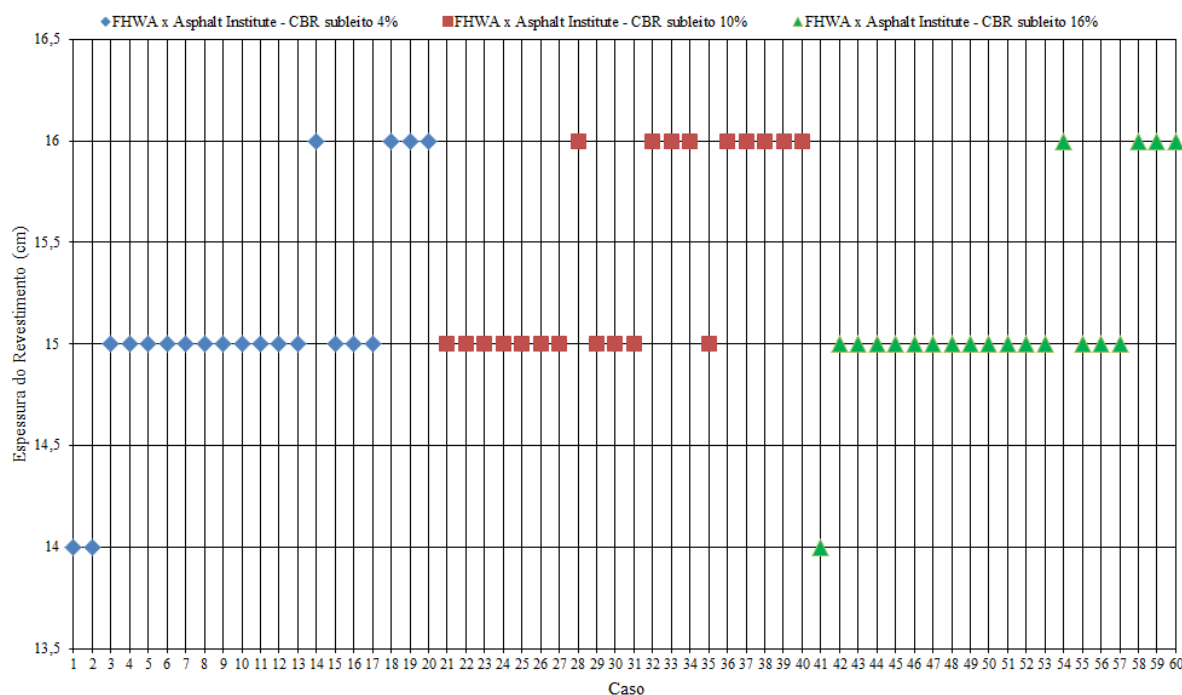


Figura 38 – Análise empírico-mecânica:  $\epsilon_t$  (FHWA) e  $\epsilon_v$  (Asphalt Institute)

Ao analisar o quadro 26 e a figura 38, para CBR subleito igual a 4%, percebe-se que o fator determinante no dimensionamento empírico-mecânico é a deformação de tração na fibra inferior do revestimento que conduz ao trincamento por fadiga em todos os cenários (caso 1 ao 20), ou seja, para todos os carregamentos. Além disso, é notável que quanto maior for o carregamento (maior número N), maior é a espessura de revestimento. Para os menores carregamentos tem-se espessura de revestimento de 14 cm. Ao modo que há um aumento no carregamento aumenta-se a espessura, para 15 cm para carregamentos intermediários e para 16 cm para os maiores valores de número N, casos 14, 18, 19 e 20. Dessa forma, se comparado com o método do DNIT (espessura de revestimento de 12,5 cm para todos os cenários), percebe-se que ao modo que o DNIT não considera as propriedades dos materiais, como por exemplo, o módulo de resiliência, o dimensionamento acaba sendo equivocado e, como consequência, há redução de vida útil ou degradação precoce do pavimento.

Assim como para o CBR subleito igual a 4%, para o CBR subleito igual a 10% (quadro 27 e figura 38) nota-se que o fator determinante no dimensionamento empírico-mecânico é trincamento por fadiga (na fibra inferior do revestimento) em todos os cenários, ou seja, para todos os carregamentos (números N). Neste caso, para menores valores de número N tem-se espessura de revestimento de 15 cm. Já para os maiores carregamentos, a espessura é 16 cm. Percebe-se que, se comparar os mesmos casos do CBR 4% com o CBR 10%, neste segundo para os mesmos carregamentos a espessura de revestimento é maior em

alguns casos. Isso credita-se ao fato de que os pavimentos dimensionados pelo DNIT (utilizados para análise empírico-mecânica) tem diferente espessura total do pavimento para diferentes valores de CBR. Ou seja, para CBR 10% a espessura total do pavimento é menor que para CBR 4%, isso explica o fato de as espessuras de revestimento serem maiores para CBR 10%, pois a espessura total do pavimento é menor, solicitando mais o revestimento.

Diferentemente dos dimensionamentos com CBR de subleito igual a 4% e 10%, no dimensionamento empírico-mecânico com CBR de subleito igual a 16% (quadro 28 e figura 38), o fator determinante em alguns cenários é a fadiga (na fibra inferior do revestimento), já em outros cenários são determinantes a fadiga em conjunto com a deformação permanente (no topo do subleito), devido a menor espessura total do pavimento que, para este caso, acaba por solicitar mais o subleito. Nota-se que, para o menor carregamento (caso 41) a espessura de revestimento é de 14 cm e, para os maiores carregamentos (casos 54, 58, 59 e 60) a espessura é de 16 cm. Já para valores intermediários de número N, a espessura de revestimento é de 15 cm.

Ao analisar os quadros 26, 27 e 28, quanto ao local que o eixo padrão está solicitando mais o pavimento na fibra inferior do revestimento e no topo do subleito têm-se as seguintes considerações: tanto para o dimensionamento das estruturas com CBR subleito 4% como para CBR subleito 10%, tem-se a fibra inferior do revestimento mais solicitada pelos pneus do eixo padrão (pontos 4 e 5), entre a borda e o centro dos pneus. Já o topo do subleito é mais solicitado pelos pontos entre as rodas do eixo padrão (pontos 7 e 8). Para estrutura de pavimento com CBR subleito 16% a fibra inferior do revestimento é mais solicitada também pelos pneus do eixo padrão (pontos 4 e 5). No entanto, o topo do subleito, neste caso, passa a ser solicitado pelo ponto central entre as rodas do eixo padrão (pontos 7 e 8) e também pelas bordas do pneus (ponto 9), devido, basicamente, ao fato da estrutura ter espessura total do pavimento menor que as anteriores (CBR 4% e CBR 10%), solicitando mais o subleito e, reportando o fato antes mencionado, de que para este caso, a deformação permanente também passou a ser determinante no dimensionamento. Para melhor entender os pontos citados, aconselha-se visualizar a figura 15.

Os quadros 29, 30 e 31 apresentam os dados encontrados para comparação dos métodos  $\epsilon_t$  (FRANCO) e  $\epsilon_v$  (Asphalt Institute), para CBR subleito igual a 4%, 10% e 16%, respectivamente. Adicionalmente, é apresentada a figura 39 comparando valores para diferentes CBR de subleito.

Cenário/ Caso	Número NUSACE (10 anos)	FRANCO	$\epsilon_t$ crítico ( $\mu\text{strain}$ )	Posição $\epsilon_t$ crítico	ASPHALT INSTITUTE	$\epsilon_v$ crítico ( $\mu\text{strain}$ )	Posição $\epsilon_v$ crítico	Espessura de Revestimento (cm)	Fator determinante
		$\epsilon_t$ ( $\mu\text{strain}$ )			$\epsilon_v$ ( $\mu\text{strain}$ )				
1/1	5,23E+07	213,45	196,00	4,5	-254,90	-194,00	7,8	12,5	-
2/2	5,65E+07	207,64	194,00	4,5	-250,50	-187,00	7,8	12,5	-
3/3	5,44E+07	210,52	196,00	4,5	-247,19	-194,00	7,8	12,5	-
4/4	5,88E+07	204,80	194,00	4,5	-242,93	-187,00	7,8	12,5	-
5/5	5,58E+07	208,60	194,00	4,5	-245,76	-187,00	7,8	12,5	-
6/6	6,03E+07	202,93	194,00	4,5	-241,53	-187,00	7,8	12,5	-
7/7	5,75E+07	206,34	194,00	4,5	-244,08	-187,00	7,8	12,5	-
8/8	6,22E+07	200,73	194,00	4,5	-239,87	-187,00	7,8	12,5	-
9/9	5,65E+07	207,74	194,00	4,5	-245,12	-187,00	7,8	12,5	-
10/10	6,10E+07	202,09	194,00	4,5	-240,90	-187,00	7,8	12,5	-
11/11	5,93E+07	204,15	194,00	4,5	-242,44	-187,00	7,8	12,5	-
12/12	6,41E+07	198,60	194,00	4,5	-238,26	-187,00	7,8	12,5	-
13/13	6,28E+07	200,06	194,00	4,5	-239,37	-187,00	7,8	12,5	-
14/14	6,79E+07	194,62	194,00	4,5	-235,24	-187,00	7,8	12,5	-
15/15	5,85E+07	205,10	194,00	4,5	-243,15	-187,00	7,8	12,5	-
16/16	6,33E+07	199,52	194,00	4,5	-238,96	-187,00	7,8	12,5	-
17/17	6,28E+07	200,04	194,00	4,5	-239,35	-187,00	7,8	12,5	-
18/18	6,79E+07	194,60	194,00	4,5	-235,22	-187,00	7,8	12,5	-
19/19	6,80E+07	194,46	194,00	4,5	-235,11	-187,00	7,8	12,5	-
20/20	7,35E+07	189,17	188,00	4,5	-231,06	-187,00	7,8	13	Fadiga

$\epsilon_t$  - deformação de tração;  $\epsilon_v$  - deformação vertical no topo do subleito.

#### Quadro 29 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon_t$ (FRANCO) e $\epsilon_v$ (Asphalt Institute) - CBR 4%

Cenário/ Caso	Número NUSACE (10 anos)	FRANCO	$\epsilon_t$ crítico ( $\mu\text{strain}$ )	Posição $\epsilon_t$ crítico	ASPHALT INSTITUTE	$\epsilon_v$ crítico ( $\mu\text{strain}$ )	Posição $\epsilon_v$ crítico	Espessura de Revestimento (cm)	Fator determinante
		$\epsilon_t$ ( $\mu\text{strain}$ )			$\epsilon_v$ ( $\mu\text{strain}$ )				
1/21	5,23E+07	213,45	200,00	4,5	-254,90	-242,00	7	12,5	-
2/22	5,65E+07	207,64	200,00	4,5	-250,50	-242,00	7	12,5	-
3/23	5,44E+07	210,52	200,00	4,5	-247,19	-242,00	7	12,5	-
4/24	5,88E+07	204,80	200,00	4,5	-242,93	-242,00	7	12,5	-
5/25	5,58E+07	208,60	200,00	4,5	-245,76	-242,00	7	12,5	-
6/26	6,03E+07	202,93	200,00	4,5	-241,53	-232,00	7	13	Def. Permanente
7/27	5,75E+07	206,34	200,00	4,5	-244,08	-242,00	7	12,5	-
8/28	6,22E+07	200,73	200,00	4,5	-239,87	-232,00	7	13	Def. Permanente
9/29	5,65E+07	207,74	200,00	4,5	-245,12	-242,00	7	12,5	-
10/30	6,10E+07	202,09	200,00	4,5	-240,90	-232,00	7	13	Def. Permanente
11/31	5,93E+07	204,15	200,00	4,5	-242,44	-242,00	7	12,5	-
12/32	6,41E+07	198,60	193,00	4,5	-238,26	-232,00	7	13	Fadiga e Def. Perm.
13/33	6,28E+07	200,06	200,00	4,5	-239,37	-232,00	7	13	Def. Permanente
14/34	6,79E+07	194,62	193,00	4,5	-235,24	-232,00	7	13	Fadiga e Def. Perm.
15/35	5,85E+07	205,10	200,00	4,5	-243,15	-242,00	7	12,5	-
16/36	6,33E+07	199,52	193,00	4,5	-238,96	-232,00	7	13	Fadiga e Def. Perm.
17/37	6,28E+07	200,04	200,00	4,5	-239,35	-232,00	7	13	Def. Permanente
18/38	6,79E+07	194,60	193,00	4,5	-235,22	-232,00	7	13	Fadiga e Def. Perm.
19/39	6,80E+07	194,46	193,00	4,5	-235,11	-232,00	7	13	Fadiga e Def. Perm.
20/40	7,35E+07	189,17	179,00	4,5	-231,06	-214,00	7	14	Fadiga e Def. Perm.

$\epsilon_t$  - deformação de tração;  $\epsilon_v$  - deformação vertical no topo do subleito.

#### Quadro 30 – Análise empírico-mecanística: $\epsilon_t$ (FRANCO) e $\epsilon_v$ (Asphalt Institute) - CBR 10%

Cenário/ Caso	Número NUSACE (10 anos)	FRANCO	$\epsilon_t$ crítico ( $\mu$ strain)	Posição $\epsilon_t$ crítico	ASPHALT INSTITUTE	$\epsilon_v$ crítico ( $\mu$ strain)	Posição $\epsilon_v$ crítico	Espessura de Revestimento (cm)	Fator determinante
		$\epsilon_t$ ( $\mu$ strain)			$\epsilon_v$ ( $\mu$ strain)				
1/41	5,23E+07	213,45	198,00	4,5	-254,90	-248,00	8,9	14	Def. Permanente
2/42	5,65E+07	207,64	198,00	4,5	-250,50	-248,00	8,9	15	Def. Permanente
3/43	5,44E+07	210,52	198,00	4,5	-247,19	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
4/44	5,88E+07	204,80	198,00	4,5	-242,93	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
5/45	5,58E+07	208,60	198,00	4,5	-245,76	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
6/46	6,03E+07	202,93	198,00	4,5	-241,53	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
7/47	5,75E+07	206,34	198,00	4,5	-244,08	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
8/48	6,22E+07	200,73	198,00	4,5	-239,87	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
9/49	5,65E+07	207,74	198,00	4,5	-245,12	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
10/50	6,10E+07	202,09	198,00	4,5	-240,90	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
11/51	5,93E+07	204,15	198,00	4,5	-242,44	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
12/52	6,41E+07	198,60	198,00	4,5	-238,26	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
13/53	6,28E+07	200,06	198,00	4,5	-239,37	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
14/54	6,79E+07	194,62	190,00	4,5	-235,24	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
15/55	5,85E+07	205,10	198,00	4,5	-243,15	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
16/56	6,33E+07	199,52	198,00	4,5	-238,96	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
17/57	6,28E+07	200,04	198,00	4,5	-239,35	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
18/58	6,79E+07	194,60	190,00	4,5	-235,22	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
19/59	6,80E+07	194,46	190,00	4,5	-235,11	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente
20/60	7,35E+07	189,17	176,00	4	-231,06	-226,00	7,8,9	15	Def. Permanente

$\epsilon_t$  - deformação de tração;  $\epsilon_v$  - deformação vertical no topo do subleito.

Quadro 31 – Análise empírico-mecanística:  $\epsilon_t$  (FRANCO) e  $\epsilon_v$  (Asphalt Institute) - CBR 16%

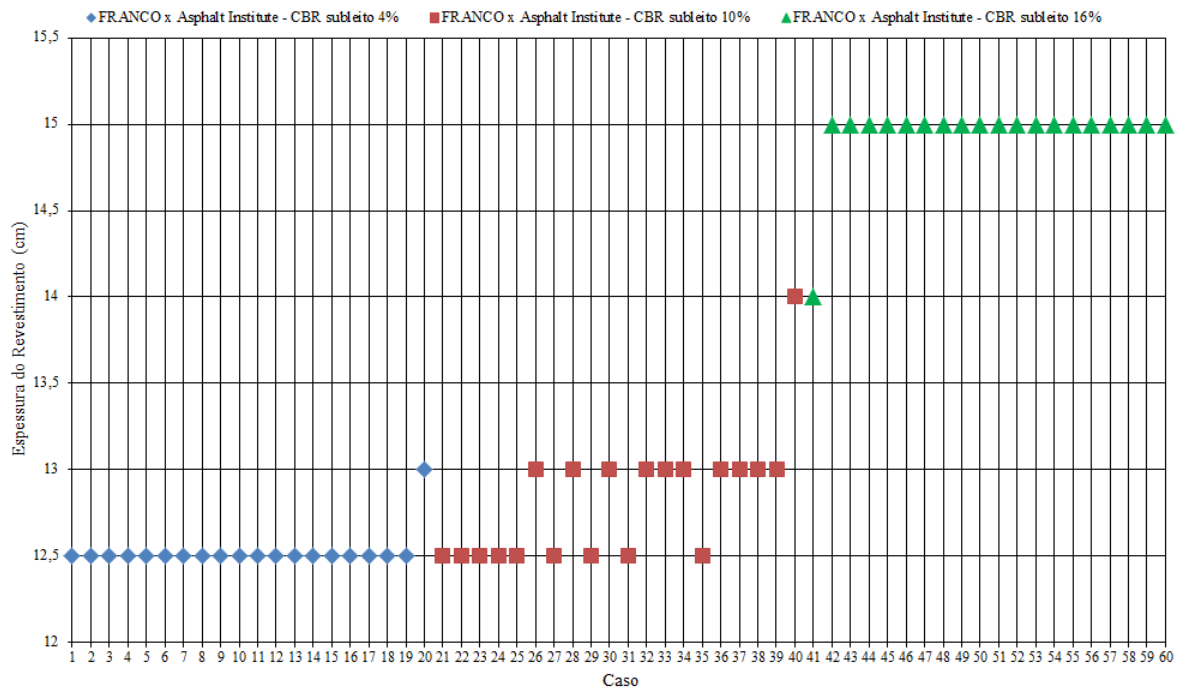


Figura 39 – Análise empírico-mecanística:  $\epsilon_t$  (FRANCO) e  $\epsilon_v$  (Asphalt Institute)

Ao analisar o quadro 29 e a figura 39, em que CBR subleito igual a 4%, percebe-se que ao comparar os métodos de fadiga de Franco (2007) e deformação permanente do Asphalt Institute, a espessura do revestimento em ambos os métodos é atendida pelo dimensionamento do método do DNIT em todos os cenários, exceto no caso 20 (maior carregamento). Ou seja,

em todos os casos, exceto no caso 20, a espessura do revestimento é mesma se dimensionado o pavimento pelos métodos do DNIT, Franco (2007) e Asphalt Institute, sendo a espessura igual a 12,5 cm. Percebe-se que apenas o maior carregamento (maior valor de número N) foi determinado pela fadiga, com espessura de 13 cm para atender este quesito.

O quadro 30 e a figura 39, para CBR subleito igual a 10%, quando comparado os métodos de Franco (fadiga) e Asphalt Institute (deformação permanente) são atendidos pelo dimensionamento do método do DNIT nos cenários de menor carregamento. Ou seja, quanto maior o carregamento (maior número N) as espessuras de revestimento aumentam, sendo que em alguns casos a espessura crítica foi determinada pela deformação permanente e pela fadiga e, em outros casos, apenas a deformação permanente foi determinante. Menores carregamentos foram atendidos por todos os métodos (DNIT, FRANCO e Asphalt Institute), enquanto carregamentos intermediários (casos 33 e 37, por exemplo) o fator determinante para o dimensionamento foi a deformação permanente, sendo necessário 13 cm de espessura de revestimento para atender o quesito. Para os carregamentos maiores (casos 39 e 40, por exemplo) tanto a fadiga como a deformação permanente foram determinantes, com espessura máxima de revestimento de 14 cm.

O quadro 31 e figura 39 mostram que, quando CBR do subleito igual a 16%, comparando os métodos de Franco (deformação por fadiga) e Asphalt Institute (deformação permanente) não são atendidos pelo dimensionamento do método do DNIT nem nos cenários de menor carregamento. Neste caso, apenas o menor carregamento apresentou espessura de 14 cm (caso 41). Os demais casos foram atendidos com 15 cm, ou seja, com o aumento do carregamento do caso 42 para o 60, por exemplo, não houve influência na espessura de revestimento. Percebe-se que em todos os casos a espessura crítica foi determinada pela deformação permanente, o que é credita a menor espessura total do pavimento, que vem a solicitar mais o topo do subleito.

Ao analisar os quadros 29, 30 e 31, quanto ao local que o eixo padrão está solicitando mais o pavimento na fibra inferior do revestimento e no topo do subleito tem-se as seguintes considerações: tanto para o dimensionamento das estruturas com CBR subleito 4% como para CBR subleito 10%, tem-se a fibra inferior do revestimento mais solicitada pelos pneus do eixo padrão (pontos 4 e 5), entre a borda e o centro dos pneus. Já o topo do subleito é mais solicitado pelos pontos entre as rodas do eixo padrão (pontos 7 e 8). Para estrutura de pavimento com CBR subleito 16% a fibra inferior do revestimento é mais solicitada também pelos pneus do eixo padrão (pontos 4 e 5). No entanto, o topo do subleito, neste caso, passa a ser solicitado pelo ponto central entre as rodas do eixo padrão (pontos 7 e 8) e também pelas



bordas do pneus (ponto 9), devido, basicamente, ao fato da estrutura ter espessura total do pavimento menor que as anteriores, solicitando mais o subleito. Para melhor entendimento dos pontos citados, aconselha-se visualizar a figura 15.

Cabe observar que, embora se dimensione o pavimento por diferentes métodos de fadiga e deformação permanente, o local de aplicação da carga não muda quanto a solicitação na fibra inferior do revestimento e no topo do subleito.

Adicionalmente, buscou-se analisar a espessura de revestimento para os mesmos valores de CBR de subleito para os diferentes métodos de dimensionamento adotados: DNIT;  $\epsilon_t$  (FHWA) x  $\epsilon_v$  (Asphalt Institute); e  $\epsilon_t$  (FRANCO) x  $\epsilon_v$  (Asphalt Institute). Para isso, é apresentada a figura 40.

Na figura 40 é visível a diferença de espessura de revestimento de pavimento quando dimensionado pelo método semi-empírico do DNIT e com os modelos empíricos-mecanísticos FHWA, Franco (2007) e Asphalt Institute. O mais importante a destacar neste caso é que o método do DNIT, embora utilizando diferentes estruturas de subleito ele manteve a espessura de revestimento de 12,5 cm, que é o limite superior do método. No entanto, pode se ver que utilizando diferentes metodologias, que levam em conta as propriedades materiais constituintes da estrutura, a espessura de revestimento para que o pavimento não venha a sofrer trincamento por fadiga e deformações permanentes é maior do que a apresentada pelo DNIT. Isto mostra que o método do DNIT pode não ser conveniente para o correto dimensionamento de pavimentos, o que pode ser um relato dos vários problemas estruturais nos pavimentos do país.



Para determinação do custo unitário de referência do transporte, para materiais betuminosos, foi utilizada a metodologia apresentada na instrução de serviço DNIT - IS/DG nº 02 de 18 de janeiro de 2011. A referida instrução de serviço 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. Este custo base foi atualizado pela relação entre o índice de pavimentação da fundação Getúlio Vargas (FGV) na data base do orçamento, e o índice referência (na data base) das equações de transporte. Após a atualização do custo base, adicionou-se o ICMS referente ao estado do Rio Grande do Sul (17%). A tabela 13 explica a obtenção do custo unitário por tonelada para o transporte de materiais betuminosos.

Tabela 13 – Determinação do custo de transporte de 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%	
		Janeiro de 2009	Maio de 2014				
A quente: Cb = 24,715 + 0,247 x D	A frio: Cb = 22,244 + 0,223 x D	224,886	269,137	A quente	A frio	A quente	A frio
98,82	89,14	Fator de correção:	1,1968	118,26	106,68	142,48	128,54

Nota: D representa a distância média de transporte definida

Os custos dos materiais asfálticos foram coletados através das tabelas referentes ao mês de maio de 2014, fornecidas pela Coordenadoria de Defesa da Concorrência (CDC) da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), de acordo com a portaria 349 de 06/03/2010. A tabela 14 apresenta os valores encontrados para os diferentes materiais asfálticos empregados nos processos produtivos das estruturas analisadas.

Tabela 14 – Custos materiais asfálticos – ANP – maio de 2014

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	0,9104	910,3800	1,0968	1096,8434
M103	Asfalto diluído CM-30	1,5079	1507,9000	1,8167	1816,7470
M104	Emulsão asfáltica RR-1C	0,9699	969,9000	1,1686	1168,5542
M105	Emulsão asfáltica RR-2C	0,8140	814,0100	0,9807	980,7349

As tabelas 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21 apresentam respectivamente os preços unitários calculados para o concreto asfáltico, pintura de ligação, imprimação, brita graduada simples,

macadame seco, camada de bloqueio e tratamento superficial duplo. Os preços finais unitários foram encontrados adicionando-se ao custo base, os lucros e despesas indiretas (LDI) de 28,98% para materiais, equipamentos e mão de obra. Sobre o custo de aquisição e transporte dos materiais betuminosos foi acrescido um LDI de 15%. Todos os agregados foram considerados de origem comercial e também os seus respectivos custos de transporte.

Tabela 15 – Preço unitário final para o concreto asfáltico

2 S 02 540 51 - CBUQ - capa de rolamento AC/BC			PE (t/h):	75
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)	
A	Equipamentos	-	463,40	
B	Mão de obra	-	94,35	
C	Execução (A+B / PE)	-	7,44	
D	Atividades auxiliares	1 A 01 390 52	63,63	
E	Transp. mat. produzidos/comerciais	1 A 00 001 05 / 1 A 00 001 91	40,44	
F	Materiais betuminosos:	<i>Aquisição</i>	-	60,33
		<i>Transporte</i>	-	7,84
Custo unitário (C+D+E)			111,51	
Preço unitário (LDI: 29,98%)			144,94	
Custo unitário materiais betuminosos (F)			68,16	
Preço unitário materiais betuminosos (LDI: 15,00%)			78,39	
<b>Preço unitário final/t</b>			<b>223,33</b>	
<b>Preço unitário final/m³ (D = 2,425)</b>			<b>541,56</b>	

Tabela 16 – Preço unitário final para a pintura de ligação

2 S 02 400 00 - Pintura de ligação			PE (m²/h):	1687
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)	
A	Equipamentos	-	181,50	
B	Mão de obra	-	54,34	
C	Execução (A+B / PE)	-	0,14	
E	Materiais betuminosos:	<i>Aquisição</i>	-	0,47
		<i>Transporte</i>	-	0,05
Custo unitário (C)			0,14	
Preço unitário (LDI: 29,98%)			0,18	
Custo unitário materiais betuminosos (E)			0,52	
Preço unitário materiais betuminosos (LDI: 15,00%)			0,60	
<b>Preço unitário final/m²</b>			<b>0,78</b>	

Tabela 17 – Preço unitário final para a imprimação

2 S 02 300 00 - Imprimação			PE (m <sup>2</sup> /h):	1125
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)	
A	Equipamentos	-	172,85	
B	Mão de obra	-	54,34	
C	Execução (A+B / PE)	-	0,20	
E	Materiais betuminosos:	<i>Aquisição</i>	2,18	
		<i>Transporte</i>	0,15	
Custo unitário (C)			0,20	
Preço unitário (LDI: 29,98%)			0,26	
Custo unitário materiais betuminosos (E)			2,33	
Preço unitário materiais betuminosos (LDI: 15,00%)			2,68	
<b>Preço unitário final/m<sup>2</sup></b>			<b>2,95</b>	

Tabela 18 – Preço unitário final para a brita graduada simples

2 S 02 230 50 - Brita graduada BC			PE (m <sup>3</sup> /h):	121
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)	
A	Equipamentos	-	789,66	
B	Mão de obra	-	54,34	
C	Execução (A+B / PE)	-	6,98	
D	Atividades auxiliares	1 A 01 395 51	94,89	
E	Transp. mat. produzidos/comerciais	1 A 00 001 91	78,96	
Custo unitário total/m <sup>3</sup> (C+D+E)			180,83	
<b>Preço unitário final/m<sup>3</sup> (LDI: 29,98%)</b>			<b>235,04</b>	

Tabela 19 – Preço unitário final para o macadame seco

2 S 02 231 50 - Base de macadame BC			PE (m <sup>3</sup> /h):	136
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)	
A	Equipamentos	-	839,70	
B	Mão de obra	-	54,34	
C	Execução (A+B / PE)	-	6,57	
D	Atividades auxiliares	1 A 00 717 00	85,69	
E	Transp. mat. produzidos/comerciais	1 A 00 001 91	74,03	
Custo unitário total/m <sup>3</sup> (C+D+E)			166,29	
<b>Preço unitário final/m<sup>3</sup> (LDI: 29,98%)</b>			<b>216,14</b>	

Tabela 20 – Preço unitário final para a camada de bloqueio

2 S 04 999 07 - Bloqueio			PE (m³/h):	3
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)	
A	Equipamentos	-	12,76	
B	Mão de obra	-	5,56	
C	Execução (A+B / PE)	-	6,15	
D	Atividades auxiliares	1 A 00 717 00	68,56	
E	Transp. mat. produzidos/comerciais	1 A 00 001 91	74,03	
<b>Custo unitário total/m³ (C+D+E)</b>			<b>148,74</b>	
<b>Preço unitário final/m³ (LDI: 29,98%)</b>			<b>193,33</b>	

Tabela 21 – Preço unitário final para o tratamento superficial duplo

2 S 02 501 01 - Trat. sup. duplo c/ emulsão			PE (m²/h):	343
Etapa	Descrição	Composições Auxiliares	Custo (R\$)	
A	Equipamentos	-	400,97	
B	Mão de obra	-	94,35	
C	Execução (A+B / PE)	-	1,44	
D	Atividades auxiliares	1 A 00 717 00	1,41	
E	Transp. mat. produzidos/comerciais	1 A 00 001 91	1,22	
F	Materiais betuminosos:	<i>Aquisição</i>	-	2,94
		<i>Transporte</i>	-	0,39
<b>Custo unitário (C+D+E)</b>			<b>4,07</b>	
<b>Preço unitário (LDI: 29,98%)</b>			<b>5,30</b>	
<b>Custo unitário materiais betuminosos (E)</b>			<b>3,33</b>	
<b>Preço unitário materiais betuminosos (LDI: 15,00%)</b>			<b>3,83</b>	
<b>Preço unitário final/m²</b>			<b>9,12</b>	

A tabela 22 resume o preço unitário final encontrado para os diferentes serviços necessários para a execução das estruturas definidas.

Tabela 22 – Preço unitário final para os diferentes serviços

CA (m³)	PL (m²)	IP (m²)	BGS (m³)	MS (m³)	BL (m³)	TSD (m²)
R\$ 541,56	R\$ 0,78	R\$ 2,95	R\$ 235,04	R\$ 216,14	R\$ 193,33	R\$ 9,12

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

As tabelas 23, 24 e 25 apresentam o custo final por quilômetro, para pavimentos novos dimensionados com CBR subleito igual a 4% e para diferentes métodos de dimensionamento, para os serviços de pavimentação necessários para a construção dos pavimentos em estudo. Por questões construtivas, para determinação do custo final, considerou-se uma largura

adicional de 30 cm para a brita graduada e 60 cm para o macadame seco, no intuito de compensar o material consumido na confecção das saias dos aterros. Adicionalmente, para CBR subleito igual a 4% é apresentada a figura 41 com a finalidade de comparar o custo dos diferentes métodos utilizados para dimensionamento.

Tabela 23 – Custo final por quilômetro (CBR = 4%) – Método: DNIT

Cenário/ Caso	CA			PL	IP	BGS			MS			BL	TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/1	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	40	5120	1.106.648,13	70.757,23	45.616,22	2.321.141,93
2/2	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
3/3	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	40	5120	1.106.648,13	70.757,23	45.616,22	2.321.141,93
4/4	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
5/5	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
6/6	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
7/7	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
8/8	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
9/9	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
10/10	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
11/11	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
12/12	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
13/13	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
14/14	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
15/15	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
16/16	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
17/17	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
18/18	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
19/19	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
20/20	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34

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

Tabela 24 – Custo final por quilômetro (CBR = 4%) – Métodos: FHWA x Asphalt Institute

Cenário/ Caso	CA			PL	IP	BGS			MS			BL	TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/1	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	15	2484,5	583.948,44	40	5120	1.106.648,13	70.757,23	45.616,22	2.398.316,30
2/2	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	15	2484,5	583.948,44	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.453.648,71
3/3	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	40	5120	1.106.648,13	70.757,23	45.616,22	2.449.765,89
4/4	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
5/5	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
6/6	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
7/7	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
8/8	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
9/9	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
10/10	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
11/11	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
12/12	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
13/13	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
14/14	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.556.547,88
15/15	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
16/16	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
17/17	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.505.098,29
18/18	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.556.547,88
19/19	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.556.547,88
20/20	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.556.547,88

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

Tabela 25 – Custo final por quilômetro (CBR = 4%) – Métodos: FRANCO x Asphalt Institute

Cenário/ Caso	CA			PL	IP	BGS			MS			BL	TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/1	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	40	5120	1.106.648,13	70.757,23	45.616,22	2.321.141,93
2/2	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
3/3	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	40	5120	1.106.648,13	70.757,23	45.616,22	2.321.141,93
4/4	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
5/5	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
6/6	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
7/7	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
8/8	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
9/9	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
10/10	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
11/11	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
12/12	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
13/13	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
14/14	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
15/15	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
16/16	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
17/17	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
18/18	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
19/19	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.376.474,34
20/20	13	936	506.904,35	9.496,13	35.953,17	15	2431,5	571.491,50	42	5376	1.161.980,54	70.757,23	45.616,22	2.402.199,13

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

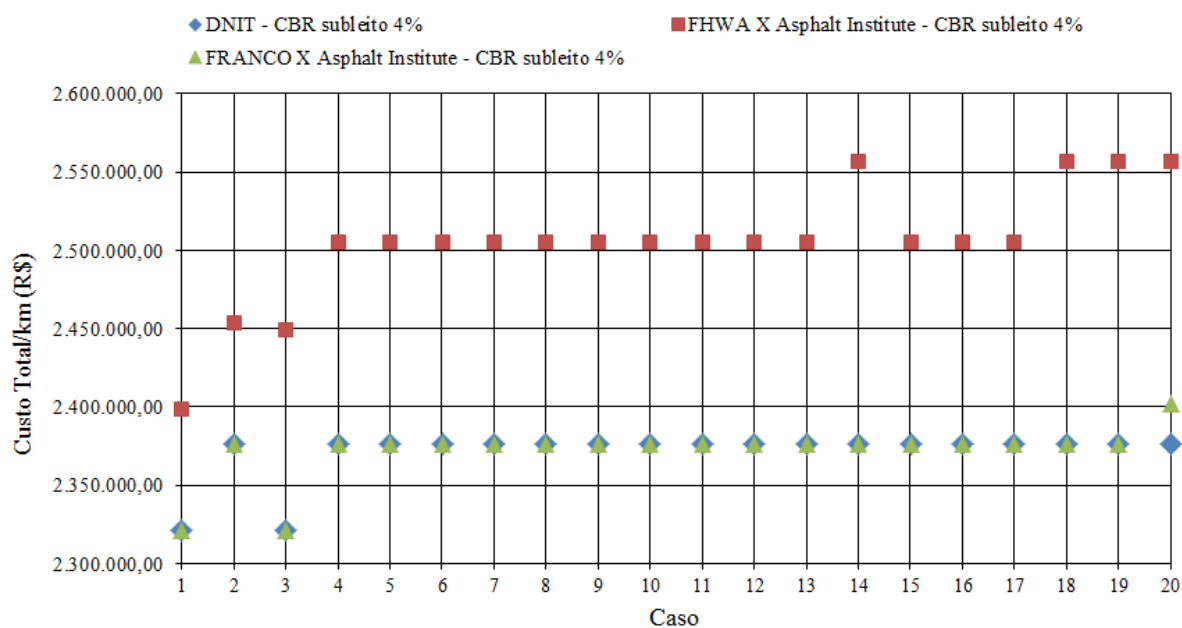


Figura 41 – Custo total/km do pavimento – CBR subleito 4%

Nas tabelas 23, 24 e 25 e na figura 41 são mostrados os custos para diferentes metodologias para dimensionamento do pavimento, considerado CBR subleito 4%. Cabe lembrar, que para as diferentes metodologias apresentadas a mudança na estrutura é apenas da espessura do revestimento, o qual é o objetivo na análise empírico-mecanística proposta. Com isso, podem-se fazer as seguintes considerações:

- quando se tratando do custo do pavimento por quilômetro, quanto ao método do DNIT, percebe-se que não há alteração na espessura do revestimento, pelo fato de ser 12,5 cm



o limite superior do método, porém há uma diferença na sub-base em função do carregamento, o que do caso 1 (menor carregamento) para o cenário 20 (maior carregamento), por exemplo, proporciona o aumento de aproximadamente R\$ 55.300,00 no custo final por quilômetro do pavimento. Se for executar um trecho de 50 quilômetros, por exemplo, a diferença no custo final da obra chegaria a R\$ 2.765.000,00, em função da diferença no carregamento (número N);

- na análise dos métodos FHWA x Asphalt Institute, o menor carregamento (caso 1) apresentou 14,0 cm de espessura de revestimento e o maior carregamento (caso 20) possui 16,0 cm de espessura. A influência no custo final do pavimento fica na ordem de R\$ 158.231,00 por quilômetro de pavimento. Para um trecho de 50 quilômetros, por exemplo, a diferença no custo da obra seria de aproximadamente R\$ 7.911.550,00, em função da diferença de carregamento;

- quando da análise dos métodos FRANCO x Asphalt Institute a diferença de espessura de revestimento do menor carregamento (caso 1) para o maior (caso 20) foi apenas de 0,5 cm. Esta diferença na espessura de revestimento provoca um acréscimo no custo na ordem de R\$ 25.700,00 por quilômetro de pavimento. Em um trecho de 50 quilômetros a diferença no custo da obra estaria na ordem de R\$ 1.285.000,00, em função da diferença de carregamento;

- comparando as 3 diferentes análises percebe-se diferença no custo do pavimento em um mesmo cenário, em função da diferente espessura de revestimento. Como exemplo mais crítico pode-se tomar o caso 20, onde para o DNIT a espessura de revestimento foi de 12,5 cm e para o análise dos métodos FHWA e Asphalt Institute foi de 16 cm, o que diferencia o custo total do pavimento em aproximadamente R\$ 180.100,00 por quilômetro. Em um trecho de 50 quilômetros a influência no custo seria na ordem de R\$ 9.000.000,00, em função da diferente metodologia utilizada para o dimensionamento. Porém, se aplicado esse valor no intuito de aumentar a vida útil do pavimento, utilizando os métodos empírico-mecanísticos, a economia pode ser perceptível posteriormente, onde se reduzem assim gastos com intervenções precoces.

Para melhor visualizar a diferença de custo entre as três diferentes análises propostas (para CBR = 4%) é apresentada a tabela 26, onde se nomeou em: método 1 (DNIT), método 2 (FHWA x Asphalt Institute) e método 3 (FRANCO x Asphalt Institute).

Tabela 26 – Custo final por quilômetro – comparação das três análises (CBR = 4%)

Cenário/ Caso	Método 1	Método 2	Método 3	Diferença (%)	Diferença (%)	Diferença (%)
	Custo total/km (R\$)	Custo total/km (R\$)	Custo total/km (R\$)	Método 1 x Método 2	Método 1 x Método 3	Método 2 x Método 3
1/1	2.321.141,93	2.398.316,30	2.321.141,93	3,22	0,00	3,22
2/2	2.376.474,34	2.453.648,71	2.376.474,34	3,15	0,00	3,15
3/3	2.321.141,93	2.449.765,89	2.321.141,93	5,25	0,00	5,25
4/4	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
5/5	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
6/6	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
7/7	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
8/8	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
9/9	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
10/10	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
11/11	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
12/12	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
13/13	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
14/14	2.376.474,34	2.556.547,88	2.376.474,34	7,04	0,00	7,04
15/15	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
16/16	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
17/17	2.376.474,34	2.505.098,29	2.376.474,34	5,13	0,00	5,13
18/18	2.376.474,34	2.556.547,88	2.376.474,34	7,04	0,00	7,04
19/19	2.376.474,34	2.556.547,88	2.376.474,34	7,04	0,00	7,04
20/20	2.376.474,34	2.556.547,88	2.402.199,13	7,04	1,07	6,04

Método 1 - DNIT; Método 2 - FHWA x Asphalt Institute; Método 3 - FRANCO x Asphalt Institute

A tabela 26 mostra para fins comparativos a diferença em cada um dos métodos adotados para dimensionamento. Percebe-se que comparando os diferentes métodos a influência no custo chega a ser de 7,04%. Em algumas comparações, como na comparação dos métodos 1 e 3 há igualdade no custo do pavimento por quilômetro em todos os casos, exceto no caso 20, o de maior carregamento. Nota-se também que a diferença, na maioria dos casos cresce com o aumento do carregamento.

As tabelas 27, 28 e 29 apresentam o custo final por quilômetro, para pavimentos novos dimensionados com CBR subleito igual a 10% e para diferentes métodos de dimensionamento, para os serviços de pavimentação necessários para a construção dos pavimentos em estudo. Adicionalmente, para CBR subleito igual a 10% é apresentada a figura 42 com a finalidade de comparar o custo dos diferentes métodos utilizados para dimensionamento.

Tabela 27 – Custo final por quilômetro (CBR = 10%) – Método: DNIT

Cenário/ Caso	CA			PL	IP	BGS			MS			BL	TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/21	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
2/22	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
3/23	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
4/24	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
5/25	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
6/26	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
7/27	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
8/28	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
9/29	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
10/30	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
11/31	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
12/32	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
13/33	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
14/34	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
15/35	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
16/36	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
17/37	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
18/38	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
19/39	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
20/40	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05

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

Tabela 28 – Custo final por quilômetro (CBR = 10%) – Métodos: FHWA x Asphalt Institute

Cenário/ Caso	CA			PL	IP	BGS			MS			BL	TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/21	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.785.777,01
2/22	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.785.777,01
3/23	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.785.777,01
4/24	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.785.777,01
5/25	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.785.777,01
6/26	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.785.777,01
7/27	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.785.777,01
8/28	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.837.226,59
9/29	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.785.777,01
10/30	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.785.777,01
11/31	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.785.777,01
12/32	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.837.226,59
13/33	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.837.226,59
14/34	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.837.226,59
15/35	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.785.777,01
16/36	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.837.226,59
17/37	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.837.226,59
18/38	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.837.226,59
19/39	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.837.226,59
20/40	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.837.226,59

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

Tabela 29 – Custo final por quilômetro (CBR = 10%) – Métodos: FRANCO x Asphalt

Institute

Cenário/ Caso	CA			PL	IP	BGS			MS			BL	TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/21	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
2/22	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
3/23	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
4/24	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
5/25	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
6/26	13	936	506.904,35	9.496,13	35.953,17	15	2431,5	571.491,50	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.682.877,84
7/27	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
8/28	13	936	506.904,35	9.496,13	35.953,17	15	2431,5	571.491,50	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.682.877,84
9/29	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
10/30	13	936	506.904,35	9.496,13	35.953,17	15	2431,5	571.491,50	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.682.877,84
11/31	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
12/32	13	936	506.904,35	9.496,13	35.953,17	15	2431,5	571.491,50	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.682.877,84
13/33	13	936	506.904,35	9.496,13	35.953,17	15	2431,5	571.491,50	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.682.877,84
14/34	13	936	506.904,35	9.496,13	35.953,17	15	2431,5	571.491,50	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.682.877,84
15/35	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.657.153,05
16/36	13	936	506.904,35	9.496,13	35.953,17	15	2431,5	571.491,50	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.682.877,84
17/37	13	936	506.904,35	9.496,13	35.953,17	15	2431,5	571.491,50	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.682.877,84
18/38	13	936	506.904,35	9.496,13	35.953,17	15	2431,5	571.491,50	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.682.877,84
19/39	13	936	506.904,35	9.496,13	35.953,17	15	2431,5	571.491,50	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.682.877,84
20/40	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	15	2484,5	583.948,44	16	2048	442.659,25	70.757,23	45.616,22	1.734.327,43

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

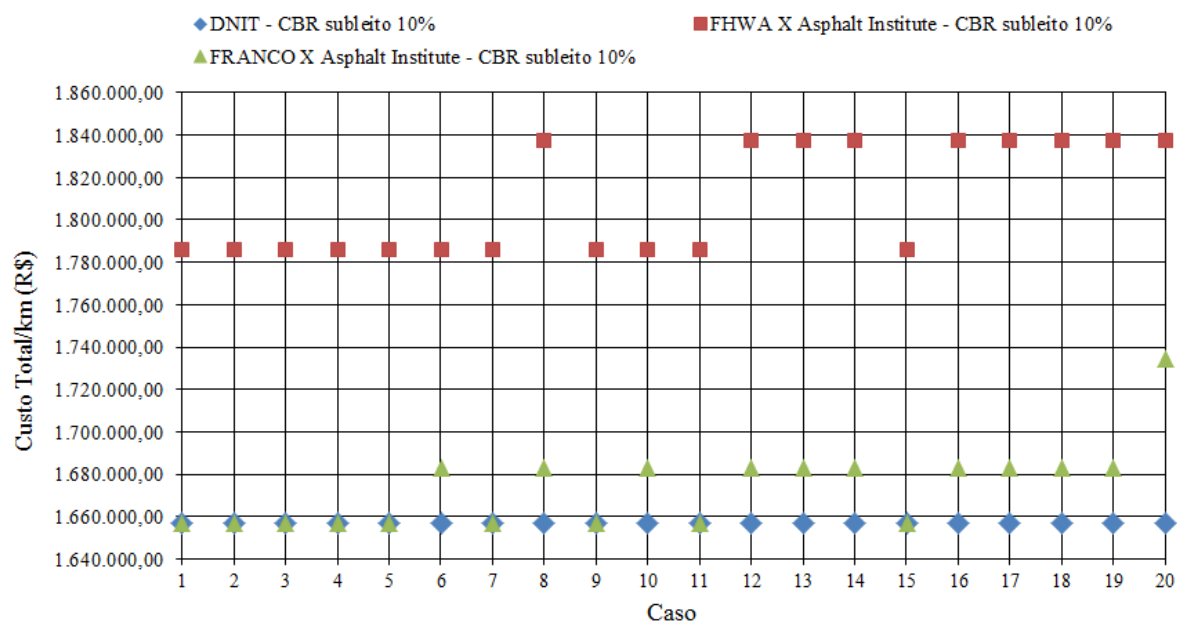


Figura 42 – Custo total/km do pavimento – CBR subleito 10%

Nas tabelas 27, 28 e 29 e na figura 42 são mostrados os custos para diferentes metodologias para dimensionamento do pavimento, considerado CBR subleito 10%, para as quais podem ser feitas as seguintes considerações:

- quando se tratando do custo do pavimento por quilômetro, quanto ao método do DNIT, mostra que neste caso não houve aumento da espessura de revestimento e nem na espessura total do pavimento conforme se aumentou o carregamento. Por este motivo,

também não teve influência no custo dos pavimentos, mantendo-se o preço inalterado para todos os casos, ou seja, para todos os diferentes carregamentos;

- na análise dos métodos FHWA x Asphalt Institute, o menor carregamento (caso 21) apresentou 15,0 cm de espessura de revestimento e o maior carregamento (caso 40) possui 16,0 cm de espessura. A diferença no custo final do pavimento fica na ordem de R\$ 51.450,00 por quilômetro de pavimento. Para um trecho de 50 quilômetros, por exemplo, a influência no custo da obra seria de aproximadamente R\$ 2.572.500,00, em função da diferença de carregamento;

- quando da análise dos métodos FRANCO x Asphalt Institute a diferença de espessura de revestimento do menor carregamento (caso 21) para o maior (caso 40) foi de 1,5 cm, sendo 12,5 cm para o caso 21 e 14 cm para o caso 40. Esta diferença na espessura de revestimento proporciona um acréscimo no custo na ordem de R\$ 77.200,00 por quilômetro de pavimento. Em um trecho de 50 quilômetros a diferença no custo da obra estaria na ordem de R\$ 3.860.000,00, em função da diferença de carregamento;

- comparando as 3 diferentes análises percebe-se diferença no custo do pavimento em um mesmo cenário, em função da diferente espessura de revestimento. Como exemplo mais crítico pode-se tomar o caso 40, onde para o DNIT a espessura de revestimento foi de 12,5 cm e para o análise dos métodos FHWA e Asphalt Institute foi de 16 cm, o que diferencia o custo total do pavimento em aproximadamente R\$ 180.100,00 por quilômetro. Em um trecho de 50 quilômetros a influência no custo seria na ordem de R\$ 9.000.000,00, em função da diferente metodologia utilizada para o dimensionamento. Porém, se aplicado esse valor no intuito de aumentar a vida útil do pavimento, a economia vai ser perceptível posteriormente, onde se reduzem assim gastos com intervenções precoces, além é claro, de estar dimensionamento o pavimento em função das características dos materiais aplicados.

Para melhor visualizar a diferença de custo entre as três diferentes análises propostas (para CBR = 10%) é apresentada a tabela 30, onde se nomeou em: método 1 (DNIT), método 2 (FHWA x Asphalt Institute) e método 3 (FRANCO x Asphalt Institute).

Tabela 30 – Custo final por quilômetro – comparação das três análises (CBR = 10%)

Cenário/ Caso	Método 1	Método 2	Método 3	Diferença (%)		Diferença (%)
	Custo total/km (R\$)	Custo total/km (R\$)	Custo total/km (R\$)	Método 1 x Método 2	Método 1 x Método 3	Método 2 x Método 3
1/21	1.657.153,05	1.785.777,01	1.657.153,05	7,20	0,00	7,20
2/22	1.657.153,05	1.785.777,01	1.657.153,05	7,20	0,00	7,20
3/23	1.657.153,05	1.785.777,01	1.657.153,05	7,20	0,00	7,20
4/24	1.657.153,05	1.785.777,01	1.657.153,05	7,20	0,00	7,20
5/25	1.657.153,05	1.785.777,01	1.657.153,05	7,20	0,00	7,20
6/26	1.657.153,05	1.785.777,01	1.682.877,84	7,20	1,53	5,76
7/27	1.657.153,05	1.785.777,01	1.657.153,05	7,20	0,00	7,20
8/28	1.657.153,05	1.837.226,59	1.682.877,84	9,80	1,53	8,40
9/29	1.657.153,05	1.785.777,01	1.657.153,05	7,20	0,00	7,20
10/30	1.657.153,05	1.785.777,01	1.682.877,84	7,20	1,53	5,76
11/31	1.657.153,05	1.785.777,01	1.657.153,05	7,20	0,00	7,20
12/32	1.657.153,05	1.837.226,59	1.682.877,84	9,80	1,53	8,40
13/33	1.657.153,05	1.837.226,59	1.682.877,84	9,80	1,53	8,40
14/34	1.657.153,05	1.837.226,59	1.682.877,84	9,80	1,53	8,40
15/35	1.657.153,05	1.785.777,01	1.657.153,05	7,20	0,00	7,20
16/36	1.657.153,05	1.837.226,59	1.682.877,84	9,80	1,53	8,40
17/37	1.657.153,05	1.837.226,59	1.682.877,84	9,80	1,53	8,40
18/38	1.657.153,05	1.837.226,59	1.682.877,84	9,80	1,53	8,40
19/39	1.657.153,05	1.837.226,59	1.682.877,84	9,80	1,53	8,40
20/40	1.657.153,05	1.837.226,59	1.734.327,43	9,80	4,45	5,60

Método 1 - DNIT; Método 2 - FHWA x Asphalt Institute; Método 3 - FRANCO x Asphalt Institute

A tabela 30 mostra para fins comparativos a diferença no custo entre os métodos adotados para dimensionamento. Percebe-se que comparando os diferentes métodos a influencia chega a ser de 9,80% de um método para outro. Em algumas comparações, como no caso 21 para a comparação do método 1 com o método 3 há igualdade no custo final do pavimento por quilômetro. Nota-se também um aumento na diferença de custo entre os métodos dos menores para maiores carregamentos.

As tabelas 31, 32 e 33 apresentam o custo final por quilômetro, para pavimentos novos dimensionados com CBR subleito igual a 16% e para diferentes métodos de dimensionamento, para os serviços de pavimentação necessários para a construção dos pavimentos em estudo. Adicionalmente, para CBR subleito igual a 16% é apresentada a figura 43 com a finalidade de comparar o custo dos diferentes métodos utilizados para dimensionamento.

Tabela 31 – Custo final por quilômetro (CBR = 16%) – Método: DNIT

Cenário/ Caso	CA			PL	IP	BGS			BL	TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/41	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
2/42	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
3/43	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
4/44	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
5/45	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
6/46	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
7/47	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
8/48	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
9/49	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
10/50	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
11/51	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
12/52	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
13/53	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
14/54	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
15/55	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
16/56	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
17/57	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
18/58	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
19/59	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80
20/60	12,5	900	487.408,03	9.496,13	35.953,17	15	2405	565.263,03	70.757,23	45.616,22	1.214.493,80

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

Tabela 32 – Custo final por quilômetro (CBR = 16%) – Métodos: FHWA x Asphalt Institute

Cenário/ Caso	CA			PL	IP	BGS			BL	TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/41	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	15	2484,5	583.948,44	70.757,23	45.616,22	1.291.668,17
2/42	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
3/43	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
4/44	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
5/45	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
6/46	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
7/47	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
8/48	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
9/49	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
10/50	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
11/51	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
12/52	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
13/53	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
14/54	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	70.757,23	45.616,22	1.394.567,34
15/55	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
16/56	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
17/57	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
18/58	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	70.757,23	45.616,22	1.394.567,34
19/59	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	70.757,23	45.616,22	1.394.567,34
20/60	16	1152	623.882,28	9.496,13	35.953,17	15	2590,5	608.862,32	70.757,23	45.616,22	1.394.567,34

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

Tabela 33 – Custo final por quilômetro (CBR = 16%) – Métodos: FRANCO x Asphalt

Institute

Cenário/ Caso	CA			PL	IP	BGS			BL	TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/41	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	15	2484,5	583.948,44	70.757,23	45.616,22	1.291.668,17
2/42	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
3/43	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
4/44	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
5/45	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
6/46	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
7/47	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
8/48	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
9/49	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
10/50	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
11/51	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
12/52	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
13/53	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
14/54	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
15/55	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
16/56	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
17/57	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
18/58	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
19/59	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76
20/60	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	15	2537,5	596.405,38	70.757,23	45.616,22	1.343.117,76

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

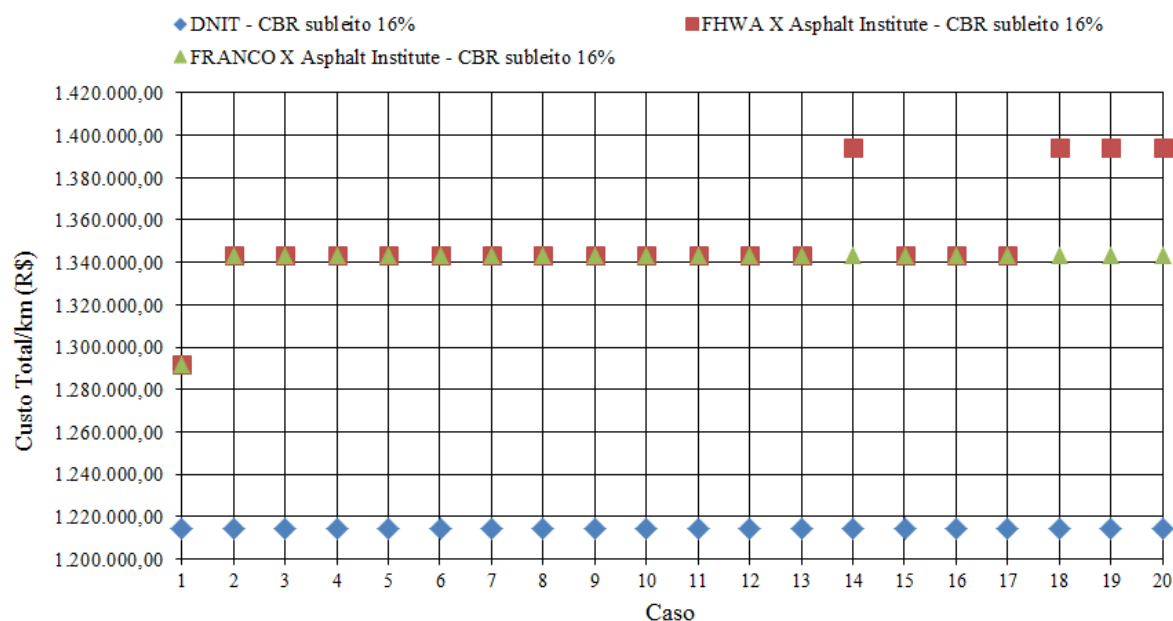


Figura 43 – Custo total/km do pavimento – CBR subleito 16%

Nas tabelas 31, 33 e 33 e na figura 43 são mostrados os custos para diferentes metodologias para dimensionamento do pavimento, considerado CBR subleito 16%, para as quais podem ser feitas as seguintes considerações:

- assim como no caso anterior (CBR 10%), quanto ao método do DNIT, não houve aumento da espessura de revestimento e nem na espessura total do pavimento conforme se



aumentou o carregamento. Logo não teve influência no custo dos pavimentos, mantendo-se o preço inalterado para todos os casos, ou seja, para todos os diferentes carregamentos;

- na análise dos métodos FHWA x Asphalt Institute, o menor carregamento (caso 41) apresentou 14,0 cm de espessura de revestimento e o maior carregamento (caso 60) possui 16,0 cm de espessura. A diferença no custo final do pavimento fica na ordem de R\$ 102.900,00 por quilômetro de pavimento. Para um trecho de 50 quilômetros, por exemplo, a influência no custo da obra seria de aproximadamente R\$ 5.145.000,00, em função da diferença de carregamento;

- quando da análise dos métodos FRANCO x Asphalt Institute a diferença de espessura de revestimento do menor carregamento (caso 41) para o maior (caso 60) foi de 1,0 cm, sendo 14 cm para o caso 41 e 16 cm para o caso 60. Esta diferença na espessura de revestimento proporciona um acréscimo no custo na ordem de R\$ 51.450,00 por quilômetro de pavimento. Em um trecho de 50 quilômetros a diferença no custo da obra estaria na ordem de R\$ 2.572.500,00, em função da diferença de carregamento;

- comparando as 3 diferentes análises percebe-se diferença no custo do pavimento em um mesmo cenário, em função da diferente espessura de revestimento. Como exemplo mais crítico pode-se tomar o caso 60, onde para o DNIT a espessura de revestimento foi de 12,5 cm e para o análise dos métodos FHWA e Asphalt Institute foi de 16 cm, o que diferencia o custo total do pavimento em aproximadamente R\$ 180.100,00 por quilômetro. Em um trecho de 50 quilômetros a influência no custo seria na ordem de R\$ 9.000.000,00, em função da diferente metodologia utilizada para o dimensionamento.

Para melhor visualizar a diferença de custo entre as três diferentes análises propostas (para CBR = 16%) é apresentada a tabela 34, onde se nomeou em: método 1 (DNIT), método 2 (FHWA x Asphalt Institute) e método 3 (FRANCO x Asphalt Institute).

Tabela 34 – Custo final por quilômetro – comparação das três análises (CBR = 16%)

Cenário/ Caso	Método 1	Método 2	Método 3	Diferença (%)		Diferença (%)
	Custo total/km (R\$)	Custo total/km (R\$)	Custo total/km (R\$)	Método 1 x Método 2	Método 1 x Método 3	Método 2 x Método 3
1/41	1.214.493,80	1.291.668,17	1.291.668,17	5,97	5,97	0,00
2/42	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
3/43	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
4/44	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
5/45	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
6/46	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
7/47	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
8/48	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
9/49	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
10/50	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
11/51	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
12/52	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
13/53	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
14/54	1.214.493,80	1.394.567,34	1.343.117,76	12,91	9,58	3,69
15/55	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
16/56	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
17/57	1.214.493,80	1.343.117,76	1.343.117,76	9,58	9,58	0,00
18/58	1.214.493,80	1.394.567,34	1.343.117,76	12,91	9,58	3,69
19/59	1.214.493,80	1.394.567,34	1.343.117,76	12,91	9,58	3,69
20/60	1.214.493,80	1.394.567,34	1.343.117,76	12,91	9,58	3,69

Método 1 - DNIT; Método 2 - FHWA x Asphalt Institute; Método 3 - FRANCO x Asphalt Institute

A tabela 34 mostra para fins comparativos a diferença no custo entre os métodos adotados para dimensionamento. Percebe-se que comparando os diferentes métodos a diferença chega a ser de 12,91% de um método para outro. Nota-se também o aumento da diferença de custo de um método para outro para mesmos cenários de carregamento, tendendo aumentar a diferença com o aumento do carregamento. Há igualdade em valores de custo do pavimento por quilômetro se comparados os métodos 2 e 3, para boa parte dos cenários de carregamento.

Por fim, pela tabela 35, faz-se um comparativo de custo das três diferentes análises de CBR subleito (4%, 10% e 16%). Para isto, obteve-se por considerar a análise mais conservadora (FHWA x Asphalt Institute).

Tabela 35 – Custo final por quilômetro – FHWA x Asphalt Institute (CBR 4%, 10% e 16%)

Cenário	FHWA x Asphalt Institute			Diferença (%)	Diferença (%)	Diferença (%)
	CBR subleito = 4%	CBR subleito = 10%	CBR subleito = 16%	CBR 4% x CBR 10%	CBR 4% x CBR 16%	CBR 10% x CBR 16%
1	2.398.316,30	1.785.777,01	1.291.668,17	25,54	46,14	27,67
2	2.453.648,71	1.785.777,01	1.343.117,76	27,22	45,26	24,79
3	2.449.765,89	1.785.777,01	1.343.117,76	27,10	45,17	24,79
4	2.505.098,29	1.785.777,01	1.343.117,76	28,71	46,38	24,79
5	2.505.098,29	1.785.777,01	1.343.117,76	28,71	46,38	24,79
6	2.505.098,29	1.785.777,01	1.343.117,76	28,71	46,38	24,79
7	2.505.098,29	1.785.777,01	1.343.117,76	28,71	46,38	24,79
8	2.505.098,29	1.837.226,59	1.343.117,76	26,66	46,38	26,89
9	2.505.098,29	1.785.777,01	1.343.117,76	28,71	46,38	24,79
10	2.505.098,29	1.785.777,01	1.343.117,76	28,71	46,38	24,79
11	2.505.098,29	1.785.777,01	1.343.117,76	28,71	46,38	24,79
12	2.505.098,29	1.837.226,59	1.343.117,76	26,66	46,38	26,89
13	2.505.098,29	1.837.226,59	1.343.117,76	26,66	46,38	26,89
14	2.556.547,88	1.837.226,59	1.394.567,34	28,14	45,45	24,09
15	2.505.098,29	1.785.777,01	1.343.117,76	28,71	46,38	24,79
16	2.505.098,29	1.837.226,59	1.343.117,76	26,66	46,38	26,89
17	2.505.098,29	1.837.226,59	1.343.117,76	26,66	46,38	26,89
18	2.556.547,88	1.837.226,59	1.394.567,34	28,14	45,45	24,09
19	2.556.547,88	1.837.226,59	1.394.567,34	28,14	45,45	24,09
20	2.556.547,88	1.837.226,59	1.394.567,34	28,14	45,45	24,09

A tabela 35 mostra para fins comparativos a diferença em cada um dos CBRs adotados para dimensionamento. Percebe-se que comparando os CBRs a diferença chega a ser de 46,38%, se comparada uma estrutura de pavimento executada em um subleito com CBR igual a 4% com uma estrutura executada em um subleito com CBR igual a 16%. Esta diferença acarreta em um aumento do custo por quilômetro na ordem de R\$1.162.000,00, ou seja, para execução de um trecho de 50 quilômetros, o impacto seria na ordem de R\$ 58.100.000,00. Há tendência de aumento na diferença de custo conforme o aumento do carregamento (cenários).

#### 4.4 Dimensionamento de restaurações

##### 4.4.1 Dimensionamento pela PRO 11/79

O dimensionamento das restaurações foi realizado pelo método PRO 11 (DNER, 1979), onde foram consideradas deflexões características ( $D_c$ ) típicas encontradas em pavimentos flexíveis, 50, 75, 100 e  $125 \times 10^{-2} mm$ . Estas foram comparadas com as deflexões admissíveis ( $D_{adm}$ ) calculadas por meio do número NUSACE de cada cenário de carregamento apresentado na metodologia. Cabe lembrar que o raio de curvatura ( $R_c$ ) não teve interferência no dimensionamento, sendo o mesmo considerado maior que o mínimo ( $R_c \geq 100m$ ) em todos os casos. Dessa forma, na tabela 36 são apresentados os valores de deflexão admissível e espessura de reforço (em função do número N) para respectivas deflexões características consideradas. A espessura de reforço é constituída exclusivamente

pela camada de revestimento de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente). A figura 44 apresenta a relação entre os valores de número N com as espessuras de reforço encontradas para as deflexões de 50, 75, 100 e 125 x (10<sup>-2</sup>mm).

Tabela 36 – Deflexões admissíveis e espessuras de reforço

NUSACE (10 anos)	Dadm (0,01mm)	Cenário/ Caso	Dc = 50 (0,01mm)	Cenário/ Caso	Dc = 75 (0,01mm)	Cenário/ Caso	Dc = 100 (0,01)mm	Cenário/ Caso	Dc = 125 (0,01)mm
			Intervenção PRO 11		Intervenção PRO 11		Intervenção PRO 11		
5,23E+07	45	1/1	2 cm de reforço	1/21	9 cm de reforço	1/41	14 cm de reforço	1/61	18 cm de reforço
5,65E+07	44	2/2	2 cm de reforço	2/22	9 cm de reforço	2/42	14 cm de reforço	2/62	18 cm de reforço
5,44E+07	45	3/3	2 cm de reforço	3/23	9 cm de reforço	3/43	14 cm de reforço	3/63	18 cm de reforço
5,88E+07	44	4/4	2 cm de reforço	4/24	9 cm de reforço	4/44	14 cm de reforço	4/64	18 cm de reforço
5,58E+07	44	5/5	2 cm de reforço	5/25	9 cm de reforço	5/45	14 cm de reforço	5/65	18 cm de reforço
6,03E+07	44	6/6	2 cm de reforço	6/26	9 cm de reforço	6/46	14 cm de reforço	6/66	18 cm de reforço
5,75E+07	44	7/7	2 cm de reforço	7/27	9 cm de reforço	7/47	14 cm de reforço	7/67	18 cm de reforço
6,22E+07	43	8/8	2 cm de reforço	8/28	9 cm de reforço	8/48	14 cm de reforço	8/68	18 cm de reforço
5,65E+07	44	9/9	2 cm de reforço	9/29	9 cm de reforço	9/49	14 cm de reforço	9/69	18 cm de reforço
6,10E+07	44	10/10	2 cm de reforço	10/30	9 cm de reforço	10/50	14 cm de reforço	10/70	18 cm de reforço
5,93E+07	44	11/11	2 cm de reforço	11/31	9 cm de reforço	11/51	14 cm de reforço	11/71	18 cm de reforço
6,41E+07	43	12/12	3 cm de reforço	12/32	10 cm de reforço	12/52	15 cm de reforço	12/72	18 cm de reforço
6,28E+07	43	13/13	2 cm de reforço	13/33	9 cm de reforço	13/53	14 cm de reforço	13/73	18 cm de reforço
6,79E+07	43	14/14	3 cm de reforço	14/34	10 cm de reforço	14/54	15 cm de reforço	14/74	19 cm de reforço
5,85E+07	44	15/15	2 cm de reforço	15/35	9 cm de reforço	15/55	14 cm de reforço	15/75	18 cm de reforço
6,33E+07	43	16/16	2 cm de reforço	16/36	10 cm de reforço	16/56	15 cm de reforço	16/76	18 cm de reforço
6,28E+07	43	17/17	2 cm de reforço	17/37	10 cm de reforço	17/57	14 cm de reforço	17/77	18 cm de reforço
6,79E+07	43	18/18	3 cm de reforço	18/38	10 cm de reforço	18/58	15 cm de reforço	18/78	19 cm de reforço
6,80E+07	43	19/19	3 cm de reforço	19/39	10 cm de reforço	19/59	15 cm de reforço	19/79	19 cm de reforço
7,35E+07	42	20/20	3 cm de reforço	20/40	10 cm de reforço	20/60	15 cm de reforço	20/80	19 cm de reforço

Dadm = Deflexão Admissível; Dc = Deflexão Característica

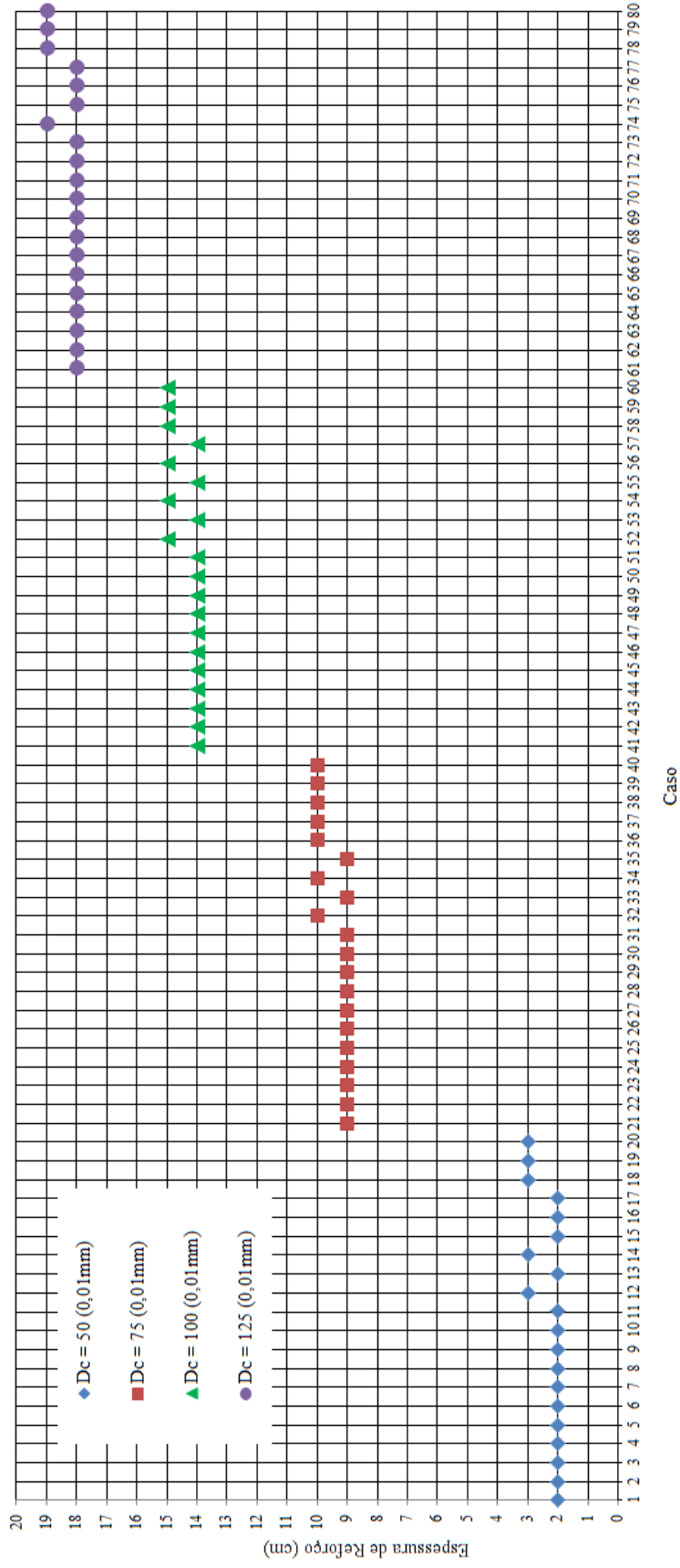


Figura 44 – Espessura de reforço para diferentes cenários

Ao analisar a tabela 36 e a figura 44 pode-se perceber que o aumento da porcentagem de veículos comerciais e sobrecarga nestes veículos, o respectivo aumento no número N, ocasionam uma diminuição da deflexão admissível e, como consequência um aumento na espessura de reforço. Também, com o aumento da deflexão característica há tendência de aumento na espessura de reforço. Espessura essa, necessária para que não surjam trincas na camada de revestimento. Portanto, há necessidade de reforço em todos os cenários de carregamento estudados, pois o pavimento atingiu a fase de fadiga, ou seja, a deflexão de projeto (deflexão característica) está abaixo da deflexão admissível para o tráfego suportado pelo pavimento (número N).

Nota-se também que para as deflexões características estudadas os valores de espessuras tiveram comportamentos semelhantes, sendo que as maiores espessuras em cada situação foram para os maiores valores de número N, ou seja, para os cenários com maiores porcentagens de veículos com sobrecarga e maiores porcentagens de sobrecarga, como por exemplo, o cenário 20 que tem 65% dos veículos com carga máxima legal, 20% dos veículos vazios, 15% dos veículos com sobrecarga (com 20% de sobrecarga nestes veículos) e taxa de crescimento de 4,86%.

Ainda analisando a tabela 36 e a figura 44 é perceptível a diferença de espessura de reforço de revestimento para diferentes deflexões características, onde para o menor valor de  $D_c$  ( $50 \times 10^{-2}$ mm) a espessura ficou entre 2 e 3 cm e, para maior  $D_c$  ( $125 \times 10^{-2}$ mm) a espessura ficou entre 18 e 19 cm. Ou seja, para diferentes deflexões características teve-se um aumento de 16 cm na espessura de reforço.

Percebe-se, analisando cada um dos casos de deflexão característica, em função do número N, onde se tem um carregamento com N até  $6,28E+07$  tem-se o menor valor de espessura para todas as situações. Acima deste valor de número N, nas quatro situações, tem-se um aumento na espessura de reforço em 1 cm. Por exemplo, para  $D_c$  igual a 50 (0,01mm) até o valor de número N de  $6,28E+07$  tem-se 2 cm de espessura de reforço. Acima deste valor de número N tem-se 3 cm de espessura. O que vem a tona a consideração do diferente carregamento em um pavimento, onde, aumentando o carregamento a tendência é ter uma maior espessura de reforço para restaurações de pavimento, em função da fadiga.

Cabe ressaltar que embora o método da PRO 11/79 para restaurações seja considerado um método antiquado e cientificamente criticável, é largamente utilizado em termos de dimensionamento de restaurações no Brasil. Para uma análise mais aprofundada haveria a necessidade de emprego do método empírico-mecânico para avaliar a possibilidade de trincamento do revestimento por fadiga e considerações acerca da reflexão de trincas.

## 4.4.2 Análise de custos

Bucando encontrar os custos unitários de referência para os serviços empregados foi realizado utilizando-se as composições do sistema SICRO II do DNIT. A tabela 37 apresenta as distâncias médias de transporte definidas para os diferentes materiais.

Tabela 37 – Distâncias médias de transporte para o 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	Pavimentado
Areia/brita comercial	Jazida	Pista	70	Pavimentado
Concreto Asfáltico	Usina	Pista	60	Pavimentado
Brita graduada simples	Jazida	Pista	70	Pavimentado

Para o transporte de materiais betuminosos e determinação do custo unitário de referência do transporte de materiais betuminosos foram utilizadas as mesmas premissas já apresentadas para pavimentos novos. A tabela 38 explica a obtenção do custo unitário por tonelada para o transporte de materiais betuminosos.

Tabela 38 – Determinação do custo de transporte de materiais betuminosos

Com base na IS/DG n° 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:	A frio:	Janeiro de 2009	Mai de 2014	A quente	A frio	A quente	A frio
$C_b = 24,715 + 0,247 \times D$	$C_b = 22,244 + 0,223 \times D$	224,886	269,137				
98,82	89,14	Fator de correção:	1,1968	118,26	106,68	142,48	128,54

Nota: D representa a distância média de transporte definida

Os custos dos materiais asfálticos também seguiram os mesmos pressupostos já apresentados para a análise de custos dos pavimentos novos. A tabela 39 apresenta os valores encontrados para os diferentes materiais asfálticos empregados nos processos produtivos das estruturas analisadas.

Tabela 39 – Custos materiais asfálticos – ANP – maio de 2014

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	0,9104	910,3800	1,0968	1096,8434
M103	Asfalto diluído CM-30	1,5079	1507,9000	1,8167	1816,7470
M104	Emulsão asfáltica RR-1C	0,9699	969,9000	1,1686	1168,5542
M105	Emulsão asfáltica RR-2C	0,8140	814,0100	0,9807	980,7349

Os preços unitários calculados para o concreto asfáltico, pintura de ligação, imprimação, brita graduada simples e tratamento superficial duplo foram utilizados os mesmos já apresentados para pavimentos novos, conforme tabelas 15, 16, 17, 18 e 21 respectivamente.

A tabela 40 resume o preço unitário final encontrado para os diferentes serviços necessários para a execução das estruturas de restaurações definidas.

Tabela 40 – Preço unitário final para os diferentes serviços

CA (m³)	PL (m²)	IP (m²)	BGS (m³)	TSD (m²)
R\$ 541,56	R\$ 0,78	R\$ 2,95	R\$ 235,04	R\$ 9,12

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

As tabelas 41, 42, 43 e 44 apresentam o custo final por quilômetro, para os serviços de pavimentação necessários para a execução das restaurações de pavimentos em estudo. Adicionalmente, é mostrada a figura 45 com intuito de melhor visualizar o custo final por quilômetro. Cabe ressaltar que, para restaurações com Dc igual  $50 \times 10^{-2} mm$ , pelo fato de se utilizar geralmente a Faixa C do DNIT com diâmetro máximo do agregado de 19 mm, considerar-se-á, por questões construtivas, a espessura mínima de 4 cm de reforço para o cálculo do custo de restauração.



Tabela 41 – Custo final por quilômetro das restaurações de pavimentos – Dc = 50 (0,01mm)

Cenário/Caso	CA			PL	IP	TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/1	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
2/2	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
3/3	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
4/4	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
5/5	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
6/6	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
7/7	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
8/8	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
9/9	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
10/10	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
11/11	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
12/12	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
13/13	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
14/14	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
15/15	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
16/16	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
17/17	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
18/18	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
19/19	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>
20/20	4	288	155.970,57	9.496,13	35.953,17	45.616,22	<b>247.036,08</b>

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

Tabela 42 – Custo final por quilômetro das restaurações de pavimentos – Dc = 75 (0,01mm)

Cenário/Caso	CA			PL	IP	BGS		TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/21	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
2/22	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
3/23	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
4/24	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
5/25	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
6/26	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
7/27	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
8/28	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
9/29	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
10/30	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
11/31	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
12/32	10	720	389.926,42	9.496,13	35.953,17	397,5	93.427,05	45.616,22	<b>574.418,99</b>
13/33	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
14/34	10	720	389.926,42	9.496,13	35.953,17	397,5	93.427,05	45.616,22	<b>574.418,99</b>
15/35	9	648	350.933,78	9.496,13	35.953,17	344,5	80.970,11	45.616,22	<b>522.969,41</b>
16/36	10	720	389.926,42	9.496,13	35.953,17	397,5	93.427,05	45.616,22	<b>574.418,99</b>
17/37	10	720	389.926,42	9.496,13	35.953,17	397,5	93.427,05	45.616,22	<b>574.418,99</b>
18/38	10	720	389.926,42	9.496,13	35.953,17	397,5	93.427,05	45.616,22	<b>574.418,99</b>
19/39	10	720	389.926,42	9.496,13	35.953,17	397,5	93.427,05	45.616,22	<b>574.418,99</b>
20/40	10	720	389.926,42	9.496,13	35.953,17	397,5	93.427,05	45.616,22	<b>574.418,99</b>

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

Tabela 43 – Custo final por quilômetro das restaurações de pavimentos – Dc = 100 (0,01mm)

Cenário/Caso	CA			PL	IP	BGS		TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/41	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
2/42	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
3/43	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
4/44	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
5/45	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
6/46	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
7/47	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
8/48	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
9/49	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
10/50	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
11/51	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
12/52	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	662,5	155.711,75	45.616,22	<b>831.666,90</b>
13/53	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
14/54	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	662,5	155.711,75	45.616,22	<b>831.666,90</b>
15/55	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
16/56	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	662,5	155.711,75	45.616,22	<b>831.666,90</b>
17/57	14	1008	545.896,99	9.496,13	35.953,17	609,5	143.254,81	45.616,22	<b>780.217,32</b>
18/58	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	662,5	155.711,75	45.616,22	<b>831.666,90</b>
19/59	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	662,5	155.711,75	45.616,22	<b>831.666,90</b>
20/60	15	1080	584.889,63	9.496,13	35.953,17	662,5	155.711,75	45.616,22	<b>831.666,90</b>

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

Tabela 44 – Custo final por quilômetro das restaurações de pavimentos – Dc = 125 (0,01mm)

Cenário/Caso	CA			PL	IP	BGS		TSD	Custo total/km (R\$)
	Esp. (cm)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	Vol (m³)	Custo (R\$)	Custo (R\$)	
1/61	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
2/62	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
3/63	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
4/64	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
5/65	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
6/66	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
7/67	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
8/68	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
9/69	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
10/70	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
11/71	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
12/72	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
13/73	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
14/74	19	1368	740.860,20	9.496,13	35.953,17	874,5	205.539,51	45.616,22	<b>1.037.465,23</b>
15/75	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
16/76	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
17/77	18	1296	701.867,56	9.496,13	35.953,17	821,5	193.082,57	45.616,22	<b>986.015,65</b>
18/78	19	1368	740.860,20	9.496,13	35.953,17	874,5	205.539,51	45.616,22	<b>1.037.465,23</b>
19/79	19	1368	740.860,20	9.496,13	35.953,17	874,5	205.539,51	45.616,22	<b>1.037.465,23</b>
20/80	19	1368	740.860,20	9.496,13	35.953,17	874,5	205.539,51	45.616,22	<b>1.037.465,23</b>

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

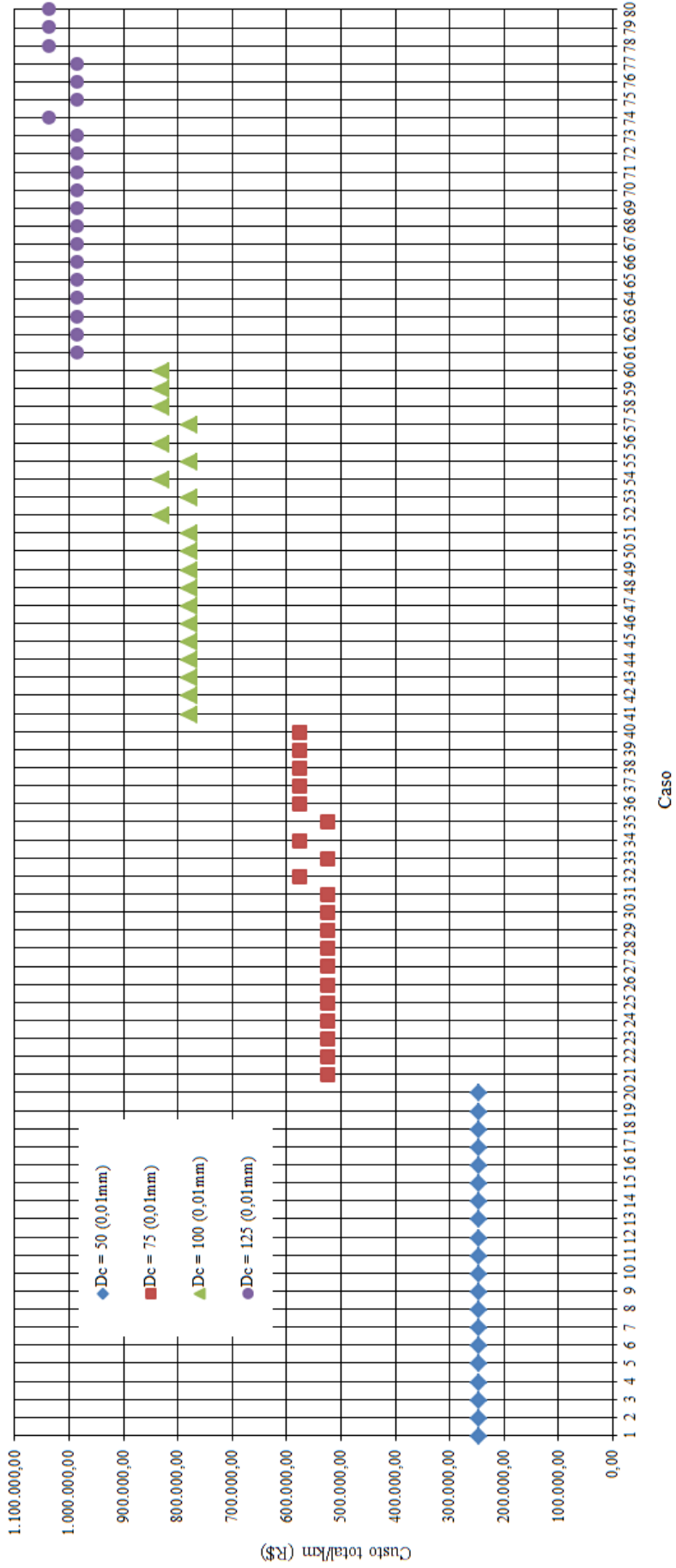


Figura 45 – Custo final por quilômetro das restaurações de pavimentos

Pelas tabelas 41, 42, 43 e 44 e pela figura 45 podem ser feitas as seguintes considerações:

- para  $D_c$  igual a 50 (0,01mm) não houve alteração de preço de um caso de menor para um de maior carregamento, devido a se ter considerado, por questões construtivas, a espessura de reforço de 4 cm para todos os casos;

- quanto ao custo, a diferença para os casos de menor carregamento (de menor espessura de reforço) para os de maior carregamento (maior espessura de reforço), para todas as situações de deflexão característica estudadas, é da ordem de R\$ 51.450,00 por quilômetro de pavimento. Em um trecho de 50 quilômetros, por exemplo, a diferença no custo final é de aproximadamente R\$ 2.700.000,00, em função da diferença de carregamento;

- percebe-se que os cenários mais solicitados (com maior espessura de reforço de revestimento) apresentam diferença nos custos se comparados com os menos solicitados (com menor espessura de revestimento), quando  $D_c$  igual  $75 \times 10^{-2} mm$  é 8,95%, para  $D_c$  igual  $100 \times 10^{-2} mm$  é 6,18% e para  $D_c$  igual  $125 \times 10^{-2} mm$  é de 4,95%;

- é notável a diferença de custos para restaurações quando se tem no pavimento diferentes deflexões, chegando a quase 800 mil reais por quilômetro se comparar as estruturas com deflexão característica de  $50 \times 10^{-2} mm$  com as estruturas com  $D_c$  igual  $125 \times 10^{-2} mm$ .



## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões

#### 5.1.1 Quanto a taxa de crescimento

- a) Quanto a taxa de crescimento de tráfego percebe-se uma evolução positiva com o passar dos anos das séries históricas em estudo. Para praticamente todas as praças de pedágio a tendência é de crescimento do tráfego, atingindo taxas de crescimento médias de tráfego superiores à taxa de crescimento de tráfego proposta pelo DNIT (3,00%) em todas as praças. No caso mais crítico a taxa de crescimento média foi 16,93%, na praça P7, na BR 392;
- b) Nas três regiões estudadas a taxa de crescimento média de tráfego manteve-se acima do valor proposto pelo DNIT, com 5,35% para região metropolitana do RS, 7,29% para rodovias do RJ e MG e 8,84% para região Sul do Estado do RS;
- c) Pela comparação do número N calculado com a taxa de crescimento de tráfego do DNIT, de 3,00%, e com a taxa de crescimento média encontrada neste estudo, de 7,16%, foi possível observar uma diferença média de 19,42% no número N. O caso mais crítico, também para praça P7, a diferença no número N chegou a 60,58%;
- d) Ao tentar correlacionar a variação do tráfego ao longo dos anos com a variação do PIB e com a variação da venda de caminhões no país não se obtiveram bons resultados. Em ambos os casos percebeu-se que não há correlação entre os fatores.
- e) Foi possível concluir, também, que embora a taxa de crescimento de tráfego tenha variado positiva e negativamente com o passar dos anos, o VDM, o número N e o Fator de veículos apresentam uma tendência de crescimento para os próximos anos. O contrário acontece com o Fator de frota, ou seja, a tendência do mesmo é diminuir nos próximos anos para praticamente todas as praças de pedágio, em função a alta venda de veículos de passeio;
- f) Quanto a relação  $N_{USACE}/N_{AASHTO}$  verifica-se que este valor varia de 1,96 até 4,16 nas praças em estudo, no entanto, ficando com a média da série histórica de cada

uma das rodovias em 2,92, próximas a 3,00, valor utilizado quando não se conhece a relação. Com isto, observa-se também o quão influentes são as diferentes considerações para cálculo do FEC, interferindo diretamente no dimensionamento de pavimentos.

### 5.1.2 Quanto ao dimensionamento de pavimentos novos

- a) Para o dimensionamento de pavimentos novos, primeiramente fez-se necessário o cálculo do número N para um período de projeto de 10 anos e com diferentes taxas de crescimento e sobrecargas em veículos comerciais. Já nesta etapa foi notável a influência da sobrecarga no cálculo do número N de pavimentos flexíveis. Se comparar o cenário de menor carregamento com o cenário maior carregamento, com a mesma taxa de crescimento, a diferença no número N é na ordem de 23,11%. Já a influência da taxa de crescimento, no caso em estudo, ao comparar um cenário com mesma sobrecarga, porém com alteração apenas da taxa de crescimento, a diferença é de aproximadamente 7,48% do primeiro para o segundo;
- b) Quanto ao dimensionamento pelo método do DNIT para as diferentes considerações de CBR de subleito, pode-se constatar algumas características e limitações do método: a espessura do revestimento é apenas função do número N, assim como, em parte também acabam sendo, as espessuras da base e sub-base, ou seja, não leva em conta no dimensionamento as propriedades dos materiais; o revestimento de 12,5 cm para todos os casos estudados mostra que atingiu-se o limite superior de método; e o dimensionamento se dá apenas em função da qualidade do material de subleito, determinada pelo ensaio de CBR, não levando em conta a qualidade, propriedades e capacidade dos materiais de sub-base, base e revestimento;
- c) Quanto ao custo, para o método do DNIT, se tratando do custo do pavimento por quilômetro, para CBR subleito 4% foi o único caso que teve mudança da espessura da camada de sub-base da estrutura em função do carregamento (número N), proporcionando uma diferença no custo de aproximadamente R\$ 55.300,00 (2,32%) no custo final por quilômetro do pavimento dos menores para os maiores carregamentos. Para CBR subleito 10% e CBR subleito 16% a sobrecarga em

veículos comerciais não alterou a estrutura do pavimento, mantendo-se o custo inalterado para todos os cenários;

- d) Ao analisar os métodos da FHWA e Asphalt Institute, tanto para CBR subleito 4% como para 10%, em todos os cenários de carregamentos o fator determinante para o dimensionamento foi a deformação de tração na fibra inferior do revestimento que conduz ao trincamento por fadiga. Para os pavimentos com CBR subleito 16% o fator determinante em alguns cenários foi à deformação por fadiga (no revestimento), já em outros cenários são determinantes a fadiga em conjunto com a deformação permanente (no topo do subleito), isto devido a menor espessura total do pavimento que acaba por solicitar mais o subleito. Além disso, para os três casos foi notável que quanto maior for o carregamento (maior número N), maior é a espessura de revestimento;
- e) A maior influência no custo, para os métodos FHWA e Asphalt Institute, foi percebida para as estruturas com CBR subleito igual a 4%, onde a diferença de espessura chegou a 2 cm dos cenários de menor carregamento para os de maior carregamento, influenciando assim em aproximadamente R\$ 158.231,00 (6,18%) o custo do quilômetro de pavimento;
- f) Para CBR subleito igual a 4%, percebe-se que ao comparar os métodos de FRANCO e Asphalt Institute, a espessura do revestimento em ambos os métodos é atendida pelo dimensionamento do método do DNIT em todos os cenários, exceto no cenário de maior carregamento, ou com maior sobrecarga. Já para CBR subleito igual a 10% a espessura de revestimento é atendida pelo dimensionamento do método do DNIT nos cenários de menor carregamento, e conforme aumenta a sobrecarga nos veículos comerciais, as espessuras de revestimento aumentam, sendo que em alguns casos a espessura crítica foi determinada pela deformação permanente e pela fadiga e, em outros casos, apenas a deformação permanente foi determinante. Para CBR do subleito igual a 16%, com o aumento do carregamento há alteração na espessura de revestimento, sendo em todos os cenários a espessura crítica foi determinada pela deformação permanente, o que é creditado a menor espessura total do pavimento, solicitando com maior intensidade do topo do subleito;



- g) Para este caso, métodos FRANCO e Asphalt Institute, a maior influência no custo foi percebida quando da utilização de estruturas com CBR subleito 10%, onde a diferença de espessura de revestimento do menor para o maior carregamento foi de 1,5 cm, o que propicia um acréscimo no custo na ordem de R\$ 77.200,00 (4,44%) por quilômetro de pavimento;
- h) Quanto ao local que o eixo padrão está solicitando mais o pavimento na fibra inferior do revestimento e no topo do subleito têm-se as seguintes considerações: para o dimensionamento empírico-mecanístico para os dois casos adotados (FHWA x Asphalt Institute e FRANCO x Asphalt Institute) das estruturas com CBR subleito 4% como para CBR subleito 10%, tem-se a fibra inferior do revestimento mais solicitada pelos pneus do eixo padrão, entre a borda e o centro dos pneus. Já o topo do subleito é mais solicitado pelos pontos entre as rodas do eixo padrão. Para estrutura de pavimento com CBR subleito 16% a fibra inferior do revestimento é mais solicitada também pelos pneus do eixo padrão. No entanto, o topo do subleito, neste caso, passa a ser solicitado pelo ponto central entre as rodas do eixo padrão e também pelas bordas dos pneus, devido ao fato da estrutura ter espessura total do pavimento menor que as anteriores, solicitando mais o subleito.
- i) Pelas considerações apresentadas pode-se concluir que ao considerar as propriedades dos materiais utilizando os métodos empíricos-mecanísticos há influência no dimensionamento de pavimentos, em função da deformação por fadiga na fibra inferior do revestimento e da deformação permanente no topo do subleito. O dimensionamento empírico ao influenciar no dimensionamento, tem influência direta também no custo e principalmente na vida útil do pavimento. Se dimensionado pelo DNIT, sem levar as propriedades dos materiais, o pavimento tende a ter a vida útil reduzida, especialmente quando se tem sobrecarga no pavimento, caso em que o dimensionamento empírico-mecanístico se mostrou mais eficaz.

### 5.1.3 Quanto ao dimensionamento de restaurações

- a) Foi possível perceber que o aumento da porcentagem de veículos comerciais e sobrecarga nestes veículos, e o respectivo aumento no número N, ocasionam uma diminuição da deflexão admissível e, como consequência, um aumento na espessura

de reforço. Também, com o aumento da deflexão característica há tendência de aumento na espessura de reforço, necessária para que não surjam trincas na camada de revestimento;

- b) Verificou-se a necessidade de reforço em todos os cenários de carregamento para todas as deflexões características estudadas, pois o pavimento atingiu a fase de fadiga, ou seja, a deflexão de projeto (deflexão característica) ficou abaixo da deflexão admissível para o tráfego suportado pelo pavimento (número N);
- c) Concluiu-se que para as deflexões características estudadas os valores de espessuras tiveram comportamentos semelhantes, sendo que as maiores espessuras em cada situação foram para os maiores valores de número N, ou seja, para os cenários com maiores porcentagens de veículos com sobrecarga e maiores porcentagens de sobrecarga. O que vem a tona a consideração do diferente carregamento em um pavimento, onde, aumentando o carregamento a tendência é ter uma maior espessura de reforço para restaurações de pavimento, em função da deformação por fadiga;
- d) Para  $D_c$  igual a 50 (0,01mm) percebe-se baixos valores de espessura de reforço, 2 cm e 3 cm, fazendo com que, por questões construtivas na consideração do cálculo do custo optou-se por uniformizar em 4 cm a espessura de reforço. Os maiores valores de espessura de reforço foram para  $D_c$  igual a 125 (0,01mm) com 19 cm;
- e) Quanto ao custo, a diferença para os casos de menor carregamento (de menor espessura de reforço) para os de maior carregamento (maior espessura de reforço), para todas as situações de deflexão característica estudadas, é da ordem de R\$ 51.450,00 (4,95%) por quilômetro de pavimento, em função da diferença de carregamento.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento dessa pesquisa surgiram novos caminhos e necessidades que poderiam contribuir para melhorar o desenvolvimento do dimensionamento de pavimentos asfálticos. Como não houve possibilidade de inserir nesse trabalho são propostas sugestões para temas futuros de pesquisas.

- a) Utilização de diferentes modelos de deformação permanente e fadiga para dimensionamento de pavimentos flexíveis;
- b) Utilização de diferentes porcentagens de veículos comerciais com sobrecarga e também de sobrecarga nestes veículos comerciais;
- c) Realização de outros estudos de caso, com maiores valores de taxa de crescimento média de tráfego, para melhor analisar a influência da taxa de crescimento no dimensionamento de pavimentos;
- d) Utilização de outros softwares de dimensionamento empírico-mecânico de pavimentos, para fins de comparação dos resultados com os apresentados nesta pesquisa;
- e) Ampliar o banco de dados de contagem de volume de tráfego, com diferentes características de tráfego;
- f) Fazer uma análise de sensibilidade com relação a estrutura do pavimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **Mechanistic-empirical pavement design guide**. Washington, D. C., 2002.

\_\_\_\_\_. **Guide for design of pavement structures 1993**. Washington D. C. American Association of State Highway Officials, 1993.

ALBANO, J. F. **Efeitos da variação da carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento**. Dissertação de Mestrado em Transportes. Porto Alegre: Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEP da UFRGS, 1998. 138p.

\_\_\_\_\_. **Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.

\_\_\_\_\_. **Excessos de carga e pesagem de veículos rodoviários de carga**. Anais da III Semana de Engenharia de Produção e Transportes. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

ALBANO, J. F.; LINDAU, L. A. **Pesagem de veículos de carga: a opinião dos transportadores**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33. 2001, Florianópolis, SC. Anais. Florianópolis: ABPv, 2001.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Pavement for Highways and Streets**, Manual Series No. 1, Lexington, 1991.

Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias – ABCR. Disponível em: <<http://www.abcr.org.br/Conteudo/Concessionaria>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

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

\_\_\_\_\_. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

\_\_\_\_\_. **Pavimentos asfálticos: patologias e manutenção.** São Paulo: Plêiade, 1997. 103p.

BENEVIDES, S. A. S. **Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos: empírico do DNER,** 2000. 176p. Dissertação (Mestrado Engenharia de Transportes) – Programa Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Apud BERNUCCI, L. B.; et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BRASIL. **Anexo e exposição de motivos do Ministério da Justiça n° 45 de 29 de janeiro de 1993.** Poder Executivo, Brasília, DF. 1993.

\_\_\_\_\_. **Decreto n° 62.127 de 16/01/1968.** Aprovou o Regulamento do Código Nacional de Trânsito e estabeleceu as condicionantes para o transporte de cargas rodoviárias no Brasil. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 22/01/1968.

\_\_\_\_\_. **Decreto n° 98.933 de 07/02/1990.** Alterou o limite de Peso Bruto Total Transmitido por Eixo Simples de Roda Simples (ESRS) e regulamentou o eixo tandem constituído por dois eixos com seis rodas. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 08/02/1990.

\_\_\_\_\_. **Lei n° 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, p. 1-64, 24 set. 1997.

\_\_\_\_\_. **Lei n° 7.408 de 25/11/1985.** Estabeleceu uma tolerância máxima de 5% sobre o Peso Bruto Total (PBT) e Peso Bruto Total Transmitido por Eixo (PBTE). Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 26/11/1985.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação.** Brasília, DF, 2006. Disponível em <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual\\_de\\_pavimetacao\\_Versao\\_Final.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_pavimetacao_Versao_Final.pdf)>. Acesso em: setembro/2013.

CHOU, C. J. **Effect of overloaded heavy vehicles on pavement and bridge design.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Washington, D. C., n. 1539, p. 58-65. 1996.

CONCEPA. **Falta de balanças nas rodovias gaúchas.** Zero Hora, Porto Alegre. 12 de dezembro de 2000.

Confederação Nacional de Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias**. Disponível em <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/edicoes.aspx?origem=1>>. Acesso em: 23 out. 2014a.

\_\_\_\_\_. **Pesquisa CNT de rodovias 2014**. Disponível em <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/index.aspx>>. Acesso em: 23 out. 2014b.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO - CONTRAN. **Resolução n° 184/04 de 21/10/2005**. Alteração das Resoluções 12 e 68/98 do CONTRAN e revoga a Resolução 76/98 do CONTRAN. Brasília, 2005. 3p.

\_\_\_\_\_. **Resolução N.º 102**, de 21 de agosto de 1999. Estabelece a tolerância máxima de 7,5% sobre o peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias públicas. Brasília, 1999a. 1p.

\_\_\_\_\_. **Resolução N.º 104**, de 21 de dezembro de 1999. Dispõe sobre a tolerância máxima de peso bruto de veículos e estabelece critérios para aplicação de multas. Brasília, 1999b. 2p.

\_\_\_\_\_. **Resolução N.º 108**, de 21 de dezembro de 1999. Dispõe sobre a responsabilidade pelo pagamento de multas. Brasília, 1999c. 1p.

\_\_\_\_\_. **Resolução N.º 114**, de 5 de maio de 2000. Complementa a resolução 104/99 e autoriza uma tolerância de 5,0% sobre o peso bruto declarado na nota fiscal. Brasília, 2000. 1p.

\_\_\_\_\_. **Resolução N.º 12**, de 6 de fevereiro de 1998. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres. Brasília, 1998a. 4p.

\_\_\_\_\_. **Resolução N.º 164**, de 10 de setembro de 2004. Acresce parágrafo único ao art. 1º da Resolução n° 68/98. Ficam dispensados da AET, os veículos com Peso Bruto Total – PBT Superior a 45t e até 57 t. Brasília, 2004. 2p.

\_\_\_\_\_. **Resolução N.º 258**, de 30 de novembro de 2007. Regulamenta os artigos 231, X e 323 do Código Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Brasília, 2007. 5p.

\_\_\_\_\_. **Resolução N.º 489**, de 05 de junho de 2014. Altera os artigos 5º e 9º da Resolução n° 258, de 30 de novembro de 2007, do Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN, que regulamenta os artigos 231 e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa

metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Brasília, 2014. 2p.

\_\_\_\_\_. **Resolução N.º 62**, de 21 de maio de 1998. Estabelece o uso de pneus extralargos e define seus limites de peso de acordo com o parágrafo único do art. 100 da CTB. Brasília, 1998b. 4p.

\_\_\_\_\_. **Resolução N.º 68**, de 23 de setembro de 1998. Estabelece os requisitos de segurança necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC's. Brasília, 1998c. 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. PRO 11**. Rio de Janeiro: 1979. 16p.

\_\_\_\_\_. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro: DNER – Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica, 1998. 243p.

\_\_\_\_\_. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: DNER – Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1981. 34p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **Manual de projeção de interseções**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **Manual de Estudos de Tráfego**. Rio de Janeiro: IPT, 2006.

\_\_\_\_\_. **Quadro de Fabricantes de Veículos**. Brasília, 2007. 109p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA; LABORATÓRIO DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA – LATRANS; NÚCLEO DE ESTUDOS DE PESAGEM – NEP. **Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento: Fase 1 – Avaliação das Metodologias de Pesagem em Movimento Existentes**. Convênio 102/2007. Novembro de 2007. Disponível em <<https://gestao.dnit.gov.br>>. Acesso em: Outubro/2013.

Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). **Pesquisa Frota de Veículos no Brasil**. Disponível em <<http://www.denatran.gov.br/frota2013.htm>>. Acesso em: 5 abr. 2014.

ELLIOT, SELVAN, MUN (1991). Apud FERNANDES JR., J. L. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. São Carlos, 1994. 313p.

Tese de Doutorado em Transportes – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES – GEIPOT. **Relatório Intermediário: Resultados e análises preliminares – Pesquisa ICR**. Brasília, DF. 1997.

FEKPE, E. S. K.; CLAYTON, A. M.; HAAS, R. C. G. **Evaluating pavement impacts of truck weight limits and enforcement levels**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Washington, D. C., n. 1508, p. 39-44, 1995

FERNANDES JR., J. L. **Investigação dos Efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. 1994. Tese (Doutorado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

FERNANDES JR., J. L.; SÓRIA, M. H. A. S. **Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos**. Anais da 30ª Reunião Anual de Pavimentação. Salvador: ABPv, 1996.

FERNANDES JR., J. L.; SÓRIA, M. H. A.; WIDMER, J. A. **Efeitos das solicitações do tráfego sobre os custos de construção, manutenção e utilização de rodovias**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 29, 1995, Cuiabá. Anais. Cuiabá: ABPv, 1995. p266-284.

FERNANDES JR., J. L.; PAES, J. C.; PEREIRA, P. A. A. **Avaliação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos flexíveis portugueses e brasileiros**. Revista Pavimentação, Ano II, n. 5, pp. 28-38. Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, Rio de Janeiro, 2007.

FHWA. Freight Management and Operations – **Commercial Vehicle Size and Weight Program**. Disponível em: <<http://www.ops.fhwa.dot.gov/index.asp>>. Acesso em: outubro/2013.

FONTENELE, H. B. **Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho de pavimentos**. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2007.



GÖKTAIN, A.; MITSCHKE, M. **Road damage caused by heavy duty vehicles**. Journal of Vehicle Design. V. 16, n.1 p.54 – 70, 1995. Apud ALBANO, J. F. **Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.

HALLENBECH, M. E. **WSDOT Traffic Forecasting Guide** – Volumes 1 and 2, Research Report WA-RD 219.1, Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington, 1991.

HALLENBECK, M.; WEINBLATT, H. **Equipment for Collecting Traffic Load Data**. NCHRP REPORT 509. Washington, D. C., 2004.

HARRISON, R.; SANCHEZ-RUIZ, L. A.; LEE, C. E. **Truck traffic crossing Texas-México border**. Transportation Research Record – Pavement design, management and performance: Pavement Management and Monitoring of Traffic and Pavements. Washington, n° 1643. National Academy Press. 1998.

HOFSTRA, A.; KLOMP, A. J. G. **Permanent deformation of flexible pavements under simulated road traffic conditions**. In: Proceedings of the 3° International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement. Londres, U.K. 1972.

HONG, F.; PEREIRA, F. M.; PROZZI, J. A. **Comparison of equivalent single axle loads from empirical and mechanistic-empirical approaches**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. TRB 2006 Annual Meeting. Washington, D. C., 2006.

HRB – HIGHWAY RESEARCH BOARD. **The AASHO Road Test: Report 5 Pavement Research**. HRB Special Report 61E. Washington, D. C., 1962.

HUSSAIN, S.; PARKER, N. A. **Pavement damage and road pricing**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. TRB 2006. Annual Meeting. Washington D. C., 2006.

Index Mundi (INDEX). **Brasil – Produto Interno Bruto**. Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/g/g.aspx?v=66&c=br&l=pt>>. Acesso em: 04 abr. 2014.

JIANG, Y; LI, S.; NANTUNG, T.; MANGOLD, K. MacARTHUR, S. A. **Creation of truck axle load spectra using weigh-in-motion data**. Journal of the transportation Research Forum, vol. 47, n. 4, pp. 45-61. Transportation Research Forum, 2008. Disponível em <<http://www.trforum.org/journal>>. Acesso em: setembro/2013.

KIM, O.; BELL, C. A.; WILSON, J. F. **Effects of increased truck tire pressure on asphalt concrete pavement.** Journal of Transportation Engineering, v. 115, n. 4, p. 329 – 350, July of 1989.

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. Contrato n° PJ/CD/158/02.

LIU, C.; HERMAN, R.; MACCULLOUGH, B. F. **Pavement deterioration, rate of dynamic force, and ride quality.** Transportation Research Record – Pavement design, management and performance – Pavement management and monitoring of traffic and pavements. Washington, n° 1643, Nov. 1998, p. 14-19.

MACHEMEHL, R. B.; WANG, F.; PROZZI, J. A. **Analytical study of effects of truck tire pressure on pavements using measured tire-pavement contact stress data.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, TRB 2005 Annual Meeting. Washington D. C., 2005.

MARTINS, E. R. C.; MIRANDA, L. M. **Controle de carga na rede pavimentada de Mato Grosso.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., Cuiabá. **Anais...**Cuiába: ABPv, 1995. p141-173.

MARTINS, R.; SERRA VALE, A. **Gerenciamento do controle de pesagem dos veículos de carga nas rodovias estaduais do estado da Bahia: o futuro de nossas rodovias.** Anais da 38ª Reunião Anual de Pavimentação/ 12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Manaus. ABPv, 2007.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.

MICHAEL, P.; WILD, P. Heavy Vehicle Mass – Measurement Allowances and Breakpoints. Disponível em <[http://www.ntrc.gov.au/place/hv-masslimits\\_1.asp?lo=legis](http://www.ntrc.gov.au/place/hv-masslimits_1.asp?lo=legis)>. 2006. Acesso em: outubro/2013.

MICHELIN. **Fabricante de pneus.** Disponível em: < <http://www.michelin.com.br> >. 2004. Acesso em: setembro/2013.

MIDDLETON, D. R.; ROBERTS, F. L.; CHIRA-CHAVALA. **Measurements and analysis of truck tire pressures of Texas highways**. Transportation Research Record. Washington, n° 1070, p. 1-8. 1986.

MINER, M. N. **Cumulative damage in fatigue**. Transactions, American Society of Mechanics Engineers, v. 67, p. 159-164. New York, 1945. Apud MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Editora UFRJ. Rio de Janeiro, 1997.

Ministério dos Transportes. **Plano Nacional de Logística e Transporte 2007**. Disponível em: < <http://www.transportes.gov.br/>>. Acesso em: 20 out. 2014.

MONISMITH, C. L.; DEACON, J. A. **Fatigue of asphalt paving mixture**. ASCE Transp. Eng. Journal, New York, 1969. Apud MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Editora UFRJ. Rio de Janeiro, 1997.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. 366p. Tese (Doutorado em ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Apud BERNUCCI, L. B.; et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (Estados Unidos). **Committee for the Truck Weight Study. Weight limits: issues and options**. Washington: Transportation Research Board, 1990. Apud ALBANO, J. F. **Efeitos da variação da carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento**. Dissertação de Mestrado em Transportes. Porto Alegre: Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEF da UFRGS, 1998. 138p.

NCHRP – NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures**. Final Report NCHRP 1-37A. Champaign, Illinois, 2004.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – OECD. **Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment (DIVINE)** – Technical Report. Paris: OECD, 1998. 151P.

Papagiannakis, A.T. e Massad, E.A. **Pavement design and materials**. Hoboken: John Wiley & Sons. 2008. 542p.

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. 330p.

PEREIRA, D. R. A. M. **Contribuição ao estudo de fatores de equivalência de cargas**. São Paulo, SP: Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. 1992. 204p.

PETERLINI, P. S. **Cargas por eixo e fatores de veículos obtidos em rodovias federais concessionadas do Estado do Paraná**, 192 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2006.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis**. Rio de Janeiro, 2002. 269p.

PORTÃO, S. B. **Coletânea de legislação de trânsito**. Tubarão, SC: Gráfica e Editora Copiart, 2000. 372p.

PRIME. Prime Engenharia e Consultoria LTDA. **Projeto Executivo de Pavimentação para Implantação da 4ª faixa da BR 290 – segmento km 75 + 040 ao km 94 + 300**. Setembro de 2013.

Regulamento de Pesos e Dimensões de Veículos no Canadá, 2006. Apud PETERLINI, P. S. **Cargas por eixo e fatores de veículos obtidos em rodovias federais concessionadas do Estado do Paraná**, 192 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2006.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R. et al. **Hot mix asphalt materials, mixture, design and construction**. 2 ed. Lanham, Maryland, Napa Education Foundation. 1996.

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. Maceió. Anais. Associação Brasileira de Pavimentação / ABPv, 1987.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997. v.1. 746p.

SHIOTSUKI, R. A. **Análise do efeito da suspensão traseira de veículo rodoviário de carga no desempenho de pavimentos flexíveis.** Dissertação - Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo, 2009.

SOUZA, M. L. **Pavimentação rodoviária.** 3. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980. 361p.

TIMM, D. H.; NEWCOMB, D. E. **Lies, damned lies and traffic forecasting. Hot Mix Asphalt Technology,** Washington DC., p. 14 – 21, jul./aug. 2002. Edição de National Asphalt Pavement Association. Apud ALBANO, J. F. **Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.

TREYBIG, H. J.; VON QUINTUS, H. L. **Equivalency factor analysis and prediction for triple axles** – Report BR2/1 – Austin. Research Engineers, Texas. 1976. Apud 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. Maceió. Anais. Associação Brasileira de Pavimentação / ABPv, 1987.

TURNBUL, W. J.; FOSTER, C. R.; AHLVIN, R. G. **Design of Flexible considering Mixed Loads and Traffic Volume.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, Michigan, 1962.

UGE, P; VAN DE LOO, P. J. **Permanent deformation of asphalt mixes,** Koninklijke/Shell – Laboratorium. Amsterdã, Holanda. Novembro. 1974.

WANG, F.; MACHEMEHL, R. B. **Development of quick solutions for prediction of critical asphalt pavement responses due to measured tire-pavement contact stresses.** Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board. TRB 2006. Annual Meeting. Washington, D. C., 2006.

WANG, F. **Mechanistic-empirical study of effects of truck tire pressure on asphalt pavement performance.** 2005. 188 f. Dissertation (Doctor of Philosophy). Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin, 2005.

WATSON, J. P. **Highway construction and maintenance.** London: Longman, 1989. 217p.  
WIDMER, J. A. **Compatibilidade de Tráfego de bitrens de 25 m com a infraestrutura viária brasileira.** 2º Colóquio Internacional de Suspensões e 1º Colóquio de Implementos Rodoviários da SAE-Brasil. Caxias do Sul, 2002.

YODER, E.; WITCZACK, M. **Principles of pavement design**. 2 ed. New York: John Willey & Sons, 1975.