

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO
EDUCACIONAL INACIANA Pe. SABÓIA DE MEDEIROS

RAFAEL DOMINGUES SHIOTSUKI

12.207.128-0

**ANÁLISE DO EFEITO DA SUSPENSÃO TRASEIRA DE VEÍCULO
RODOVIÁRIO DE CARGA NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

São Bernardo do Campo

2009

RAFAEL DOMINGUES SHIOTSUKI

12.207.128-0

**ANÁLISE DO EFEITO DA SUSPENSÃO TRASEIRA DE VEÍCULO
RODOVIÁRIO DE CARGA NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Centro Universitário da FEI, como requisito
para a obtenção do título Mestre em
Engenharia Mecânica, orientado pelo Prof.
Dr. Agenor de Toledo Fleury

São Bernardo do Campo

2009

Shiotsuki, Rafael Domingues

Análise do efeito da suspensão traseira de veículo rodoviário de carga no desempenho de pavimentos flexíveis / Rafael Domingues Shiotsuki. São Bernardo do Campo, 2009.

115 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

1. Dinâmica Veicular. 2. Força Dinâmica no Pneu. 3. Desempenho De Pavimento. I. Fleury, Agenor de Toledo, orient. II. Título.

CDU 629.113

À meus amados pais e à minha
amada esposa.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer:

Ao professor Agenor de Toledo Fleury, orientador deste trabalho, pelo apoio e paciência para o desenvolvimento e bom andamento dessa pesquisa.

A minha esposa Evelyn, pela disposição, dedicação e paciência nesta caminhada;

Aos meus pais, Ana Lucia e Ernesto, pela criação, educação, força e incentivo que me deram. Sem eles eu não chegaria aonde cheguei;

Aos professores Fernando Moya Orsatti, Frederico Barbieri, Creso de Franco Peixoto e Laura Maria Goretti da Motta que, além do apoio, ajudaram a definir o sentido geral do trabalho.

Aos professores da FEI, por colaborarem com a minha formação acadêmica;

À empresa Scania Latin América, por fornecer os dados de referência para simulação dos caminhões estudados;

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Minha gratidão será eterna.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo do efeito da suspensão traseira de um veículo rodoviário de carga no desempenho de pavimentos flexíveis. Compara-se a degradação ao longo do tempo causada por um caminhão com suspensão traseira mecânica e outro com suspensão traseira pneumática. Um modelo matemático de meio veículo com 4 graus de liberdade é utilizado para modelar a dinâmica vertical do veículo. Para a simulação dos veículos em estudo utilizam-se dados de caminhões reais e realizam-se as simulações no programa Matlab/Simulink. Para simulação do desempenho de pavimentos flexíveis utiliza-se o programa SisPav 2009. Este programa foi desenvolvido pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2007 e utiliza a teoria da elasticidade com um modelo elástico não linear para calcular as tensões e deformações no pavimento e modelos mecânicos para previsão dos danos acumulados por fadiga, da deformação permanente e da estimativa da vida de serviço do pavimento.

Palavras chave: dinâmica veicular, força dinâmica no pneu, desempenho de pavimento.

ABSTRACT

This work presents a study of the effect of the rear suspension of vehicles on the performance of flexible pavements. It compares the road damage over time caused by a truck with leaf rear suspension and another with rear air suspension. A mathematical model of a half vehicle with 4 degrees of freedom is used to model the vertical dynamic of vehicle. For the simulations of vehicles, it's used data collected from real trucks and it's used the software Matlab/Simulink to perform the simulations. For the simulation of the performance of the pavement is used the software SisPav 2009. This software was developed by Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) of Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) in 2007 and it uses the theory of elasticity with a non-linear elastic model to calculate the stresses and strains in the pavement and mechanic models to predict the fatigue life, the permanent deformation and the service life of the pavement.

Key words: vehicle dynamic, dynamic tire force, road performance.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Distância entre eixo dianteiro e CG [m]
A_S	Área efetiva da bolsa de ar [m ²]
b	Distância entre eixo traseiro e CG [m]
C_A	Coefficiente de amortecimento do amortecedor [N s/m]
CBR	Índice de suporte Califórnia
C_D	Coefficiente de amortecimento do amortecedor dianteiro [N s/m]
C_P	Calor específico do gás a pressão constante [J/(kg K)]
C_{PD}	Coefficiente de amortecimento do amortecedor do pneu dianteiro [N s/m]
C_{PT}	Coefficiente de amortecimento do amortecedor do pneu traseiro [N s/m]
C_T	Coefficiente de amortecimento do amortecedor traseiro [N s/m]
C_V	Calor específico do gás a volume constante [J/(kg K)]
e	Deformação vertical do bolsão de ar [m]
E	Modulo de elasticidade da camada do pavimento [MPa]
F_0	Força inicial aplicada no bolsão de ar [N]
F_1	Força da mola no eixo dianteiro [N]
F_2	Força do amortecedor no eixo dianteiro [N]
F_3	Força da mola no eixo dianteiro [N]
F_4	Força do amortecedor no eixo dianteiro [N]
F_5	Força da mola do pneu no eixo dianteiro [N]
F_6	Força do amortecedor do pneu no eixo dianteiro [N]
F_7	Força da mola do pneu no eixo traseiro [N]
F_8	Força do amortecedor do pneu no eixo traseiro [N]
F_B	Força aplicada no bolsão de ar [N]
F_{EP}	Força estática no pneu [N]
F_S	Força aplicada na mola [N]
H	Espessura da camada do pavimento [cm]
H_{ac}	Espessura da camada asfáltica [polegadas]
h_0	Altura inicial da bolsa de ar [m]
h_i	Espessura da camada ou subcamada de ordem i [mm]
I_S	Momento de inércia em relação ao eixo transversal do caminhão [kg m ²]
K_1	Parâmetros determinados em ensaios de laboratório
K_2	Parâmetros determinados em ensaios de laboratório
K_3	Parâmetros determinados em ensaios de laboratório
K_4	Parâmetros determinados em ensaios de laboratório
K_5	Parâmetros determinados em ensaios de laboratório
K_D	Rigidez da mola dianteira [N/m]
K_{PD}	Rigidez da mola do pneu dianteiro [N/m]
K_{PT}	Rigidez da mola do pneu traseiro [N/m]
K_S	Rigidez da mola [N/m]
K_T	Rigidez da mola traseira [N/m]
MD	Massa não suspensa dianteira [kg]
M_R	Modulo de resiliência do revestimento asfáltico [kgf/cm ²]
MS	Massa suspensa [kg]
MT	Massa não suspensa traseira [kg]
n	Número de camadas ou subcamadas
N_f	Número de repetições de carga para ocorrência de trincas por fadiga;
P	Pressão no bolsão de ar [Pa]
P_0	Pressão inicial no bolsão de ar [Pa]

P_1	Pressão absoluta inicial [Pa]
P_2	Pressão absoluta final [Pa]
V	Volume do bolsão de ar [m ³]
V_0	Volume inicial no bolsão de ar [m ³]
V_1	Volume inicial [m ³]
V_2	Volume final [m ³]
v_A	Velocidade relativa do amortecedor [m/s]
x	Deformação da mola [m]
Z_1	Deslocamento vertical da pista no eixo dianteiro [m]
Z_2	Deslocamento vertical da pista no eixo traseiro [m]
Z_D	Deslocamento vertical da massa não suspensa dianteira [m]
Z_S	Deslocamento vertical da massa suspensa [m]
Z_{SD}	Deslocamento vertical da massa suspensa no eixo dianteiro [m]
Z_{ST}	Deslocamento vertical da massa suspensa no eixo traseiro [m]
Z_T	Deslocamento vertical da massa não suspensa traseira [m]
α	Coefficiente de deformação permanente das propriedades dos materiais
γ	Constante gasosa do ar
ϵ_t	Deformação de tração no ponto crítico [mm]
θ_S	Deslocamento angular da massa suspensa [rad]
μ	Coefficiente de deformação permanente das propriedades dos materiais
σ_t	Tensão de tração no ponto crítico
ν	Coefficiente de Poisson
\dot{Z}_D	Velocidade vertical da massa não suspensa dianteira [m/s]
\ddot{Z}_D	Aceleração vertical da massa não suspensa dianteira [m/s ²]
\dot{Z}_S	Velocidade vertical da massa suspensa [m/s]
\ddot{Z}_S	Aceleração vertical da massa suspensa [m/s ²]
\dot{Z}_{SD}	Velocidade vertical da massa suspensa no eixo dianteiro [m/s]
\dot{Z}_{ST}	Velocidade vertical da massa suspensa no eixo traseiro [m/s]
\dot{Z}_T	Velocidade vertical da massa não suspensa traseira [m/s]
\ddot{Z}_T	Aceleração vertical da massa não suspensa traseira [m/s ²]
$\ddot{\theta}_S$	Aceleração angular da massa suspensa [rad/s ²]
δ_{total}^P	Deformação permanente total do pavimento [mm]
\mathcal{E}_P^i	Deformação permanente específica média da camada ou subcamada de ordem i [mm]
δ_{sl}	Deformação permanente no subleito [mm]
ϵ_P	Deformação específica permanente [mm]
ϕ_{FDP}	Desvio padrão da força dinâmica no pneu

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	American Association of State Highway Officials
AASHTO	American Association of State and Highway Transportation Officials
ABCR	Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
ALF	Accelerated Loading Facility
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATR	Afundamento na trilha de roda
CEPAL	Comissão Econômica para a América Latina e Caribe
CDC	Coeficiente Dinâmico de Carga
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
DLC	Dynamic Load Coefficient
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte
EFin3D	Método dos Elementos Finitos Tridimensionais
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
HRB	Highway Research Board
MEF	Métodos dos Elementos Finitos
MIT	Massachusetts Institute of Technology
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
PTF	Pavement Testing Facility
SAE	Society of Automotive Engineers
SHRP	Strategic Highway Research Program
TRRL	Transport and Road Research Laboratory
TxMLS	Texas Mobile Load Simulator
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USP	Universidade de São Paulo
WDOT	Departamento de Transportes do Estado de Washington
II PND	II Plano Nacional de Desenvolvimento

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Compromisso da dirigibilidade e conforto da suspensão do veículo.....	26
Figura 2: Molas metálicas com feixe de lâminas. a) Conjunto com feixe de lâminas trapezoidais. b) Conjunto com feixe de lâminas parabólicas.	27
Figura 3: Gráfico característico da mola linear. a) Gráfico Força x Deformação. b) Gráfico Rigidez x Deformação.	28
Figura 4: Esquema de suspensão metálica com dois feixes de molas.	29
Figura 5: Gráfico característico de suspensão com 2 feixes de molas. a) Gráfico Força x Deformação. b) Gráfico Rigidez x Deformação.....	29
Figura 6: Esquema da suspensão pneumática. a) Conjunto com duas bolsas pneumáticas. b) Conjunto com quatro bolsas pneumáticas.	31
Figura 7: Desenho esquemático da definição da pressão interna do bolsão.....	33
Figura 8: Esquema básico de um amortecedor veicular.....	35
Figura 9: Gráfico característico do amortecedor com comportamento assimétrico. a) Gráfico Força x Velocidade. b) Gráfico Coeficiente de amortecimento x Velocidade.....	36
Figura 10: Gráfico característico do amortecedor com comportamento assimétrico e multifásico. a) Gráfico Força x Velocidade. b) Gráfico Coeficiente de amortecimento x Velocidade.....	37
Figura 11: Modelos matemáticos de pneu.....	38
Figura 12: Modelos de pneus. a) Modelo Voigt-Kevin com mola e amortecedor em paralelo. b) Modelo Voigt-Kevin com amortecedor visco-elástico.	38
Figura 13: Modelo de Caminhão com suspensões dianteira e traseira metálica com feixe de molas.....	40
Figura 14: Diagrama de corpo livre da massa suspensa.....	42
Figura 15: Diagrama de corpo livre da massa não suspensa dianteira.	43
Figura 16: Diagrama de corpo livre da massa não suspensa traseira.	44
Figura 17: Seção típica de uma estrutura de pavimento flexível para subleito de baixa capacidade.	54
Figura 18: Tensões num pavimento flexível de espessura elevada de revestimento. a) Esquema básico das tensões no pavimento. b) Diagrama das tensões no pavimento.	55
Figura 19: Ciclo de vida de uma rodovia pavimentada.....	62
Figura 20: Deformação permanente com afundamento na trilha de roda.	66
Figura 21: Exemplo real de deformação permanente.....	67
Figura 22: Tipos de trincas.	72

Figura 23: Trinca isolada do tipo transversal.	72
Figura 24: Trinca isolada do tipo longitudinal.	73
Figura 25: Trinca interligada do tipo couro de jacaré.	73
Figura 26: Trinca interligada do tipo bloco.	74
Figura 27: Esquema básico da simulação do modelo de interação caminhão-pavimento.	89
Figura 28: Perfil da pista de entrada do sistema.	91
Figura 29: Diagrama de blocos do modelo 1 no programa Simulink.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Matriz de transporte de carga: comparação percentual	18
Tabela 2: Estado de conservação da malha rodoviária, em %.....	19
Tabela 3: Modos de degradação e seus fatores causadores	64
Tabela 4: Níveis de severidade do afundamento na trilha de roda.....	65
Tabela 5: Contribuição de cada camada na deformação permanente total.....	68
Tabela 6: Modelos de previsão de deformação permanente.....	78
Tabela 7: Parâmetros de ensaios de laboratório para ocorrência de deformação permanente .	83
Tabela 8: Parâmetros de ensaios de laboratório para ocorrência de trincas por fadiga.....	85
Tabela 9: Modelos de previsão de trincas por fadiga	86
Tabela 10: Coeficiente dinâmico de carga	97
Tabela 11: Modelos de previsão de desempenho utilizados nas simulações	102
Tabela 12: Temperaturas médias mensais na cidade de São Paulo.....	103
Tabela 13: Propriedades mecânicas do pavimento tipo BR01	103
Tabela 13: Forças dinâmicas no eixo traseiro dos caminhões estudados.....	104
Tabela 14: Vida de serviço estimada do pavimento, em anos.....	104
Tabela 15: Trincas por fadiga no pavimento, em %.....	105
Tabela 16: Deformação permanente, em cm.....	106

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Força dinâmica no pneu traseiro para o modelo 1	93
Gráfico 2: Força dinâmica no pneu traseiro para o modelo 2	94
Gráfico 3: Força dinâmica no pneu traseiro para o modelo 3	95
Gráfico 4: CDC x Velocidade	96
Gráfico 5: Força dinâmica no pneu traseiro para a velocidade de 80 km/h	98
Gráfico 6: Força dinâmica no pneu traseiro para a velocidade de 100 km/h	99
Gráfico 7: Vida de serviço estimada do pavimento, em anos	104
Gráfico 8: Trincas por fadiga no pavimento, em %	105
Gráfico 9: Deformação permanente, em cm.....	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	20
1.2	Objetivos.....	21
1.3	Estrutura do trabalho	22
2	A DINÂMICA VERTICAL DO CAMINHÃO.....	24
2.1	Elementos básicos da suspensão.....	25
2.1.1	Mola metálica com feixe de lâminas	27
2.1.2	Mola pneumática	30
2.1.3	Amortecedor	34
2.1.4	Pneu	37
2.2	Modelo mecânico da dinâmica vertical do caminhão.....	39
2.2.1	Modelo 1 - Caminhão com suspensões dianteira e traseira metálica com feixe de molas e comportamento linear dos amortecedores.....	41
2.2.2	Modelo 2 - Caminhão com suspensões dianteira e traseira metálica com feixe de molas e comportamento não linear dos amortecedores.....	48
2.2.3	Modelo 3 - Caminhão com suspensão dianteira metálica com feixe de molas e traseira pneumática	49
3	A MECÂNICA DO PAVIMENTO	52
3.1	Pavimento.....	52
3.2	Resposta estrutural do pavimento	56
3.3	Degradação do pavimento	61
3.3.1	Principais tipos de degradação causadas em pavimentos flexíveis	63
3.3.1.1.	Deformação permanente.....	64
3.3.1.2.	Trincas	69
3.3.2	Modelos mecanístico-empíricos de degradação do pavimento	76
3.3.2.1.	Deformação permanente.....	76
3.3.2.2.	Trincas por fadiga.....	83
4	SIMULAÇÃO DO MODELO DE INTERAÇÃO DO CAMINHÃO-PAVIMENTO	89
4.1	Simulação da dinâmica vertical do caminhão.....	90

4.2	Simulação do desempenho do pavimento.....	100
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	108
	REFERÊNCIAS	110

1 INTRODUÇÃO

Quase 60% do transporte de carga no país é realizado através de rodovias. Essa opção pela modalidade rodoviária é uma tendência que se observa em nível mundial desde a década de 50, tendo como base a expansão da indústria automobilística associada aos baixos preços dos combustíveis derivados do petróleo (SCHRODER; CASTRO, 1996).

No Brasil, o transporte rodoviário, também se consolidou na mesma época e está associada à implantação da indústria automobilística no país e à mudança da capital para a região centro-oeste, que foram acompanhadas de um programa de construção de rodovias. Diferentemente do que ocorreu em nível mundial, no entanto, esta ênfase traduziu-se não só na prioridade, mas na quase exclusividade das políticas de transporte voltadas para a modalidade rodoviária, pelo menos até a década de 70.

O desenvolvimento econômico brasileiro na década de 70 esteve associado ao esforço de consolidação do parque industrial através de investimentos concentrados nos setores de insumos e de bens de capital que foram mencionados como metas no II Plano Nacional de Desenvolvimento (II PND).

A situação que se apresentava naquela época, em termos dos gargalos existentes no setor de infra-estrutura, permanece, no geral inalterada. Pode-se dizer que há um agravamento quantitativo que compromete significavelmente o processo sustentado de crescimento.

Isso posto, resulta que o Brasil ainda apresenta uma distribuição modal no transporte de carga excessivamente centralizada na rodovia, decorrente de um processo que se estendeu por várias décadas e onde predominou o crescimento rápido e desproporcional do segmento rodoviário se comparado com os demais modais de transporte.

O setor de transporte apresenta-se no Brasil de hoje segundo características que o diferenciam dos países desenvolvidos e até mesmo de grande parte dos subdesenvolvidos conforme pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1: Matriz de transporte de carga: comparação percentual

Modalidade	Países Desenvolvidos	Países Sub-Desenvolvidos	Brasil
Rodoviário	30,0	42,3	61,1
Ferrovário	40,0	38,5	20,7
Aquaviário	16,0	10,9	13,6
Outros	14,0	8,3	4,6

Fonte: Guia do transporte rodoviário de cargas, 2004.

Os dados da matriz de transporte de carga são resultados de um processo histórico, e as distorções apresentadas não devem, no entanto, servir para desconsiderar a importância do segmento rodoviário, que, afinal, transporta hoje mais da metade da carga do país.

Dada a importância da modalidade rodoviária para o crescimento econômico brasileiro, a conservação (manutenção e reabilitação) da malha rodoviária se torna primordial. De acordo com dados do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte (DNIT) e da Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (ABCR) as rodovias pavimentadas constituem extensão de: 57741 km federais (62,4% da rede federal); 101304 km estaduais (38,3% da rede estadual) e 22716 km municipais (1,6% da rede municipal), totalizando uma rede pavimentada de 181762 km (10,5% da rede existente). Este total inclui 10221 km de rodovias (federais e estaduais) concedidas à iniciativa privada em sete Estados da União que operam através da cobrança de pedágio para operações de manutenção e/ou ampliação (ABCR, 2009; DNIT, 2009).

A Confederação Nacional dos Transportes (CNT) realiza desde 1997 uma pesquisa rodoviária anual que considera as principais rodovias federais e estaduais da malha viária pavimentada e tem como objetivo principal analisar as condições das rodovias em relação aos aspectos de conservação, segurança e conforto dos usuários. Essa pesquisa avalia além do estado geral da via, também as condições do pavimento, sinalização, geometria e situação da superfície de rodagem. Segundo informação colhida na revista CNT (2004), as pesquisas realizadas refletem o cenário de toda rede rodoviária brasileira.

A pesquisa rodoviária CNT 2007, em sua 12ª edição, totaliza uma extensão pesquisada de 87592 km de rodovias federais e estaduais pavimentadas e também os principais trechos sob gestão estadual e administração terceirizada. Nessa edição da pesquisa, continua nítida a situação desfavorável constatada nos anos anteriores. Do total avaliado nesta edição o estado geral das rodovias brasileiras pavimentadas é: 64699 km - equivalentes a 73,9% da malha

pavimentada – foram classificados como regular, ruim ou péssimo. A tabela 2 mostra a distribuição da classificação do estado geral das rodovias. Em 26,1% da malha, com extensão de 22893 km, as condições de conservação foram classificadas nas categorias ótimo ou bom. A tabela 2 também ilustra a situação das rodovias, com detalhe para as características de pavimento, sinalização e geometria (CNT, 2007).

Tabela 2: Estado de conservação da malha rodoviária, em %

Estado de Conservação	Péssimo	Ruim	Regular	Bom	Ótimo
Estado Geral	11,0	22,1	40,8	15,6	10,5
Pavimento	7,9	10,8	35,8	6,5	39,0
Sinalização	14,7	16,3	34,3	12,3	22,3
Geometria	26,8	29,7	20,8	17,5	5,2

Fonte: CNT, 2007.

A notória deterioração da malha existente tem como principal causa a continuada queda dos investimentos em infra-estrutura, que, embora geral, afetou certamente em grande medida a modalidade rodoviária na sua capacidade de manutenção e reabilitação.

A situação da malha rodoviária brasileira contribui com alguma parcela para a perda da produtividade e aumento do custo operacional dos veículos. Segundo a CNT, verifica-se que “as condições do transporte terrestre (rodoviário e ferroviário) provocam, de acordo com avaliação da Embrapa, a perda de até 6% da safra de grãos” e que, além disso, “as rodovias em mau estado aumentam, em média, 46% o custo operacional dos veículos” (SCHRODER; CASTRO, 1996).

Recentes trabalhos realizados pela Comissão Econômica para a América Latina e Caribe (CEPAL), demonstram que o atual sistema de conservação rodoviária exauriu-se e, em decorrência de sua ineficiência, ocasiona enormes prejuízos às nações. Pelo menos um terço da rede rodoviária dos países da América Latina e Caribe apresenta-se em péssimas condições por falta de conservação adequada. E como mencionado por Schroder e Castro (1996) trafegar nestas rodovias acarreta um aumento de 45% no custo operacional dos veículos, exige o dobro do tempo de viagem e resulta em um acréscimo substancial no custo final dos produtos transportados. Esse mesmo relatório comenta que não conservar, deixar deteriorar e reconstruir leva a um gasto de três a seis vezes maiores do que se gastaria com a conservação adequada. Para cada real não aplicado na conservação se gasta R\$ 3,00 para restaurar ou reconstruir as estradas que não foram conservadas. Em relação ao Brasil, isto significa um

prejuízo anual da ordem de R\$ 10 bilhões. Este valor não leva em conta os prejuízos advindos de mais de 20.000 mortes e cerca de 400.000 feridos e inválidos por ano em acidentes motivados, entre outras causas, pela precariedade da malha e pela falta de recursos para um melhor policiamento, controle e educação para o trânsito. (RENAEST, 2009; ALBANO, 2005).

1.1 Motivação

O estudo da interação entre o veículo rodoviário de carga e o pavimento e a análise das características do caminhão que possibilitem menor força dinâmica no pneu e consequente diminuição da degradação dos pavimentos foram condições estimulantes e motivadoras na escolha deste assunto e desenvolvimento desta dissertação.

A manutenção e a reabilitação da malha rodoviária brasileira custam para os cofres públicos muitos bilhões de reais anualmente e causam grandes problemas para o tráfego. O estado precário das rodovias e a falta de manutenção adequada da rede estão a exigir uma conscientização maior das autoridades e dos usuários. Por muitas razões, recursos investidos na ampliação e conservação da rede rodoviária não têm retornado na forma de rodovias confortáveis e seguras à população em geral.

A questão do excesso de carga também preocupa o Ministério dos Transportes que informa que os caminhões que trafegam com excesso de carga causam prejuízos anuais de R\$ 1,5 bilhão aos cofres do Governo (ALBANO, 2005). As legislações brasileiras têm estabelecido por muitos anos os limites de carga estática por eixo e por conjunto, mas somente isso não é eficaz para quantificar os danos que o caminhão causa no pavimento. A força dinâmica vertical proveniente do caminhão que causa a degradação do pavimento é fortemente influenciada por: velocidade do caminhão, irregularidade longitudinal da pista e características do caminhão, tais como: tipo e projeto da suspensão, configuração dos pneus e distribuição de carga. O estudo da suspensão do caminhão como característica a reduzir

degradação do pavimento também é a causa da investigação pretendida por este trabalho (MRAD; EL-GINDV; KENIS, 1998).

1.2 Objetivos

Diante das condições precárias da malha rodoviária brasileira e considerando as justificativas e motivações que apoiaram este trabalho, decidiu-se desenvolver a presente dissertação com o objetivo principal de analisar o efeito da suspensão traseira do veículo rodoviário de carga no desempenho de pavimentos flexíveis e propor o caminhão com o tipo de suspensão traseira que menor degrada o pavimento.

Assim, pretende-se também, com o trabalho, fornecer informações, argumentos e orientações gerais para organizações relacionadas com o transporte de carga em utilizar caminhões que causem menor degradação no pavimento.

Discriminam-se também objetivos específicos, listados a seguir:

- a. Aprimorar conhecimento sobre modelagem da dinâmica vertical de um veículo rodoviário de carga.
- b. Aprimorar conhecimento sobre resposta do pavimento a força dinâmica causada pelo veículo rodoviário de carga.
- c. Aprimorar conhecimento sobre os tipos principais de degradações de pavimentos flexíveis e como prever seu desempenho através da utilização de modelos mecanístico-empíricos.

1.3 Estrutura do trabalho

O primeiro passo foi o desenvolvimento de uma ampla revisão bibliográfica para tomar conhecimento dos principais estudos semelhantes. Para tal finalidade utilizaram-se muitos sítios na internet de organizações especializadas, livros, anais de congressos, revistas, boletins, periódicos nacionais e estrangeiros e, principalmente, trabalhos apresentados em eventos nacionais e internacionais.

E para atingir os objetivos propostos na seção 1.2 organizou-se o trabalho de pesquisa em 4 capítulos descritos a seguir.

O capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, detalhando um breve histórico do transporte de carga, a degradação de pavimentos no Brasil, a motivação, os objetivos, como foi estruturado este trabalho de pesquisa.

O capítulo 2 do trabalho intitulado A Dinâmica do Caminhão apresenta os modelos mecânicos da dinâmica vertical do veículo rodoviário de carga, além de uma abordagem conceitual e teórica dos principais componentes que compõem a suspensão do caminhão.

O capítulo 3 é destinado a apresentar sobre o fenômeno da interação do veículo rodoviário de carga com o pavimento, detalhando como prever o desempenho de pavimentos flexíveis. O capítulo foi dividido em duas partes, na primeira parte apresenta sobre a resposta do pavimento as forças aplicadas pelo veículo de carga e o método de cálculo utilizado para calcular as tensões e deformações no pavimento. Na segunda parte, descrevem-se os dois principais tipos de degradações causadas nos pavimentos flexíveis e os modelos mecanísticos-empíricos de previsão do desempenho desses pavimentos.

O capítulo 4 é destinado a apresentar a simulação do sistema caminhão-pavimento, detalhando em sua primeira parte o método utilizado para simular da dinâmica vertical dos caminhões estudados e na segunda parte o método utilizado para simular o desempenho de pavimentos flexíveis a partir das forças dinâmicas do caminhão..

A simulação da dinâmica vertical do caminhão foi realizada no programa Matlab/Simulink utilizando os modelos mecânicos detalhados no capítulo 2. Para efeito de

avaliar e comparar a suspensão traseira dos caminhões estudados utiliza-se o Coeficiente Dinâmico de Carga (CDC), (em inglês Dynamic Load Coefficient – DLC), o qual é usualmente utilizado por vários autores para esse fim. (HEDRIK, YI, 1991; COLLOP, CEBON, 1999).

A simulação do desempenho de pavimentos flexíveis foi realizada no programa SisPav 2009. Este programa foi desenvolvido por Franco (2007) em 2007 no COPPE/UFRJ com o objetivo de dimensionar e avaliar o desempenho de pavimentos e utiliza a teoria da elasticidade com um modelo elástico linear para calcular as tensões e deformações no pavimento e modelos mecanístico-empíricos para previsão da ocorrência de trincas por fadiga e da deformação permanente no pavimento.

No capítulo 5 encerra-se o trabalho com as apresentações das conclusões mais importantes e das sugestões de temas para futuras pesquisas.

2 A DINÂMICA VERTICAL DO CAMINHÃO

Este capítulo apresenta o modelo mecânico da dinâmica do veículo rodoviário de carga, suas características e como foi modelado.

Para modelar o comportamento real da dinâmica vertical do caminhão, é necessário considerar as não linearidades (CEBON, 1999). Essas não linearidades são oriundas das características da suspensão (mola e amortecedor) e também dos pneus, e podem ser modeladas tendo como base dados experimentais e análises dos subsistemas do veículo. As não linearidades consideradas nesse trabalho são: não linearidade do amortecedor hidráulico e não linearidade da mola pneumática.

Para efeito de comparação dessas características não lineares, serão modelados e simulados 3 modelos mecânicos de caminhões. Um com suspensão dianteira e traseira metálica com feixe de molas e considerando comportamento linear dos amortecedores. Outro com suspensão dianteira e traseira metálica com feixe de molas e considerando comportamento não linear dos amortecedores. E outro com suspensão dianteira metálica com feixe de molas e suspensão traseira pneumática e considerando comportamento não linear dos amortecedores.

Foi utilizado um modelo de meio veículo com quatro graus de liberdade, que para o escopo do trabalho se enquadra perfeitamente. E conforme apresentado por Cebon (1999) podem ser utilizados modelos simples para simulação da dinâmica vertical de caminhões e posterior cálculo da força vertical no pavimento desde que observados os seguintes pontos na modelagem:

- a. As não linearidades da suspensão devem ser modeladas com precisão;
- b. A distribuição de carga nos eixos deve ser modelada com precisão;
- c. A massa suspensa pode ser assumida como rígida e a flexibilidade do chassis desconsiderada;
- d. Modelos de meio veículo são suficientemente precisos e o efeito de rolamento pode ser ignorado;

- e. Os efeitos da não uniformidade dos pneus podem ser ignorados;
- f. O perfil da pista para entrada na simulação deve ser conhecido com precisão. Para efeito de validação de modelo é imprescindível medições da pista de teste.

A seção subsequente apresenta fundamentos sobre suspensão veicular utilizada em veículos rodoviários de carga. Serão detalhados os elementos que interagem na suspensão e como modelá-los, com comportamento linear e não linear.

2.1 Elementos básicos da suspensão

Suspensão primária é o termo usado para designar os componentes que conectam o conjunto eixo, pneu e roda com o chassis do veículo. Os componentes que conectam o chassis do veículo com a carroceria ou aqueles componentes localizados diretamente no assento do motorista são comumente chamados suspensão secundária. Basicamente existem dois elementos na suspensão primária convencional, as molas e os amortecedores (SIMON, 1998).

A função da mola no sistema de suspensão do veículo é o de suportar o peso estático do veículo e o papel do amortecedor é o de dissipar a energia vibracional proveniente da pista que posteriormente é transmitida para o chassis do veículo. A função básica e forma de uma suspensão são a mesma independentemente do tipo de veículo ou suspensão (FERREIRA, 2003).

Suspensões primárias são divididas em passiva, ativa e semi-ativas. Este trabalho apresenta somente a suspensão passiva, que é mais comumente utilizada em veículos rodoviários de carga.

Segundo Simon (1998), um sistema de suspensão passiva é aquele em que as características de seus componentes (molas e amortecedores) são fixos. Essas características são determinadas pelo projetista da suspensão, de acordo com a concepção e os objetivos da

aplicação pretendida. O projeto da suspensão é um compromisso entre a dirigibilidade e conforto do veículo, como mostrado na figura 1.

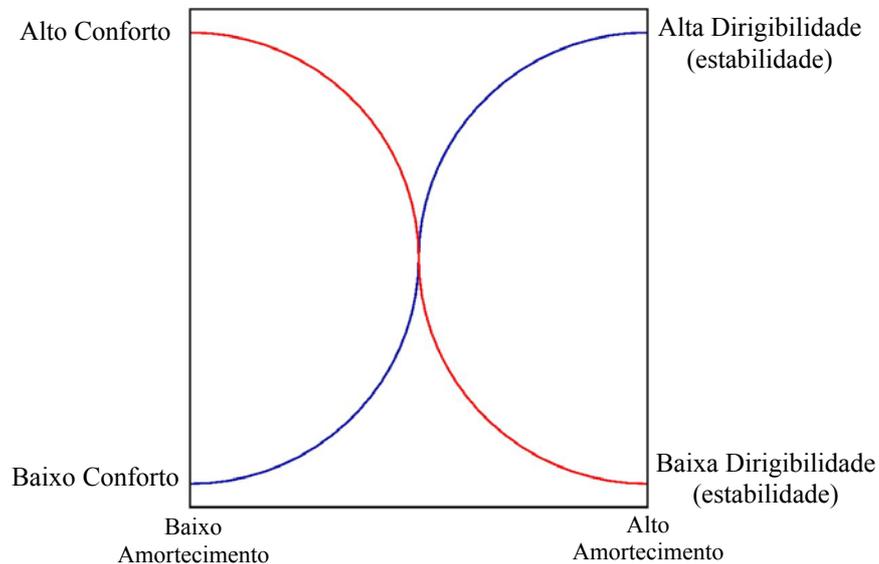


Figura 1: Compromisso da dirigibilidade e conforto da suspensão do veículo.
Fonte: Simon, 1998, p. 5

Uma suspensão com alto amortecimento implica uma boa dirigibilidade para o veículo, mas também transfere mais das imperfeições da pista para o chassi do veículo, resultando num baixo conforto para o motorista. Uma suspensão com baixo amortecimento por outro lado proporciona uma viagem mais confortável, mas pode reduzir significativamente a estabilidade do veículo em curvas ou mesmo em manobras rápidas de mudança de faixa. A boa concepção de uma suspensão passiva pode, em certa medida otimizar o conforto e a estabilidade, mas não pode eliminar este compromisso (SIMON, 1998).

2.1.1 Mola metálica com feixe de lâminas

Como mencionado anteriormente, o papel da mola na suspensão é suportar a carga estática do caminhão. Para a aplicação em caminhões pesados, devido sua alta capacidade de carga se torna viável a utilização de molas do tipo de feixe de lâminas. Existem dois tipos de molas com feixe de lâminas: feixe de lâminas trapezoidais (ou semi-elípticas) e feixe de lâminas parabólicas (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1980).

Ambas as molas são compostas por lâminas de aço sobrepostas e de tamanho variável. As lâminas são alinhadas por cliques e unidas por um parafuso no centro das mesmas. Em operação, o feixe de molas trabalha como uma viga flexível. As duas molas são semelhantes entre si, variando na espessura das lâminas e em suas características de rigidez. A figura 2 mostra o esquema dos dois tipos de molas metálicas com feixe de lâminas.

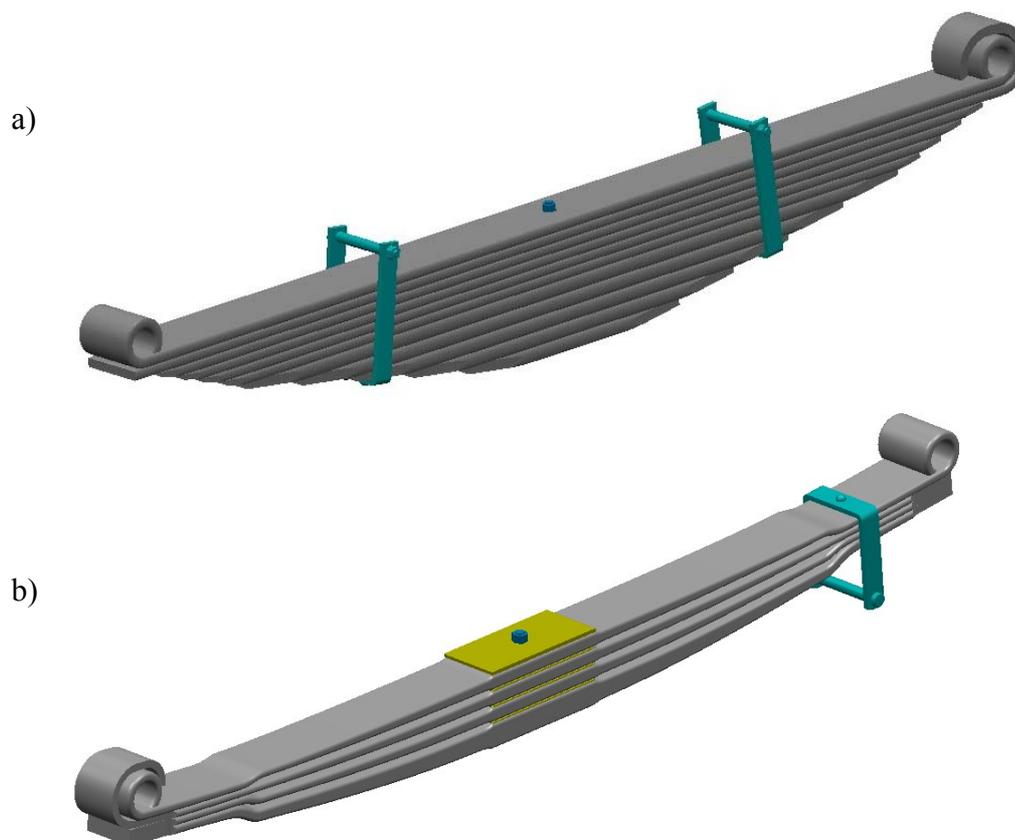


Figura 2: Molas metálicas com feixe de lâminas. a) Conjunto com feixe de lâminas trapezoidais. b) Conjunto com feixe de lâminas parabólicas.

Fonte: Ferreira, 2003, p. 7

Para modelagem da mola, de acordo com a lei de Hooke e considerando uma mola sujeita à ação de uma força de intensidade F_s que sofre deformação x , define-se a rigidez da mola por:

$$K_s = \frac{F_s}{x} \quad (1)$$

Pode-se verificar em muitos casos que, o aumento da intensidade da força F_s causa aumento proporcional da deformação x . Nesse caso observa-se que K_s é uma constante, denominada constante elástica da mola:

$$K_s = \frac{F_s}{x} = \frac{2.F_s}{2.x} = \frac{3.F_s}{3.x} \quad (2)$$

Compreende-se que como o comportamento dessa mola é linear, vale o princípio da superposição entre a entrada F_s e saída x e a força necessária para causar uma deformação de 1 m da mola não depende de quanto a mola está deformada, ou seja K_s não depende de x . A figura 3 apresenta a curva característica da mola linear com rigidez constante e seu respectivo gráfico de rigidez em função da deformação.

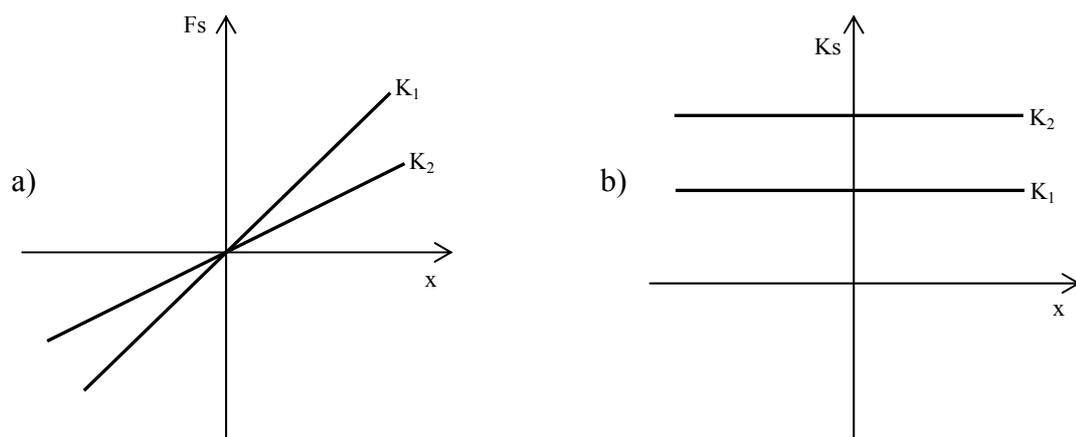


Figura 3: Gráfico característico da mola linear. a) Gráfico Força x Deformação. b) Gráfico Rigidez x Deformação.

Fonte: Orsatti, 2008, p. 2

Para aplicações em caminhões pesados e melhor adequar o comportamento real do sistema, a mola linear com rigidez constante não se mostra viável, visto que, para uma dada

rigidez um caminhão carregado tem um comportamento bom, mas, certamente, para essa mesma rigidez, um caminhão descarregado terá um comportamento deficiente. Para esses casos deseja-se uma rigidez variável em função da carga do caminhão. Uma solução comumente utilizada é usar um feixe de mola auxiliar, sendo que com o caminhão descarregado apenas o feixe de molas principal trabalha e, quando este atinge uma determinada deflexão, o feixe de molas auxiliar apoia-se em dois batentes superiores no chassi do caminhão e ambos trabalham juntos, com isso aumentando a rigidez da mola. Um exemplo desse sistema com dois feixes de molas é apresentado na figura 4 e na figura 5 com suas curvas características.

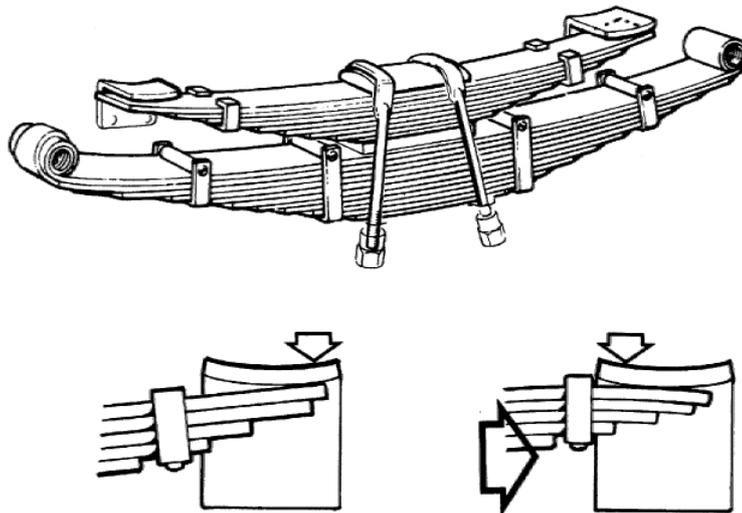


Figura 4: Esquema de suspensão metálica com dois feixes de molas.

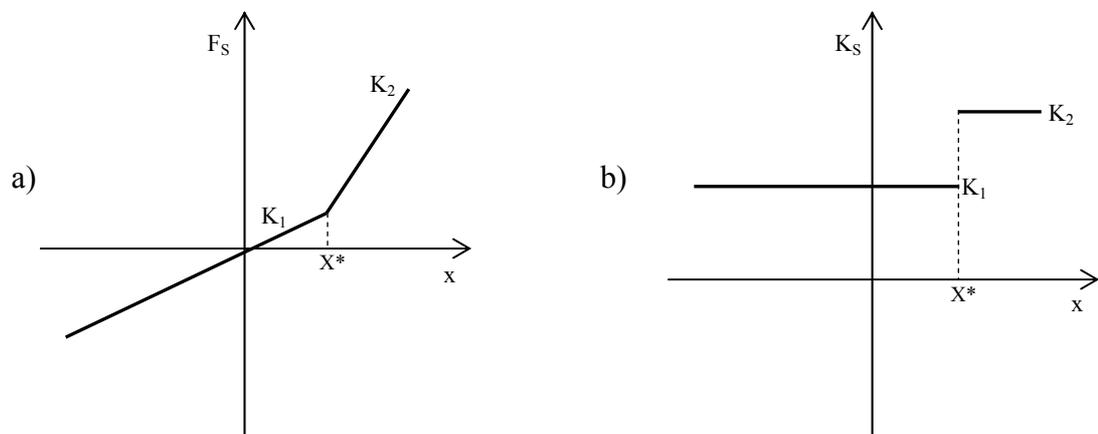


Figura 5: Gráfico característico de suspensão com 2 feixes de molas. a) Gráfico Força x Deformação. b) Gráfico Rigidez x Deformação.

Fonte: Orsatti, 2008, p. 3

Pode-se notar que, a partir de uma determinada deformação, a rigidez da mola aumenta de K_A para K_B , com isso, nota-se que a força aplicada pode ser escrita na forma:

$$F_S(x) = \begin{cases} K_A \cdot x & \text{se } x \leq x^* \\ (K_B \cdot x^*) + K_2 \cdot (x - x^*) & \text{se } x > x^* \end{cases} \quad (3)$$

Como a força aplicada na mola é em função da deformação, a rigidez da mola pode ser escrita por:

$$K_S(x) = \frac{dF_S(x)}{dx} \quad (4)$$

2.1.2 Mola pneumática

A mola pneumática é constituída basicamente de uma bolsa de material elastomérico, normalmente borracha sintética trefilada, que funciona com a compressão do ar. A capacidade de suportar o carregamento é determinada pela área efetiva e pela pressão interna do ar. O ar internamente pode ser comprimido até atingir a pressão necessária para suportar o carregamento a ela proposto. A compressibilidade do ar fornece a elasticidade necessária à mola. Esse tipo de mola tem a capacidade de armazenar grande quantidade de energia por unidade de massa, o que é uma vantagem se comparada com as molas metálicas. Outra vantagem da mola pneumática é a capacidade de variar sua rigidez, alterando a pressão interna na bolsa, possibilitando diferentes capacidades no carregamento (PRESTHUS, 2002).

Suspensões pneumáticas são geralmente equipadas com válvulas de regulação da altura. O objetivo principal destas válvulas é de manter a distância entre o eixo e o chassi do veículo ajustando a pressão do ar dentro da bolsa. Para conseguir esse resultado sem a necessidade de utilizar grande quantidade de ar, é incorporado no projeto um atraso de um segundo para que as válvulas não atuem nas mudanças rápidas da distância entre o eixo e o chassi do veículo que ocorre quando o veículo passa por rodovias esburacadas. Com isso,

pode-se adotar que, em uma análise dinâmica, não existe variação do volume de ar dentro da bolsa e conseqüentemente se comporta como um sistema fechado. Em uma análise dinâmica, o ar é continuamente comprimido e expandido a taxas que correspondem às frequências naturais do veículo (HEDRIEK, YI, 1991).

Para aplicações em caminhões pesados, a suspensão pneumática pode ser constituída por duas ou quatro bolsas pneumáticas em cada eixo. A mais comumente utilizada é a de duas bolsas pelo seu reduzido custo comparado a de quatro bolsas. Na figura 6 é mostrado o esquema da suspensão com duas e quatro bolsas pneumáticas.

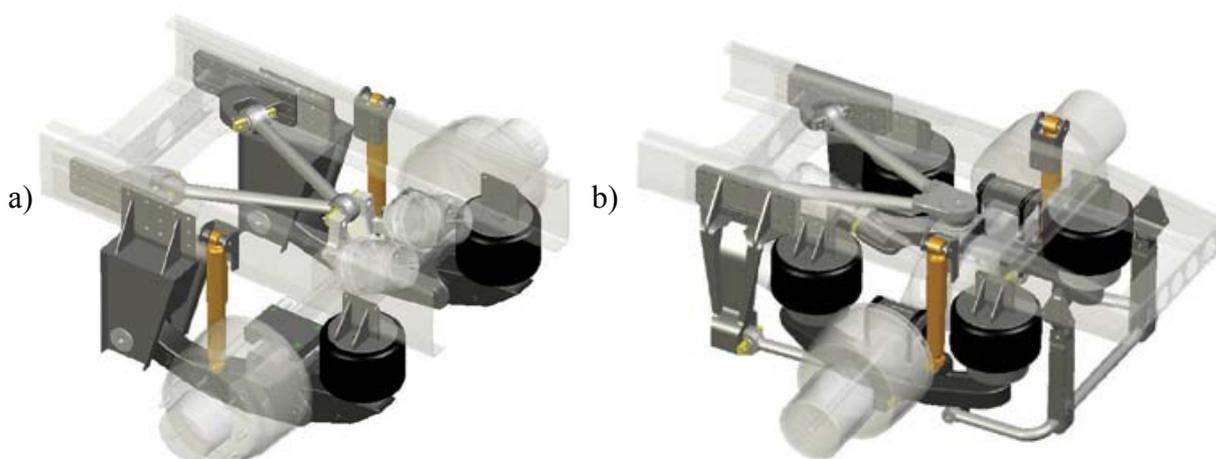


Figura 6: Esquema da suspensão pneumática. a) Conjunto com duas bolsas pneumáticas. b) Conjunto com quatro bolsas pneumáticas.

Fonte: Shanghai Komman Vehicle Component Systems, 2009

O formato da bolsa pneumática afeta diretamente o comportamento do ar que está no seu interior, o que está relacionado com a eficiência da mola. O formato da bolsa determina, a uma dada pressão, a força que a mola aplica e também igualmente importante, a mudança que ocorre na força com a mudança do volume da bolsa.

A rigidez axial da mola pneumática é inversamente proporcional ao volume da bolsa. A mola se torna menos rígida com o aumento do volume da bolsa (PRESTHUS, 2002).

As características da mola dependem da área efetiva (área efetivamente transmitindo força ao elemento suspenso), do volume da bolsa, da pressão atmosférica agindo nas paredes externas da bolsa e da dureza, da espessura da borracha e do tipo de encordoamento da bolsa.

A maioria das bolsas pneumáticas aplicadas a caminhões pesados, apresenta um formato construtivo que faz com que as deformações axiais da bolsa minimizem as

deformações radiais, ou seja, minimizem as deformações elásticas da borracha e priorizem o efeito elástico da compressibilidade do ar.

Termodinamicamente, quando o volume da bolsa é reduzido, durante o processo de compressão, o choque das partículas do ar, mais compactadas promove não só o aumento da pressão, mas também o aumento da energia interna das partículas, ou seja, aumento da temperatura.

A pressão do gás dentro da bolsa varia com a velocidade e a magnitude da deflexão da bolsa. Assim, para uma determinada deflexão, a pressão e, portanto a rigidez da mola será diferente para os seguintes processos: isotérmico, adiabático ou politrópico.

De maneira geral, a máxima rigidez da mola ocorre no processo isotérmico de compressão e a mínima rigidez no processo adiabático. O expoente politrópico varia entre o isotérmico e o adiabático, isto é, $1 < n < \gamma$ (PRESTHUS, 2002).

Se a mola é comprimida lentamente de maneira que todo o calor gerado pela compressão é dissipado, o processo é isotérmico e pode ser expresso pela fórmula:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (5)$$

Em que:

- P_1 = pressão absoluta inicial [Pa]
- P_2 = pressão absoluta final [Pa]
- V_1 = volume inicial [m^3]
- V_2 = volume final [m^3]

Em condições reais de operação, o processo isotérmico na compressão da bolsa é praticamente impossível, visto que dada a alta velocidade no processo de compressão da bolsa a troca de calor com o meio externo é desprezível. Nesse sentido, se torna razoável considerar as transformações do ar dentro da bolsa como um processo adiabático, que pode ser expresso por:

$$P.V^\gamma = \lambda \quad (6)$$

O valor do expoente γ varia de acordo com o gás e é dado por:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad (7)$$

Em que:

- C_P = calor específico do gás a pressão constante [J/(kg K)]
- C_V = calor específico do gás a volume constante [J/(kg K)]

E para gases diatômicos como o ar vale 1,4.

Considerando uma determinada bolsa de ar com volume inicial (V_0) sujeita a uma determinada força externa (F_0) aplicada na superfície de área efetiva A_s , pode-se definir a pressão interna por:

$$P_0 = \frac{F_0}{A_s} \quad (8)$$

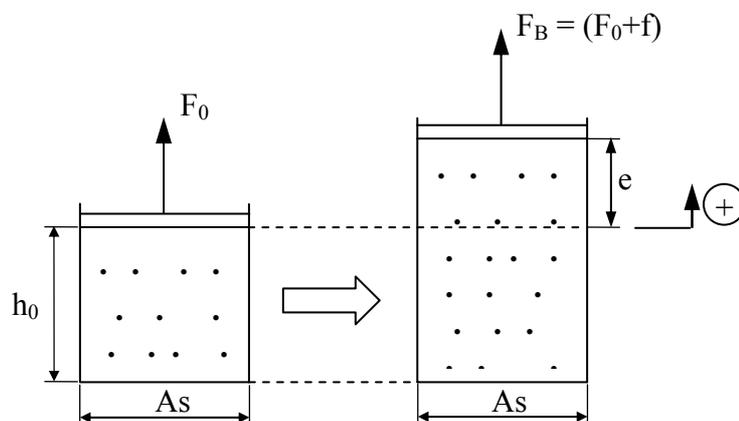


Figura 7: Desenho esquemático da definição da pressão interna do bolsão.

E considerando que o volume inicial (V_0) pode ser definido como:

$$V_0 = A_s \cdot h_0 \quad (9)$$

Substituindo as expressões (8) e (9) em (6), têm-se a constante λ definida por:

$$\lambda = F_0 \cdot A_s^{\gamma-1} \cdot h_0^\gamma \quad (10)$$

Variando a altura da bolsa, têm-se abaixo expressa a equação que resulta a variação da força aplicada no bolsão:

$$\frac{F_B}{A_S} \cdot (A_S \cdot (h_0 + e))^\gamma = \lambda = F_0 \cdot A_S^{\gamma-1} \cdot h_0^\gamma \quad (11)$$

$$F_B = \frac{F_0 \cdot h_0^\gamma}{(h_0 + e)^\gamma} = F_0 + f \quad (12)$$

$$f(e) = F_0 \cdot \left(\frac{h_0^\gamma}{(h_0 + e)^\gamma} - 1 \right) \quad (13)$$

2.1.3 Amortecedor

Em um veículo em movimento, parte da energia vinda do pavimento, em vez de ser transmitida ao veículo, é dissipada na forma de calor através de um amortecedor. Essa conversão da energia cinética em calor é basicamente devido a passagem de um fluido viscoso através dos orifícios que comunicam as câmaras do amortecedor, separadas por um pistão móvel (SIMÕES, 2005).

A força no amortecedor está diretamente relacionada com as dimensões dos orifícios e a viscosidade do fluido, o qual determinará a facilidade com que o fluido passará pelos orifícios. Na figura 8 é apresentado um esquema básico de um amortecedor veicular na fase de tração e compressão.

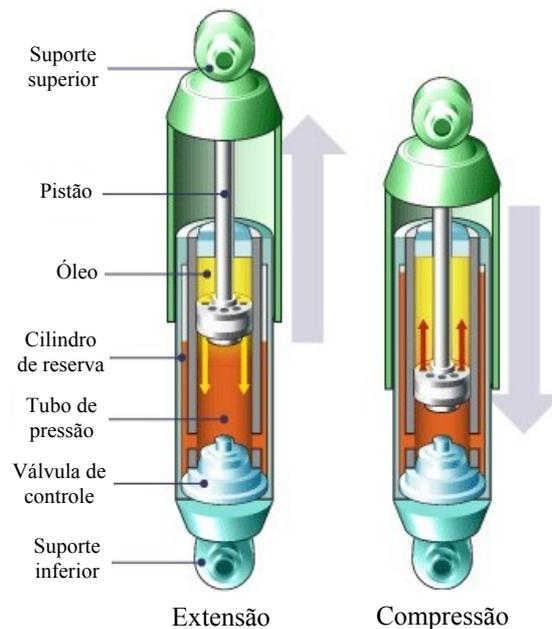


Figura 8: Esquema básico de um amortecedor veicular.
Fonte: Simões, 2005, p. 12

Analogamente à modelagem da mola, considerando um amortecedor que sofre a ação de uma força constante de intensidade F_A que se deforma com velocidade relativa v_A , define-se o coeficiente de amortecimento por:

$$C_A = \frac{F_A}{v_A} \quad (14)$$

O modelo linear do amortecimento se dá quando o coeficiente de amortecimento é constante, independente da velocidade relativa e as curvas características do amortecedor ficam qualitativamente iguais às curvas da mola linear.

Para melhor modelar o comportamento real dos amortecedores na dinâmica vertical do caminhão, é necessário considerar suas não linearidades. Existem várias fontes de não linearidade, uma delas que não será considerada nessa modelagem é a temperatura do fluido, já que com o passar do tempo a temperatura do fluido aumenta, alterando sua viscosidade e, conseqüentemente, seu comportamento. As duas principais não linearidades dos amortecedores consideradas na modelagem são:

- a. Comportamento assimétrico: Os amortecedores são projetados de forma que a força na fase de extensão seja maior que na fase de compressão, isso visa uma melhor estabilidade e conforto para o sistema (RAJLINGHAM; RAKHEJA,

2003). Segue abaixo a expressão analítica que representa a não linearidade devido ao comportamento assimétrico do amortecedor.

$$F_A = \begin{cases} C_1 \cdot v_A & \text{para } v_A \leq 0 \\ C_2 \cdot v_A & \text{para } v_A > 0 \end{cases} \quad (15)$$

Isto considera que velocidades negativas significam compressão e positivas extensão. Na figura 9 são apresentadas as curvas características do amortecedor com comportamento assimétrico.

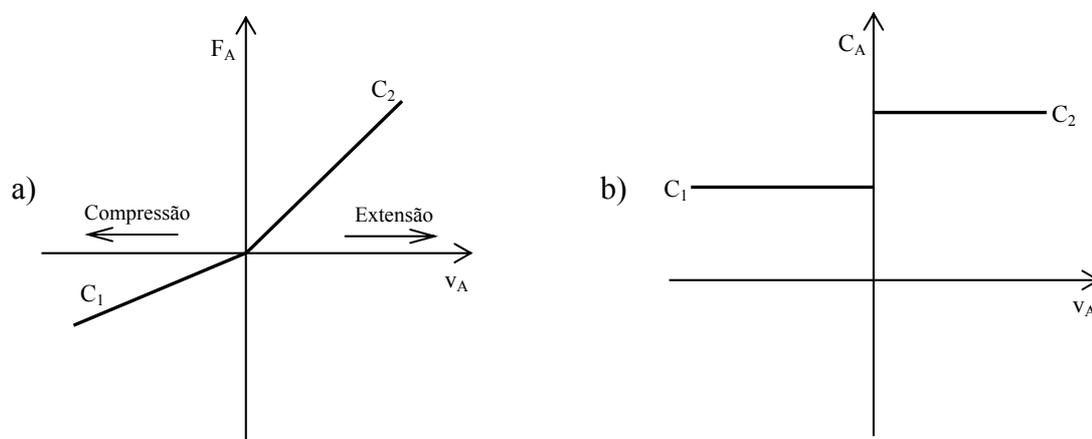


Figura 9: Gráfico característico do amortecedor com comportamento assimétrico. a) Gráfico Força x Velocidade. b) Gráfico Coeficiente de amortecimento x Velocidade.

Fonte: Rajalingham; Rakheja, 2003, p. 3

- b. Comportamento multifásico: Essa característica é desejável no intuito de melhor isolar as vibrações do sistema, com isso o coeficiente de amortecimento é menor para grandes velocidades do pistão (AHMED, RAKHEJA, 1992). Segue abaixo a expressão analítica que representa essa não linearidade.

$$F_A = \begin{cases} C_1 \cdot v_A & \text{para } v_A > 0 \text{ e } v_A \leq \alpha_1 \\ (C_1 \cdot v_A) + C_2 \cdot (v_A - \alpha_1) & \text{para } v_A > \alpha_1 \\ C_3 \cdot v_A & \text{para } v_A \leq 0 \text{ e } v_A > \alpha_2 \\ ((C_3 \cdot v_A) + C_4 \cdot (v_A - \alpha_2)) & \text{para } v_A \leq \alpha_2 \end{cases} \quad (16)$$

Nota-se que se $C_1 = C_2$ e $C_3 = C_4$ o modelo fica igual ao modelo do amortecedor só com comportamento assimétrico. E ainda mais se $C_1 = C_2 = C_3 = C_4$ o modelo fica igual ao modelo com comportamento linear. A figura 10 mostra a curva do amortecedor com comportamento multifásico e assimétrico.

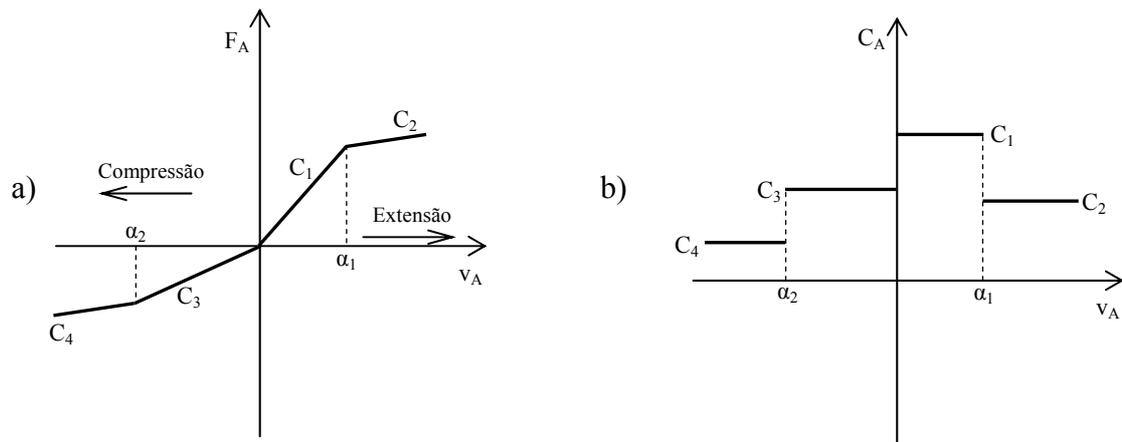


Figura 10: Gráfico característico do amortecedor com comportamento assimétrico e multifásico. a) Gráfico Força x Velocidade. b) Gráfico Coeficiente de amortecimento x Velocidade.

Fonte: Ahmed; Rakheja, 1992, p. 1

2.1.4 Pneu

Pneu é usualmente definido como sendo uma estrutura flexível de forma toroidal com ar comprimido dentro. Suportar o peso do veículo e absorver as irregularidades da pista são duas das funções básicas de um pneu. Quando aplicada carga em um pneu inflado, o pneu deflete progressivamente de acordo com o aumento da carga. (CLARK, 1981)

Em simulações de dinâmica vertical de veículos, as características dinâmicas do pneu podem ser representadas por vários tipos de modelos mecânicos. A figura 11 apresenta alguns desses modelos em ordem de complexidade, da esquerda para a direita (KIRSTEIN, 2005).

- Modelo com um ponto de contato (uma mola e um amortecedor em paralelo);
- Modelo de contato rolado (roda rígida com uma mola, um amortecedor e um ponto de contato);
- Modelo com rastro fixo (rigidez e amortecimento linearmente distribuídos na área de contato);

- d. Modelo com várias molas radiais (molas lineares distribuídas uniformemente ao longo do raio);
- e. Modelo de anel flexível;
- f. Modelo de elementos finitos.

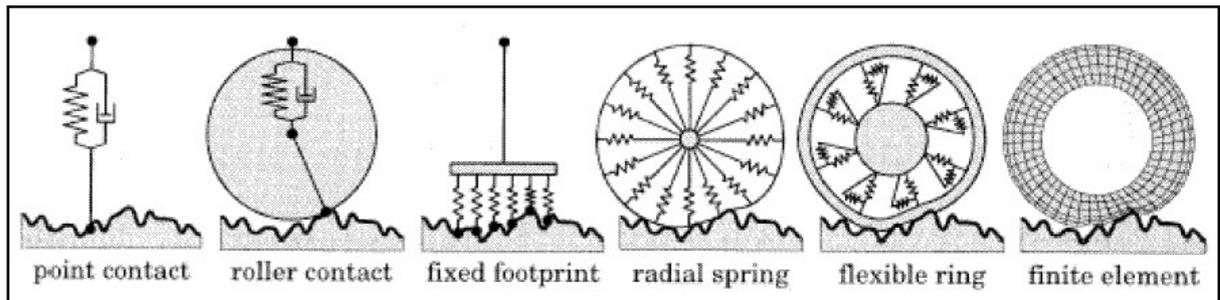


Figura 11: Modelos matemáticos de pneu.
Fonte: Kistein, 2005, p. 8

Segundo Clark (1981) o modelo mais comumente utilizado e simples que representa o modo de vibrar de pneu é o modelo Voigt-Kevin (uma mola e um amortecedor em paralelo) que é apresentado na figura 12 (a). Kising e Gohlich (1989) demonstraram que o modelo Voigt-Kevin representa satisfatoriamente a dinâmica vertical de pneus. Outro modelo com amortecimento visco-elástico também é utilizado e apresentado na figura 12 (b).

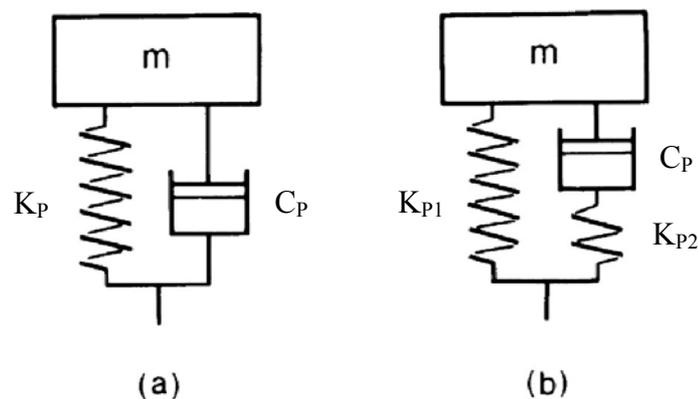


Figura 12: Modelos de pneus. a) Modelo Voigt-Kevin com mola e amortecedor em paralelo. b) Modelo Voigt-Kevin com amortecedor visco-elástico.

Fonte: Clark, 1981, p. 77

Neste trabalho utiliza-se o modelo Voigt-Kevin (uma mola e um amortecedor em paralelo com um ponto de contato) para modelar o comportamento dos pneus na simulação da dinâmica vertical do caminhão, o qual é usualmente utilizado por vários autores (HEDRIEK, YI, 1991; GILLESPIE et al, 1992; CEBON, 1996).

2.2 Modelo mecânico da dinâmica vertical do caminhão

Nesta seção são apresentados os modelos mecânicos da dinâmica vertical do caminhão. São apresentados três modelos de caminhões: Modelo 1 - caminhão com suspensões dianteira e traseira metálica com feixe molas e amortecedores com comportamento linear; Modelo 2 - caminhão com suspensões dianteira e traseira metálica com feixe molas e amortecedores com comportamento não linear e Modelo 3 - caminhão com suspensão dianteira metálica com feixe molas, suspensão traseira pneumática e amortecedores com comportamento não linear. A figura 13 ilustra o modelo mecânico da dinâmica vertical do caminhão detalhado em três corpos rígidos e nos componentes que interagem entre esses corpos.

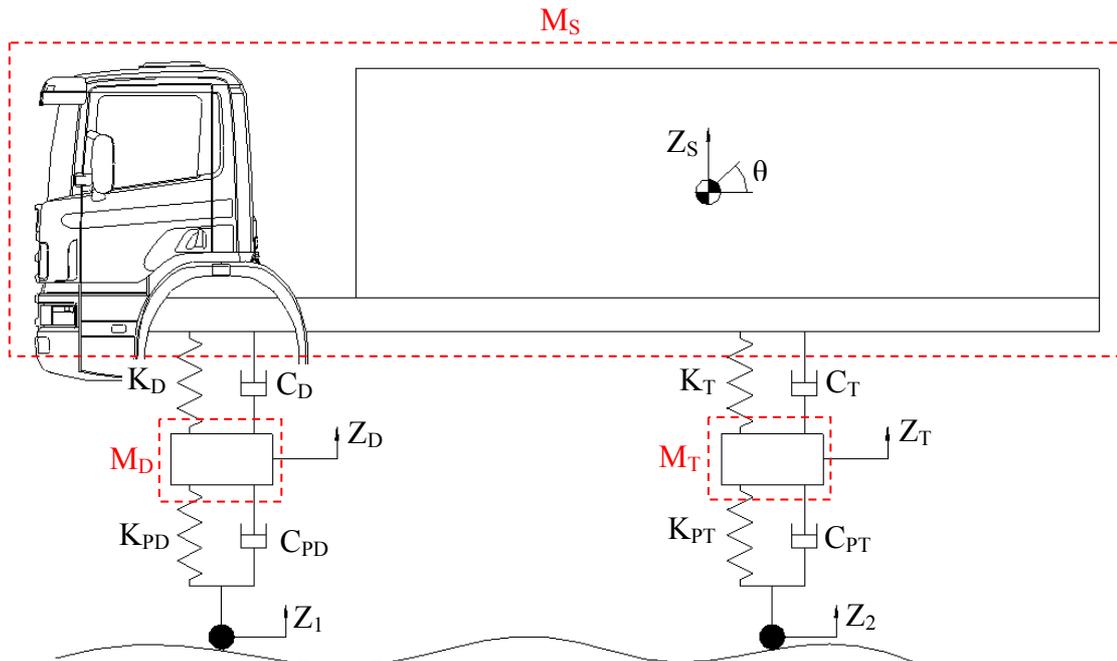


Figura 13: Modelo de Caminhão com suspensões dianteira e traseira metálica com feixe de molas.

Em que:

- M_S = massa suspensa
- M_D = massa não suspensa dianteira
- M_T = massa não suspensa traseira
- Z_S = deslocamento vertical da massa suspensa
- θ = deslocamento angular da massa suspensa
- Z_D = deslocamento vertical da massa não suspensa dianteira
- Z_T = deslocamento vertical da massa não suspensa traseira
- K_D = rigidez da mola dianteira
- C_D = coeficiente de amortecimento do amortecedor dianteiro
- K_T = rigidez da mola traseira
- C_T = coeficiente de amortecimento do amortecedor traseiro

- K_{PD} = rigidez da mola do pneu dianteiro
- C_{PD} = coeficiente de amortecimento do amortecedor do pneu dianteiro
- K_{PT} = rigidez da mola do pneu traseiro
- C_{PT} = coeficiente de amortecimento do amortecedor do pneu traseiro
- I_S = momento de inércia em relação ao eixo transversal do caminhão
- Z_{SD} = deslocamento vertical da massa suspensa no eixo dianteiro
- Z_{ST} = deslocamento vertical da massa suspensa no eixo traseiro
- Z_1 = deslocamento vertical da pista no eixo dianteiro
- Z_2 = deslocamento vertical da pista no eixo traseiro

2.2.1 Modelo 1 - Caminhão com suspensões dianteira e traseira metálica com feixe de molas e comportamento linear dos amortecedores.

Para estudo do modelo 1 do caminhão com suspensões de feixe de molas, as seguintes considerações são definidas:

- a. Rigidez das molas dianteiras e traseiras têm comportamento linear;
- b. Coeficiente de amortecimento dos amortecedores dianteiros e traseiros é ideal com amortecimento constante (linear);
- c. A massa suspensa é assumida como rígida e a flexibilidade do chassis desconsiderada.

Para obtenção do modelo mecânico da dinâmica vertical do sistema utiliza-se a segunda lei de Newton, aplicada para cada uma das massas. Segue abaixo a análise do

diagrama de corpo livre para cada uma das massas. Esse análise será utilizada para todos os modelos estudados.

- Massa suspensa (M_S)

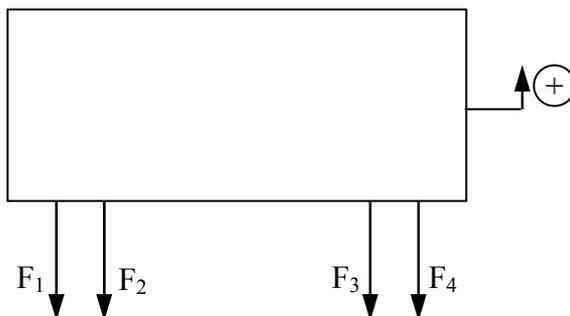


Figura 14: Diagrama de corpo livre da massa suspensa.

Equação: $\sum \text{Forças} = M_S \cdot \ddot{Z}_S$

$$-F_1 - F_2 - F_3 - F_4 = M_S \cdot \ddot{Z}_S \quad (17)$$

Em que:

- F_1 = força da mola no eixo dianteiro
- F_2 = força do amortecedor no eixo dianteiro
- F_3 = força da mola no eixo traseiro
- F_4 = força do amortecedor no eixo traseiro

Para o modelo com molas e amortecedores lineares e utilizando as equações (1) e (14) como referência, têm-se as forças na massa suspensa definidas por:

$$F_1 = K_D \cdot (Z_{SD} - Z_D) \quad (18)$$

$$F_2 = C_D \cdot (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) \quad (19)$$

$$F_3 = K_T \cdot (Z_{ST} - Z_T) \quad (20)$$

$$F_4 = C_T \cdot (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) \quad (21)$$

Substituindo equações (18), (19), (20) e (21) em (17) têm-se:

$$M_S \cdot \ddot{Z}_S = -K_D \cdot (Z_{SD} - Z_D) - C_D \cdot (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_T \cdot (Z_{ST} - Z_T) - C_T \cdot (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) \quad (22)$$

Equação: $\Sigma \text{Momentos} = I_S \cdot \ddot{\theta}_S$

$$(F_1 + F_2) \cdot a - (F_3 + F_4) \cdot b = I_S \cdot \ddot{\theta}_S \quad (23)$$

Substituindo equações (18), (19), (20) e (21) em (23) têm-se:

$$I_S \cdot \ddot{\theta}_S = (K_D \cdot (Z_{SD} - Z_D) + C_D \cdot (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D)) \cdot a - (K_T \cdot (Z_{ST} - Z_T) + C_T \cdot (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T)) \cdot b \quad (24)$$

- Massa não suspensa dianteira (M_D)

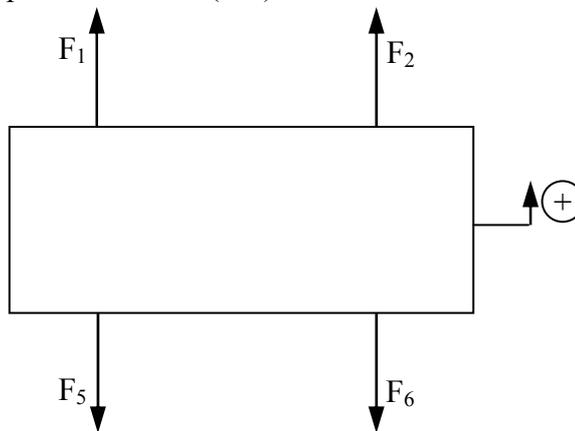


Figura 15: Diagrama de corpo livre da massa não suspensa dianteira.

Equação: $\Sigma \text{Forças} = M_D \cdot \ddot{Z}_D$

$$F_1 + F_2 - F_5 - F_6 = M_D \cdot \ddot{Z}_D \quad (25)$$

Em que:

- F_5 = força da mola do pneu no eixo dianteiro
- F_6 = força do amortecedor do pneu no eixo dianteiro

Para o modelo com molas e amortecedores lineares e utilizando as equações (1) e (14) como referência, têm-se as forças na massa não suspensa dianteira definidas por:

$$F_5 = K_{PD} \cdot (Z_D - Z_{PD}) \quad (26)$$

$$F_6 = C_{PD} \cdot (\dot{Z}_D - \dot{Z}_{PD}) \quad (27)$$

Substituindo equações (18), (19), (26) e (27) em (25) têm-se:

$$M_D \cdot \ddot{Z}_D = K_D \cdot (Z_{SD} - Z_D) + C_D \cdot (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_{PD} \cdot (Z_D - Z_1) - C_{PD} \cdot (\dot{Z}_D - \dot{Z}_1) \quad (28)$$

- Massa não suspensa traseira (M_T)

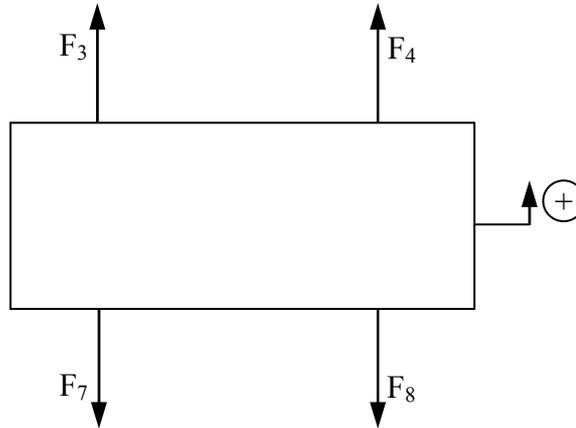


Figura 16: Diagrama de corpo livre da massa não suspensa traseira.

Equação: $\sum \text{Forças} = M_T \cdot \ddot{Z}_T$

$$F_3 + F_4 - F_7 - F_8 = M_T \cdot \ddot{Z}_T \quad (29)$$

Em que:

- F_7 = força da mola do pneu no eixo traseiro
- F_8 = força do amortecedor do pneu no eixo traseiro

Para o modelo com molas e amortecedores lineares e utilizando as equações (1) e (14) como referência, têm-se as forças na massa não suspensa traseira definidas por:

$$F_7 = K_{PT} \cdot (Z_T - Z_2) \quad (30)$$

$$F_8 = C_{PT} \cdot (\dot{Z}_T - \dot{Z}_2) \quad (31)$$

Substituindo equações (20), (21), (30) e (31) em (29) têm-se:

$$M_T \cdot \ddot{Z}_T = K_T \cdot (Z_{ST} - Z_T) + C_T \cdot (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) - K_{PT} \cdot (Z_T - Z_2) - C_{PT} \cdot (\dot{Z}_T - \dot{Z}_2) \quad (32)$$

Agrupando as equações (22), (24), (28) e (32) têm-se o sistema de equações diferenciais que descrevem a dinâmica vertical do caminhão do Modelo 1:

$$\begin{cases} M_S \ddot{Z}_S = -K_D \cdot (Z_{SD} - Z_D) - C_D \cdot (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_T \cdot (Z_{ST} - Z_T) - C_T \cdot (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) \\ I_S \ddot{\theta}_S = \left(-K_D \cdot (Z_{SD} - Z_D) - C_D \cdot (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) \right) a - \left(K_T \cdot (Z_{ST} - Z_T) - C_T \cdot (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) \right) b \\ M_D \ddot{Z}_D = K_D \cdot (Z_{SD} - Z_D) + C_D \cdot (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_{PD} \cdot (Z_D - Z_1) - C_{PD} \cdot (\dot{Z}_D - \dot{Z}_1) \\ M_T \ddot{Z}_T = K_T \cdot (Z_{ST} - Z_T) + C_T \cdot (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) - K_{PT} \cdot (Z_T - Z_2) - C_{PT} \cdot (\dot{Z}_T - \dot{Z}_2) \end{cases} \quad (33)$$

Em que:

$$\begin{cases} Z_{SD} = Z_S - \theta \cdot a \\ Z_{ST} = Z_S + \theta \cdot b \end{cases} \quad (34)$$

O sistema de equações pode ser escrito na forma de Espaço de Estados por:

$$\begin{cases} \dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \\ Y = C \cdot X + D \cdot U \end{cases} \quad (35)$$

Em que:

- A = matriz da planta do sistema;
- B = matriz de entrada;
- C = matriz de saída;
- D = matriz de alimentação direta;
- X = vetor de estado;
- Y = vetor de saídas;
- U = vetor de entradas.

Definem-se as variáveis de estado como:

- $X_1 = Z_S$ (posição vertical da massa suspensa);
- $X_2 = \dot{Z}_S$ (velocidade vertical da massa suspensa);
- $X_3 = \theta_S$ (posição angular da massa suspensa);
- $X_4 = \dot{\theta}_S$ (velocidade angular da massa suspensa);

- $X_5 = Z_D$ (posição vertical da massa não suspensa dianteira);
- $X_6 = \dot{Z}_D$ (velocidade vertical da massa não suspensa dianteira);
- $X_7 = Z_T$ (posição vertical da massa não suspensa traseira);
- $X_8 = \dot{Z}_T$ (velocidade vertical da massa não suspensa traseira).

De acordo com o modelo estudado, as entradas do sistema são definidas como:

- Entrada 1 (U_1) = posição vertical da pista no pneu dianteiro (Z_1);
- Entrada 2 (U_2) = velocidade vertical da pista no pneu dianteiro (\dot{Z}_1);
- Entrada 3 (U_3) = posição vertical da pista no pneu traseiro (Z_2);
- Entrada 4 (U_4) = velocidade vertical da pista no pneu traseiro (\dot{Z}_2).

E as saídas do sistema são definidas a fim de analisar a dinâmica vertical do caminhão e as forças no pneu dianteiro e no pneu traseiro:

- Saída 1: Deslocamento vertical da massa suspensa

$$Y_1 = X_1 \quad (36)$$

- Saída 2: Deslocamento vertical da massa não suspensa dianteira

$$Y_2 = X_5 \quad (37)$$

- Saída 3: Deslocamento vertical da massa não suspensa traseira

$$Y_3 = X_7 \quad (38)$$

- Saída 4: Força no pneu dianteiro

$$Y_4 = C_{PD} \cdot (\dot{Z}_D - \dot{Z}_{PD}) + K_{PD} \cdot (Z_D - Z_{PD}) \quad (39)$$

$$Y_4 = K_{PD} \cdot X_5 + C_{PD} \cdot X_6 - K_{PD} \cdot Z_1 - C_{PD} \cdot \dot{Z}_1 \quad (40)$$

- Saída 5: Força no pneu traseiro

$$Y_5 = C_{PT} \cdot (\dot{Z}_T - \dot{Z}_{PT}) + K_{PT} \cdot (Z_T - Z_{PT}) \quad (41)$$

$$Y_5 = K_{PT} \cdot X_7 + C_{PT} \cdot X_8 - K_{PT} \cdot Z_2 - C_{PT} \cdot \dot{Z}_2 \quad (42)$$

Colocando na forma de Espaço de Estados têm-se definidas as matrizes A, B, C e D por:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\left(\frac{K_D + K_T}{M_S}\right) & -\left(\frac{C_D + C_T}{M_S}\right) & \left(\frac{K_D a - K_T b}{M_S}\right) & \left(\frac{C_D a - C_T b}{M_S}\right) & \left(\frac{K_D}{M_S}\right) & \left(\frac{C_D}{M_S}\right) & \left(\frac{K_T}{M_S}\right) & \left(\frac{C_T}{M_S}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{K_D a - K_T b}{I_S}\right) & \left(\frac{C_D a - C_T b}{I_S}\right) & -\left(\frac{K_D a^2 + K_T b^2}{I_S}\right) & -\left(\frac{C_D a^2 + C_T b^2}{I_S}\right) & -\left(\frac{K_D a}{I_S}\right) & -\left(\frac{C_D a}{I_S}\right) & \left(\frac{K_T b}{I_S}\right) & \left(\frac{C_T b}{I_S}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \left(\frac{K_D}{M_D}\right) & \left(\frac{C_D}{M_D}\right) & -\left(\frac{K_D a}{M_D}\right) & -\left(\frac{C_D a}{M_D}\right) & -\left(\frac{K_D + K_{PD}}{M_D}\right) & -\left(\frac{C_D + C_{PD}}{M_D}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{K_T}{M_T}\right) & \left(\frac{C_T}{M_T}\right) & \left(\frac{K_T b}{M_T}\right) & \left(\frac{C_T b}{M_T}\right) & 0 & 0 & -\left(\frac{K_T + K_{PT}}{M_T}\right) & -\left(\frac{C_T + C_{PT}}{M_T}\right) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{K_{PD}}{M_D}\right) & \left(\frac{C_{PD}}{M_D}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{K_{PT}}{M_T}\right) & \left(\frac{C_{PT}}{M_T}\right) \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{PD} & C_{PD} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{PT} & C_{PT} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{PD} & -C_{PD} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{PT} & -C_{PT} \end{bmatrix}$$

2.2.2 Modelo 2 - Caminhão com suspensões dianteira e traseira metálica com feixe de molas e comportamento não linear dos amortecedores.

Para estudo do modelo 2 do caminhão serão consideradas as mesmas definições do modelo 1, porém com inclusão da não linearidades provenientes dos amortecedores. Utiliza-se a mesma análise do diagrama de corpo livre da seção anterior, alterando a expressão da força no amortecedor. Seguem abaixo as análises de cada massa considerando a não linearidade dos amortecedores.

- Massa suspensa (M_S)

Utilizam-se as equações (18) e (20) na análise do diagrama de corpo livre do modelo 1 e alterando as equações (19) e (21) para considerar as não linearidades, têm-se o coeficiente de amortecimento referenciado conforme equação (16) e as forças no amortecedor definidas por:

$$F_2 = C_D (\dot{Z}_D) (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) \quad (43)$$

$$F_4 = C_T (\dot{Z}_T) (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) \quad (44)$$

Substituindo equações (18), (43), (20) e (44) em (17) têm-se:

$$M_S \ddot{Z}_S = -K_D (Z_{SD} - Z_D) - C_D (\dot{Z}_D) (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_T (Z_{ST} - Z_T) - C_T (\dot{Z}_T) (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) \quad (45)$$

E substituindo equações (18), (43), (20) e (44) em (23) têm-se:

$$I_S \ddot{\theta}_S = -(K_D (Z_{SD} - Z_D) + C_D (\dot{Z}_D) (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D))a - (K_T (Z_{ST} - Z_T) + C_T (\dot{Z}_T) (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T))b \quad (46)$$

- Massa não suspensa dianteira (M_D)

Utiliza-se a equação (25) na análise do diagrama de corpo do modelo 1 e utilizando a equação (43) já considerado as não linearidades no amortecedor e substituindo equações (18), (43), (26) e (27) em (25) têm-se:

$$M_D \ddot{Z}_D = K_D (Z_{SD} - Z_D) + C_D (\dot{Z}_D) (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_{PD} (Z_D - Z_I) - C_{PD} (\dot{Z}_D - \dot{Z}_I) \quad (47)$$

- Massa não suspensa traseira (M_T)

Utiliza-se a equação (29) na análise do diagrama de corpo e utilizando a equação (44) já considerado as não linearidades no amortecedor e substituindo equações (19), (44), (30) e (31) em (29) têm-se:

$$M_T \cdot \ddot{Z}_T = K_T \cdot (Z_{ST} - Z_T) + C_T (\dot{Z}_T) (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) - K_{PT} \cdot (Z_T - Z_2) - C_{PT} \cdot (\dot{Z}_T - \dot{Z}_2) \quad (48)$$

Agrupando as equações (45), (46), (47) e (48) têm-se o sistema de equações diferenciais que descrevem a dinâmica vertical do caminhão do Modelo 2 considerando as não linearidades dos amortecedores:

$$\begin{cases} M_S \cdot \ddot{Z}_S = -K_D \cdot (Z_{SD} - Z_D) - C_D (\dot{Z}_D) (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_T \cdot (Z_{ST} - Z_T) - C_T (\dot{Z}_T) (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) \\ I_S \cdot \ddot{\theta}_S = -(K_D (Z_{SD} - Z_D) + C_D (\dot{Z}_D) (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D))a - (K_T (Z_{ST} - Z_T) + C_T (\dot{Z}_T) (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T))b \\ M_D \cdot \ddot{Z}_D = K_D \cdot (Z_{SD} - Z_D) + C_D (\dot{Z}_D) (\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_{PD} \cdot (Z_D - Z_1) - C_{PD} \cdot (\dot{Z}_D - \dot{Z}_1) \\ M_T \cdot \ddot{Z}_T = K_T \cdot (Z_{ST} - Z_T) + C_T (\dot{Z}_T) (\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) - K_{PT} \cdot (Z_T - Z_2) - C_{PT} \cdot (\dot{Z}_T - \dot{Z}_2) \end{cases} \quad (49)$$

Em que:

$$\begin{cases} Z_{SD} = Z_S - \theta \cdot a \\ Z_{ST} = Z_S + \theta \cdot b \end{cases} \quad (34)$$

2.2.3 Modelo 3 - Caminhão com suspensão dianteira metálica com feixe de molas e traseira pneumática

Para análise do modelo 3 do caminhão com suspensão traseira pneumática e considerando comportamento não linear dos amortecedores, utiliza-se a mesma análise do diagrama de corpo livre utilizadas nos modelos 1 e 2, alterando a expressão da força no mola traseira (pneumática) conforme equação (12) que pode ser expressa por:

$$F_3 = -K_T(Z_T)(Z_{ST} - Z_T) \quad (50)$$

Seguem abaixo as análises do diagrama de corpo livre para cada massa para o modelo 3.

- Massa suspensa (M_S)

Utiliza-se a mesma análise do modelo 3 e utilizando a equação (50) para a força na mola pneumática traseira nas equações (17) e (23), têm-se as equações para a massa suspensa definidas por:

$$M_S \ddot{Z}_S = -K_D(Z_{SD} - Z_D) - C_D(\dot{Z}_D)(\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_T(Z_T)(Z_{ST} - Z_T) - C_T(\dot{Z}_T)(\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) \quad (51)$$

$$I_S \ddot{\theta}_S = -(K_D(Z_{SD} - Z_D) + C_D(\dot{Z}_D)(\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D))a - (K_T(Z_T)(Z_{ST} - Z_T) + C_T(\dot{Z}_T)(\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T))b \quad (52)$$

- Massa não suspensa dianteira (M_D)

Utiliza-se a mesma análise do modelo 2, resultando na equação (47):

$$M_D \ddot{Z}_D = K_D(Z_{SD} - Z_D) + C_D(\dot{Z}_D)(\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_{PD}(Z_D - Z_1) - C_{PD}(\dot{Z}_D - \dot{Z}_1) \quad (47)$$

- Massa não suspensa traseira (M_T)

Utiliza-se a equação (29) na análise do diagrama de corpo livre com a equação (50) da força na mola pneumática traseira, têm-se a equação da massa não suspensa traseira definida por:

$$M_T \ddot{Z}_T = K_T(Z_T)(Z_{ST} - Z_T) + C_T(\dot{Z}_T)(\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) - K_{PT}(Z_T - Z_2) - C_{PT}(\dot{Z}_T - \dot{Z}_2) \quad (53)$$

Agrupando as equações (51), (52), (47) e (53) têm-se o sistema de equações diferenciais que descrevem a dinâmica vertical do caminhão do modelo 3 considerando as não linearidades dos amortecedores e a suspensão traseira pneumática:

$$\begin{cases}
M_S \ddot{Z}_S = -K_D(Z_{SD} - Z_D) - C_D(\dot{Z}_D)(\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_T(Z_T)(Z_{ST} - Z_T) - C_T(\dot{Z}_T)(\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) \\
I_S \ddot{\theta}_S = -(K_D(Z_{SD} - Z_D) + C_D(\dot{Z}_D)(\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D))a - (K_T(Z_{ST} - Z_T) + C_T(\dot{Z}_T)(\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T))b \\
M_D \ddot{Z}_D = K_D(Z_{SD} - Z_D) + C_D(\dot{Z}_D)(\dot{Z}_{SD} - \dot{Z}_D) - K_{PD}(Z_D - Z_1) - C_{PD}(\dot{Z}_D - \dot{Z}_1) \\
M_T \ddot{Z}_T = K_T(Z_T)(Z_{ST} - Z_T) + C_T(\dot{Z}_T)(\dot{Z}_{ST} - \dot{Z}_T) - K_{PT}(Z_T - Z_2) - C_{PT}(\dot{Z}_T - \dot{Z}_2)
\end{cases} \quad (54)$$

Em que:

$$\begin{cases}
Z_{SD} = Z_S - \theta.a \\
Z_{ST} = Z_S + \theta.b
\end{cases} \quad (34)$$

3 A MECÂNICA DO PAVIMENTO

Neste capítulo, é apresentada a mecânica dos pavimentos, detalhando o método utilizado para prever o desempenho de pavimentos flexíveis. O capítulo foi dividido em duas partes: na primeira, apresenta-se a resposta do pavimento às forças aplicadas pelo caminhão e o método utilizado para calcular as tensões e deformações no pavimento. Na segunda parte, descrevem-se os dois principais tipos de degradações causadas nos pavimentos flexíveis e os modelos mecanístico-empíricos de previsão do desempenho desses pavimentos.

3.1 Pavimento

Pavimento é definido como toda estrutura apoiada sobre a camada final de terraplenagem e destinada a receber o tráfego, fornecendo ao usuário segurança e conforto. Define-se também como sendo a estrutura que se sobrepõe ao solo local ou transportado devidamente compactado ou sobre tabuleiros de pontes e de viadutos. Essa estrutura é constituída de várias camadas de espessuras finitas, com vários materiais de diferentes características de resistência e deformabilidade, que se assentam sobre um semi-espaço infinito e exercem a função de fundação da estrutura, chamado de subleito. Essa estrutura assim constituída apresenta um elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo das tensões e deformações.

A norma brasileira de pavimentação, NBR 7207/82 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1982, apud VIERA, 2002) define pavimento como:

“O pavimento é uma estrutura construída sobre a terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto, a:

- a. Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;

- b. Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c. Resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento”.

De acordo, ainda, com a NBR 7027/82:

“Subleito é o terreno de fundação do pavimento ou revestimento”.

“Sub-base é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem”.

“Base é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre a qual se constrói o revestimento”.

“Revestimento é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada econômica e simultaneamente a:

- a. Melhorar as condições do rolamento quanto a segurança e o conforto;
- b. Resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento;
- c. Reduzir as tensões verticais que as cargas de roda aplicam na camada base, de modo a controlar o acúmulo de deformações plásticas nessa camada”.

Segundo Medina (1997), Senço (1997) e Sá (2003), os pavimentos, de uma forma geral, podem ser classificados em duas categorias:

- a. Pavimento flexível: constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente, em que as deformações, até um certo limite, não levam ao rompimento. São dimensionados normalmente à compressão e à tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga. Normalmente são constituídos de revestimento betuminoso delgado sobre camadas puramente granulares. A capacidade de suporte é função das características de distribuição de cargas por um sistema de camadas

superpostas, onde as mais resistentes encontram-se na parte superior da estrutura. A figura 17 mostra esquematicamente as camadas constituintes de um pavimento flexível.

- b. Pavimento rígido: constituído por placas de concreto de cimento (raramente é armado) apoiadas sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária. São pouco deformáveis e quando sujeitos a deformações, se rompem por tração na flexão.

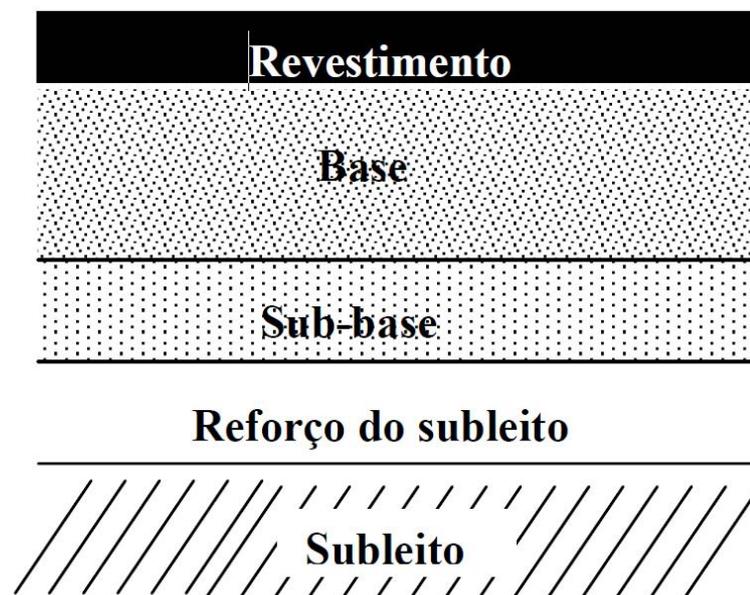


Figura 17: Seção típica de uma estrutura de pavimento flexível para subleito de baixa capacidade.

Fonte: Sá, 2003, p. 57

O revestimento é a camada mais solicitada, uma vez que está em contato direto com os pneus dos veículos, que produzem as tensões verticais e horizontais no pavimento, como mostra a figura 18.

Camadas granulares de base e sub-base tratadas com cimento ou com asfalto são componentes essenciais para o desempenho de pavimentos flexíveis. Sua função principal é a de reduzir as tensões provocadas pelas cargas repetidas do tráfego e transmiti-las ao subleito de maneira a minimizar a ocorrência de afundamento na trilha de roda (ATR). Além disso, as camadas granulares têm especial importância em pavimentos de baixo volume de tráfego onde a espessura do revestimento é pequena ou somente o revestimento superficial é utilizado (GONÇALVES, 1999).

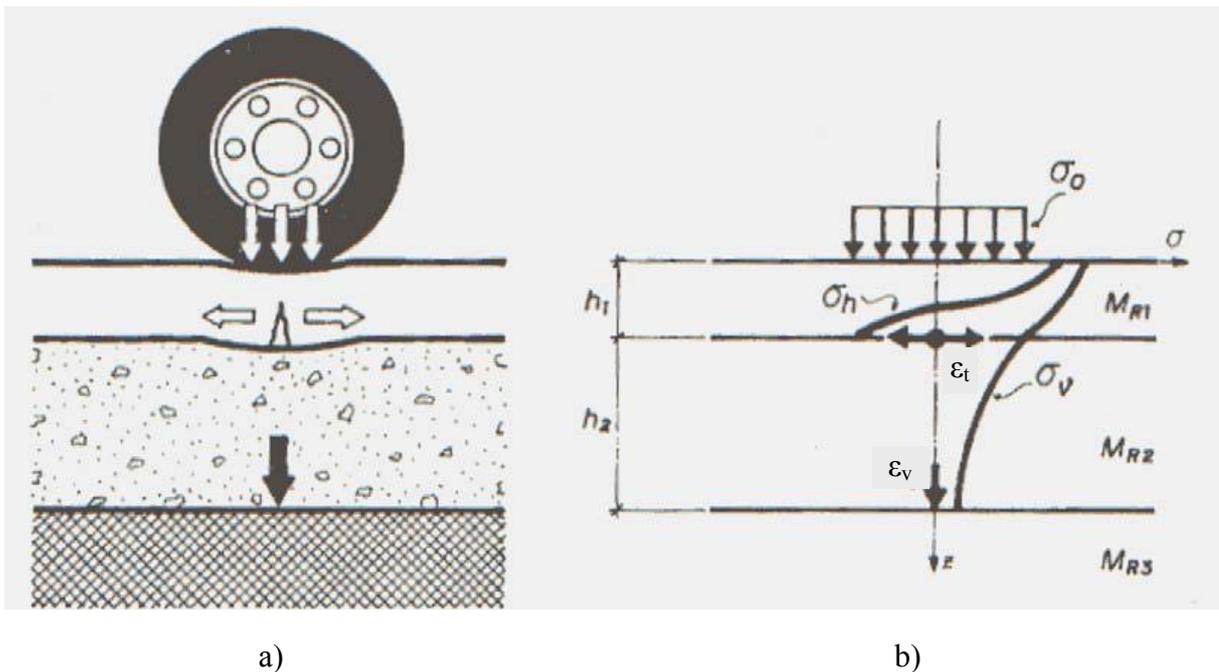


Figura 18: Tensões num pavimento flexível de espessura elevada de revestimento. a) Esquema básico das tensões no pavimento. b) Diagrama das tensões no pavimento.

Fonte: Medina, 1997, p. 7

Na figura 18 (b):

- σ_0 = tensão vertical de contato do pneu na superfície do pavimento;
- ϵ_v = deformação normal vertical no subleito;
- σ_h = tensão normal horizontal no revestimento;
- ϵ_t = deformação de tração nas fibras inferiores do revestimento.

Neste trabalho, o estudo específico é limitado ao pavimento flexível, que é o mais utilizado no Brasil.

3.2 Resposta estrutural do pavimento

Como visto na seção anterior, pavimentos flexíveis são sistemas de multicamadas compostos comumente por uma camada superficial (revestimento asfáltico) e subcamadas granulares. Para cálculo das tensões e deformações em sistemas multicamadas, soluções analíticas baseadas na Teoria da Elasticidade são largamente utilizadas. Para análises de casos complexos, soluções baseadas em métodos numéricos, principalmente no Método dos Elementos Finitos (MEF), foram desenvolvidos para a obtenção de soluções aproximadas. Uma vantagem da abordagem numérica é o uso de uma variedade de modelos constitutivos para representação do comportamento mecânico dos materiais, como elástico linear e não-linear, elasto-plástico, visco-elástico e visco-plástico (EVANGELISTA, 2006).

Soluções analíticas para sistemas de camadas elásticas têm sido usadas há muito tempo nas análises de pavimentos asfálticos. Boussinesq em 1885 formulou o conjunto de equações para o cálculo de tensões e deformações. Burmister em 1943 apresentou o método para determinar tensões e deformações em sistemas de duas camadas baseado no trabalho de Boussinesq e determinou soluções exatas para um carregamento circular uniformemente distribuído na superfície de um sistema de três camadas. Os modelos que utilizam a solução de Burmister resolvem problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e considerando, ainda, as seguintes hipóteses (EUA, 1994; MEDINA, 1997 apud Franco 2007):

- a. Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos; a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- b. As camadas têm pesos desprezíveis;
- c. As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- d. Todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- e. A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- f. Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;

- g. A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- h. A grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- i. As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

Nesse método, cada camada do pavimento se caracteriza por duas propriedades: o módulo de resiliência, normalmente associado ao módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν). Comumente utiliza-se o módulo de resiliência (M_R) como E , e é baseado na deformação recuperável sob carregamentos repetidos medidos em laboratório. (Evangelista, 2006; FRANCO, 2000).

Conforme Motta (1991), Rodrigues (SD), Ayres (1997) (apud FRANCO, 2000), o uso de modelo elástico linear para o cálculo da resposta do pavimento é amplamente utilizado devido aos seguintes motivos:

- a. É comum admitir-se um modelo elástico linear para as misturas betuminosas, para uma determinada temperatura;
- b. A teoria da elasticidade linear tem sido a base para a maior parte das aplicações práticas, podendo ser utilizada com um grau de confiança razoável, principalmente quando o pavimento possui espessas camadas asfálticas ou camadas cimentadas;
- c. Os parâmetros necessários para a análise podem ser facilmente obtidos com os recursos disponíveis em laboratórios de pavimentos existentes no Brasil.

Sabe-se que as misturas asfálticas, nas condições reais de operação, não são homogêneas e comportamento elástico linear torna-se inválido. Quase todos os materiais utilizados nas camadas de base e sub-base não são homogêneos, especialmente materiais granulares que são partículas da natureza. Quando expostas às tensões, materiais de pavimentação apresentam deformações elásticas, bem como um número de diferentes deformações, como viscosa e plástica. Uma vez que todas essas deformações são dependentes das tensões, os materiais comportam de uma maneira não-linear. Portanto, as respostas estruturais do pavimento, como tensões e deformações, podem ser mais precisamente previstas com comportamento visco elástico (HADI; BODHINAYAKE, 2003).

Atualmente métodos empíricos têm sido substituídos por métodos mecanísticos ou mecanístico-empíricos para o projeto de pavimentos. Esses métodos de dimensionamento fazem uso das respostas estruturais para calcular as tensões e deformações no pavimento e modelos mecanístico-empíricos para prever o desempenho do pavimento.

Os métodos empíricos são baseados em relações empíricas desenvolvidas para relacionar o desempenho dos pavimentos observados no campo e resultados de teste laboratoriais e outras variáveis, incluindo o tráfego, a carga e as condições climáticas. No entanto, modelos puramente empíricos sofrem por falta de exatidão e porque a validade dos dados, fora do intervalo que foi desenvolvido não é conhecida e com isso pode ser questionável. O foco sobre o método mecanístico-empírico se tornou essencial para a tecnologia de pavimentação devido a sua vantagem em ser mais preciso e prever de uma forma mais realista o desempenho de pavimentos (AL-KHATEEB et al, 2007).

O método mecanístico-empírico é basicamente dividido em duas partes: (a) análises mecanística relacionam à previsão de tensões e deformações das camadas do pavimento, devido ao carregamento mecânico na superfície, e (b) modelos empíricos que relacionam o cálculo da resposta estrutural aos dois tipos principais de degradações nos pavimentos por meio de modelos de desempenho. Por exemplo, as trincas por fadiga é comumente associado a deformação horizontal nas fibras inferiores da camada asfáltica, enquanto a deformação permanente é associada à tensão máxima de compressão no topo do subleito.

Com o auxílio da informática, diversos programas de computador têm sido desenvolvidos para o cálculo de tensões e deformações em estruturas de camadas elásticas. Destacam-se, dentre outros, os programas: BISAR, desenvolvido em 1978 pela Shell Oil, o ELSYM5, na Universidade da Califórnia; o ALIZE III, pelo Laboratoire Central des Ponts e Chaussées; o KENLAYER, pela Universidade de Kentucky, o JULEA, por Uzan em 1978; o MECAF3D e o FLAPS em 1991 por Rodrigues, além do FEPAVE, utilizado pela COPPE/UFRJ, desenvolvido na Universidade de Berkeley em 1968 (EVANGELISTA, 2006; FRANCO, 2000, 2007).

Dos programas disponíveis e de códigos abertos citam-se o FEPAVE, o ELSYM5 e o JULEA. Esse último foi liberado apenas para fazer parte do programa PAVE (FRANCO, 2000), como um trabalho acadêmico. Os programas JULEA e ELSYM5 utilizam o cálculo analítico com base na teoria de Burmister. Já o FEPAVE e o RIOPAVE utilizam o Método dos Elementos Finitos.

De acordo com Cebon (1999), no estudo da interação entre o veículo e o pavimento, a resposta do pavimento depende basicamente das seguintes características do sistema:

- a. Linearidade: Embora os materiais utilizados em pavimentação sejam essencialmente não lineares, os deslocamentos dos pavimentos flexíveis e rígidos são suficientemente pequenos para validar a suposição de linearidade estática. Cebon (1999) mostrou, utilizando um pavimento instrumentado, que os deslocamentos verticais são lineares ao longo de uma vasta gama de frequências com carregamentos variados. Ele observou, no entanto, que em alguns tipos de pavimentos podem ser observadas medições não lineares devido ao atrito ou deficiência na construção do pavimento.
- b. Acoplamento dinâmico: As respostas do pavimento e da dinâmica do veículo são essencialmente desacopladas entre si. Isto por que: (1) a deflexão do pavimento é consideravelmente menor em comparação com deslocamentos verticais dos pneus e da suspensão, e (2) a velocidade de propagação das ondas elásticas na superfície da estrada está na faixa 100-600 m/s, que é significativamente maior que as velocidades do veículo. Como resultado do fraco acoplamento entre os dois sistemas, é razoável supor que a superfície da estrada é rígida para simular a dinâmica do veículo, e pode-se tratar o veículo como um conjunto de cargas dinâmicas que se deslocam no cálculo da resposta do pavimento.
- c. Efeitos da velocidade e da frequência: De acordo com Cebon (1999), materiais utilizados em pavimentação de estradas e a resposta do pavimento são muito sensíveis à velocidade do veículo e à frequência de aplicação das forças vindas do veículo. À medida que a velocidade aumenta, o pico de esforços sobre a carga em movimento diminui em amplitude e sempre fica atrás do ponto de aplicação da carga. Este efeito da velocidade é importante quando se analisa a degradação do pavimento causado pela carga dinâmica do veículo, porque a degradação por fadiga ocorrida por conta dos materiais de pavimentação são muito sensíveis à amplitude dos esforços, que, por sua vez, ocorre com a variação da velocidade.
- d. Variabilidade: Pavimentos são essencialmente de natureza não-linear onde suas características mudam significativamente devido à espessura das camadas do

pavimento. Em um estudo realizado por Cebon em 1987 no Transport and Road Research Laboratory (TRRL) no Reino Unido, uma técnica utilizando um radar foi utilizada para medir a espessura de uma série de pavimentos em intervalos em 1 m. O coeficiente de variação encontrado na camada asfáltica foi entre 3,7% e 6,7% para espessuras médias de 24 a 43 cm.

- e. Isotropia: A isotropia de uma estrada depende da variação da sua construção e dos materiais utilizados. No entanto, apesar da variabilidade descrita acima, medições realizadas por Cebon indicaram que a dinâmica da resposta do pavimento é razoavelmente isotrópicas, em distâncias curtas, até ao limite de 2 m.
- f. Efeitos do ambiente nas propriedades mecânicas do pavimento: Materiais utilizados em pavimentação e resposta do pavimento são extremamente sensíveis à fatores ambientais, particularmente umidade e temperatura. A resposta do pavimento é sensível à temperatura, com aproximadamente um fator de quatro vezes quando se varia à temperatura do pavimento de 13 a 42 ° C. Vários autores observaram essa variação fa rigidez do pavimento com a variação da temperatura.

3.3 Degradação do pavimento

Segundo Esse e Rodrigues (2003), os pavimentos têm como finalidade proporcionar aos usuários uma superfície de rolamento que permita o tráfego seguro e confortável de veículos, durante todo o período para que foram projetados. Os pavimentos reais não são concebidos para durarem eternamente, mas apenas para um determinado período. Durante cada um destes períodos ou “ciclo de vida”, o pavimento inicia uma condição ótima até alcançar uma condição ruim. O decréscimo da condição ou da serventia do pavimento ao longo do tempo é conhecido como desempenho. Segundo AASHTO (1990 apud ESSE; RODRIGUES, 2003), o desempenho de um pavimento é a capacidade deste de atender seus objetivos ao longo do tempo e é fortemente influenciado pelo tráfego e pelo craqueamento molecular dos maltenos presentes no asfalto.

Já o fenômeno que rege a mudança da condição do pavimento é conhecido como degradação. De acordo com Gonçalves (1999), um pavimento dificilmente sofre ruptura catastrófica, a menos que haja erro de projeto geotécnico em casos como os de pavimentos assentes em aterros sobre solos moles. A sua degradação se dá de forma contínua, ao longo do tempo, por meio de mecanismos complexos e ainda não inteiramente equacionados, onde gradativamente vão se acumulando deformações plásticas e trincas nas camadas, decorrentes de uma combinação entre a ação das cargas do tráfego e os efeitos do intemperismo (variações de temperatura e umidade ao longo do tempo). Além disso, a “ruptura” de um pavimento é, até certo ponto, indefinida e subjetiva, havendo divergências entre os técnicos e administradores quanto ao melhor momento de se restaurar um pavimento que atingiu um certo nível de deterioração estrutural e/ou funcional. Dois fatos decorrem desses aspectos:

- a. As consequências do desempenho inferior de um pavimento nem sempre são imediatamente visíveis. Os prejuízos econômicos causados por elevação nos custos de manutenção e, mais importante ainda, nos custos operacionais dos veículos, podem ser, contudo, extremamente elevados. Além disso, a escassez de recursos para investimentos em infra-estrutura nos países em desenvolvimento torna a tecnologia envolvida na pavimentação um item muito importante para a economia desses países;

- b. A previsão do desempenho futuro de um pavimento ou de medidas de manutenção a ele aplicadas é um problema extremamente complexo. Sua importância é tão elevada, contudo, que as pesquisas na área do desenvolvimento e calibração de modelos de previsão do desempenho têm sido intensas em todo o mundo.

Conforme Schliesser e Bull (1994 apud ALBANO, 1998), as rodovias passam por um ciclo de contínua deterioração, principalmente por ação do tráfego. O gráfico da figura 19 ilustra, o ciclo de vida de uma rodovia pavimentada com revestimento asfáltico, muitas vezes considerado normal, face à pouca atenção que é dada à manutenção.

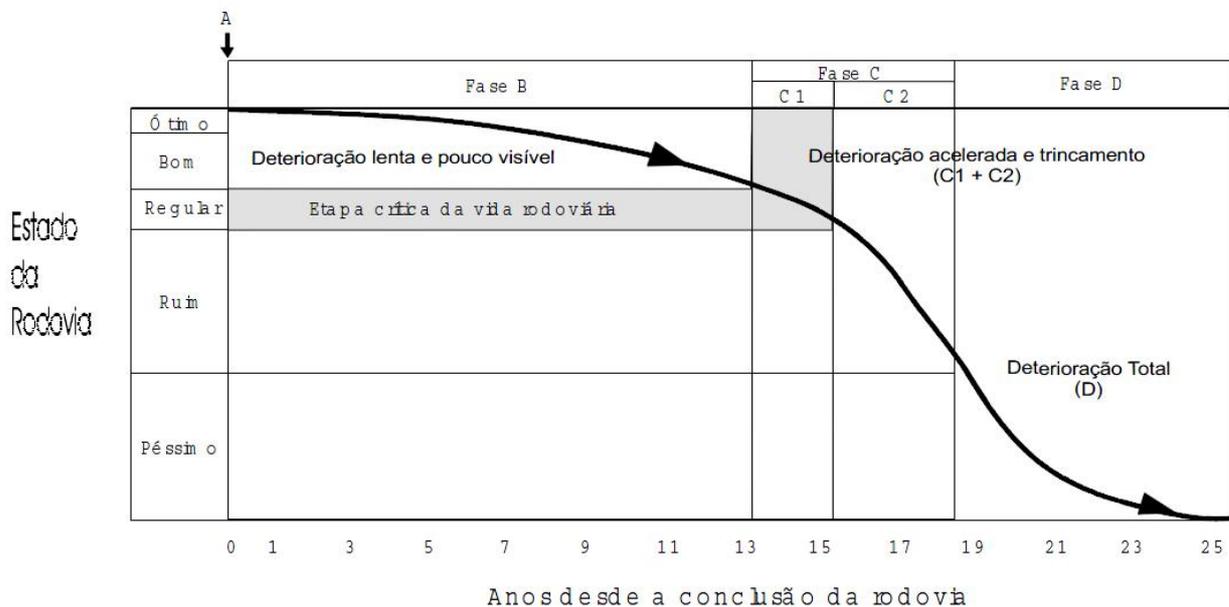


Figura 19: Ciclo de vida de uma rodovia pavimentada.

Fonte: Albano, 1998, p. 11

O gráfico da figura 19 deve ser interpretado como:

- Fase A - Construção: a rodovia está em estado considerado ótimo somente no dia da entrega ao tráfego, satisfazendo plenamente ao usuário;
- Fase B - Deterioração lenta: a rodovia sofre, pela passagem do tráfego, um processo de debilitação lento e pouco visível. Quando não há manutenção preventiva, este período dura aproximadamente de seis a oito anos;
- Fase C - Deterioração acelerada: os efeitos da fadiga do revestimento começam a surgir. A rodovia resiste cada vez menos ao tráfego. No início

não há repercussão estrutural e as trincas não são visíveis a um observador comum. Com o passar do tempo pode-se observar mais falhas, agora visíveis, estando a rodovia próxima ao final da fase, com a estrutura danificada. Um esquema consciente de manutenção deve ser desencadeado no início desta fase;

- Fase D - Deterioração total: observa-se a perda do pavimento e o tráfego de veículos torna-se difícil, a velocidade média de percurso diminui e a capacidade da rodovia torna-se reduzida.

Afirmam os citados autores que ao fim da fase C e durante a fase D, cabe somente reconstruir completamente o pavimento, a um custo que pode equivaler entre 50 a 80% do valor de um pavimento completamente novo.

3.3.1 Principais tipos de degradação causadas em pavimentos flexíveis

De acordo com o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) (1998) existem três principais categorias de defeitos que explicam a degradação dos pavimentos são: trincas, deformação e desagregação. A tabela 3 sumariza os modos de degradação e seus fatores causadores.

Tabela 3: Modos de degradação e seus fatores causadores

Categoria do Defeito	Causa Genérica	Causa Específica
Trincas	Associada com tráfego	Cargas repetidas (fadiga)
		Carga excessiva
		Escorregamento de capa
	Não associada com tráfego	Mudanças de umidade
		Mudanças térmicas
		Retração (propagação)
Deformação permanente	Associada com tráfego	Carga excessiva (cisalhamento)
		Fluência plástica
		Densificação (compactação)
	Não associada com tráfego	Expansão
		Consolidação de substratos
Desagregação	Associada com tráfego	Degradação do agregado
	Não associada com tráfego	Falta de qualidade dos materiais

Fonte: DNER, 1998

Os defeitos são basicamente relacionados com a ação do tráfego e as condições ambientais.

Neste trabalho serão apresentados somente os defeitos de deformação permanente e de trincas, os quais são os mais usualmente encontrados em pavimentos flexíveis no Brasil.

3.3.1.1. Deformação permanente

Para Sá (2003), a deformação permanente se traduz por irregularidades no perfil longitudinal e, sobretudo no perfil transversal do pavimento aparecendo sob a forma de depressões longitudinais nas linhas principais de rodagem acompanhadas de elevações laterais, ao longo dessas linhas.

Coelho (1996) define a deformação permanente como a ação combinada de densificação e deformação por cisalhamento, podendo ocorrer em uma ou mais camadas do

pavimento, inclusive no próprio subleito. O autor observa que estudos realizados na pista experimental da AASHO e relatados pelo HRB (1962), entre outros, mostraram que a deformação por cisalhamento, e não a densificação do material, parece ser a principal causa do mecanismo que produz a deformação permanente. Segundo esse mesmo autor, diversos fatores influenciam nas deformações permanentes do concreto asfáltico, dentre esses fatores, destacam-se a granulometria, o formato, a textura e o tamanho dos agregados; a rigidez do ligante; o volume de vazios; a quantidade do ligante; o método de compactação da mistura; a temperatura; o estado de tensões, e o número de repetições de carga nas condições de campo ou ensaio.

Para Merighi (1999), esse tipo de defeito é muito comum nos pavimentos revestidos em concreto betuminoso dos corredores de ônibus urbanos, podendo ser oriundo da deformação plástica que ocorre nas camadas subjacentes ao revestimento asfáltico ou causado pela deformação permanente desenvolvida na própria mistura asfáltica. Segundo esse autor a deformação permanente no revestimento asfáltico está associada à variação de volume de vazios causada pela ação do tráfego, assim como devido ao comportamento plástico do material quando submetido a determinado estado de tensão.

A norma americana American Society for Testing and Materials ASTM D 5340 (1997 apud VIERA, 2002) define esse defeito como uma depressão superficial na trilha de roda, podendo ocorrer o levantamento das bordas ao longo da trilha, e complementa que um aumento excessivo da deformação permanente pode provocar a ruptura da estrutura do pavimento. Conforme a norma americana, a deformação permanente na trilha de roda é classificada em três níveis de severidade, como mostra a tabela 4.

Tabela 4: Níveis de severidade do afundamento na trilha de roda

Nível de severidade na seção	Profundidade na trilha de roda	
	Polegadas	mm
Baixo	1/4 a 1/2	6 a 13
Médio	> 1/2 a 1	> 13 a 25
Alto	>1	> 25

Fonte: Viera, 2002.

Segundo FRANCO (2000), a deformação permanente é caracterizada pelo afundamento ao longo da trilha de roda em rodovias e pela irregularidade na superfície do pavimento que, por sua vez, dificultam a drenagem e aumentam o risco de aquaplanagem. Esses efeitos têm como consequência direta a redução dos níveis de segurança e conforto das

estradas, aeroportos, ruas e avenidas. A deformação total que ocorre nos pavimentos flexíveis devido à ação das cargas do tráfego pode ser dividida em duas parcelas: uma parcela resiliente ou reversível e outra permanente, ou plástica.

Svenson (1980 apud FRANCO, 2000) realizou ensaios de cargas repetidas que mostram a influência de diversos fatores nas deformações permanentes de solos argilosos provenientes de camadas de reforço e subleito de rodovias brasileiras. Svenson agrupou estes fatores em três classes, como se segue:

- a. Fatores de carga: relacionados à forma e ao tipo de carregamento, tais como, tensão de confinamento, tensão desvio e frequência de carregamento;
- b. Fatores estruturais: relacionados ao arranjo estrutural das partículas, tais como, tipo de material e forma de compactação e
- c. Fatores ambientais: referindo-se às influências externas, que não sejam as de carregamento, mas que produzam efeitos nas características de deformabilidade dos solos, tais como, umidade e temperatura.

A figura 20 apresenta um desenho esquemático de como se apresenta a deformação permanente resultante somente da mistura asfáltica, também chamada de afundamento na trilha de roda (ATR).

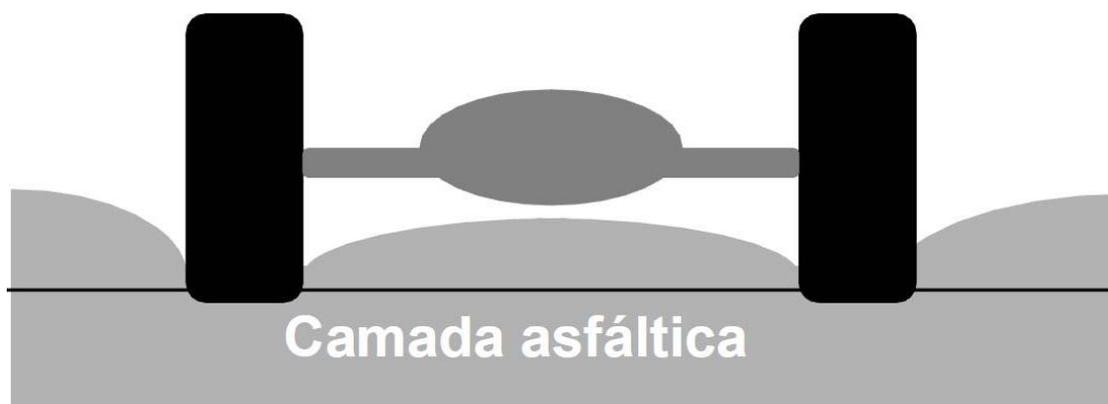


Figura 20: Deformação permanente com afundamento na trilha de roda.
Fonte: Sá, 2003, p. 68

A figura 21 apresenta um exemplo real de como se apresenta a deformação permanente do tipo plástica. Não raro este fenômeno presente na figura 21 ocorre quando do excesso de asfalto presente na massa ou no concreto betuminoso.



Figura 21: Exemplo real de deformação permanente.
Fonte: Washington State Department of Transportation – Pavement guide

Observa-se claramente na figura, o sulco existente no pavimento definido como deformação permanente propriamente dita e a região sujeita à fluência por cisalhamento.

Conforme norma do DNIT 005/2003–TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia, afundamento é definido como deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada ou não de levantamento, podendo apresentar-se sob a forma de afundamento plástico ou de consolidação. O plástico é causado pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito, acompanhado de levantamento. Quando ocorre em extensão de até 6 m é denominado afundamento plástico local; quando a extensão for superior a 6 m e estiver localizado ao longo da trilha de roda é denominado afundamento plástico da trilha de roda.

Afundamento de consolidação é causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento ou subleito sem estar acompanhado de levantamento. Quando ocorre em extensão de até 6 m é denominado afundamento de consolidação local; quando a extensão

for superior a 6m e estiver localizado ao longo da trilha de roda é denominado afundamento de consolidação da trilha de roda.

De acordo com Sá (2003), normalmente em pavimentos bem projetados e construídos, os afundamentos em trilhas de roda serão no máximo 10 mm após 20 anos, implicando em uma velocidade média de 0,5 mm por ano. Nas camadas asfálticas, as condições que tendem a levar a excesso esse tipo de defeito são:

1. Altas temperaturas;
2. Tráfego lento ou quase estático;
3. Tráfego canalizado e
4. Tráfego intenso.

Segundo Gonçalves (1999), diversos estudos desenvolvidos indicam que a causa chave para a ocorrência de deformações plásticas na camada asfáltica de revestimento são o excessivo teor de asfalto utilizado e o baixo teor de vazios de ar. Também, podem ser causadas por deficiências de densificação das camadas durante a etapa de construção ou pelo movimento plástico da mistura asfáltica em temperaturas elevadas. Em parte, a ocorrência de deformações plásticas pode ser minimizada através de projetos adequados da mistura asfáltica e pelo controle eficiente durante a construção. Para que a mistura asfáltica a ser utilizada seja menos suscetível a ocorrência de deformações plásticas é fundamental a existência de uma especificação dos vários componentes da mistura tais como: tipo e teor de asfalto, tipo e granulometria do agregado, grau de compactação (teor de vazios de ar).

Na tabela 5 estão apresentados os percentuais determinados na pista experimental da AASHO referentes à contribuição de cada camada para a deformação permanente total medida na superfície do pavimento.

Tabela 5: Contribuição de cada camada na deformação permanente total

Camada do pavimento	Contribuição na deformação permanente total (%)
Revestimento asfáltico	32
Base	14
Sub-base	45
Subleito	9

Fonte: Gonçalves, 1999.

Gonçalves (1999) em seu trabalho apresenta que a previsão da evolução de ATR é um problema complexo e requer a caracterização detalhada das propriedades elásticas, plásticas e de viscosidade dos materiais que constituem as camadas do pavimento.

O acúmulo de deformações permanentes em uma camada de concreto asfáltico é causado por uma combinação de densificação (redução do volume) e deformação cisalhante, devido à repetição das cargas do tráfego. O fator predominante são as elevadas tensões cisalhantes na parte superior da camada asfáltica. Assim, as propriedades do asfalto (elásticas e viscosas) e do agregado que contribuem para a deformação permanente nas misturas podem ser quantificadas através de um ensaio de cisalhamento simples.

A influência do asfalto nas deformações permanentes é altamente dependente das condições a que a mistura é submetida. Os efeitos do asfalto são significativos mas essa influência é pequena em relação aos efeitos do agregado e dos vazios de ar, especialmente a temperaturas mais elevadas (ex.: 40°C) ou quando a mistura é submetida a estados de tensões que amplificam a influência do agregado.

Além disso, a simulação das condições de campo em laboratório envolvendo uma grande variedade de ensaios realizados em temperaturas específicas, aplicando cargas de magnitude específicas, aplicação de carregamento repetido e variando a duração dos ciclos de carga aplicados, vêm sendo usados na tentativa de se obter misturas asfálticas que não ofereçam deformações plásticas excessivas. No entanto, deformações plásticas irão ocorrer no campo de qualquer maneira, causadas pela densificação e pelas deformações de cisalhamento dos materiais do pavimento devido às cargas do tráfego.

3.3.1.2. Trincas

Segundo DNER (1998), os revestimentos asfálticos tendem a trincar em algum estágio de seu ciclo de vida sob as ações combinadas do tráfego e das condições ambientais, por meio de um ou mais mecanismos.

A trinca é um defeito na superfície que enfraquece o revestimento e permite a entrada da água, provocando um enfraquecimento adicional da estrutura. Uma vez iniciado, as trincas tendem a aumentar sua extensão e severidade conduzindo eventualmente a desintegração do pavimento. Por meio desses efeitos, a velocidade de degradação de um pavimento aumenta após o aparecimento das trincas, com impacto significativo na evolução dos afundamentos nas trilhas de roda.

Segundo Viera (2002) e DNIT (2003), as trincas podem apresentar-se nas seguintes configurações:

a. Trincas isoladas

- Trinca transversal: trinca isolada que apresenta direção predominantemente ortogonal ao eixo da via. Quando apresentar extensão de até 100 cm é denominada trinca transversal curta. Quando a extensão for superior a 100 cm denomina-se trinca transversal longa. Em geral as trincas transversais são atribuídos a efeitos ambientais. Como exemplo, têm-se o desenvolvimento de trincas de retração em bases tratadas com cimento devido a hidratação do cimento e a ocorrência de variações térmicas. Estas trincas tendem a se propagar para cima (através do revestimento).
- Trinca longitudinal: trinca isolada que apresenta direção predominantemente paralela ao eixo da via. Quando apresentar extensão de até 100 cm é denominada trinca longitudinal curta. Quando a extensão for superior a 100 cm denomina-se trinca longitudinal longa. As trincas longitudinais são mais influenciadas pelo tráfego. As forças horizontais de cisalhamento provocadas pelo rolamento das cargas do tráfego, são responsáveis por elevadas tensões de tração e deformações na superfície do pavimento. Estas deformações ocorrem próximo das bordas das rodas e produzem trincas longitudinais. A ocorrência desse tipo de trinca não é séria sobre o ponto de vista estrutural. Todavia elas tendem a se propagar através do revestimento se um tratamento apropriado não for feito para deter seu avanço.

- Trinca de retração: trinca isolada não atribuída aos fenômenos de fadiga e sim aos fenômenos de retração térmica ou do material do revestimento ou do material de base rígida ou semi-rígida subjacentes ao revestimento trincado.

b. Trincas interligadas

- Trinca tipo “Couro de Jacaré”: conjunto de trincas interligadas sem direções preferenciais, assemelhando-se ao aspecto de couro de jacaré. Essas trincas podem apresentar, ou não, erosão acentuada nas bordas e decorrem da fadiga da mistura asfáltica devido à ação repetida das cargas de tráfego.
- Trinca tipo “Bloco”: conjunto de trincas interligadas caracterizadas pela configuração de blocos formados por lados bem definidos, podendo, ou não, apresentar erosão acentuada nas bordas.

De acordo com Gonçalves (1999), as trincas ainda podem ser classificadas de acordo com a severidade, extensão e intensidade. A severidade é uma medida da abertura das trincas, o que é usualmente expresso em classes. Em alguns sistemas de classificação, as classes de severidade incluem tanto a abertura das trincas como a intensidade. Quanto ao nível de severidade as trincas podem ser classificadas como:

- a. Baixo: trincas sem erosão nas bordas, com poucas conexões, abertura < 1 mm;
- b. Médio: trincas com pouca erosão nas bordas, abertura > 1 mm;
- c. Alto: trincas com erosão maior nas bordas e presença de bombeamento de finos.

A extensão é a área da superfície que é coberta pelas trincas, sendo expressa convenientemente pela percentagem de área trincada dentro de uma unidade, como uma faixa de tráfego por exemplo. A intensidade pode ser expressa pelo comprimento total de trincas dentro de uma unidade de área (m/m^2), dando-se uma idéia do tamanho médio dos blocos individuais definidos pelas trincas.

A figura 22 ilustra os tipos de trincas acima mencionados e nas figuras 23, 24, 25 e 26, exemplos reais de como esses tipos de trincas se apresentam nos pavimentos.

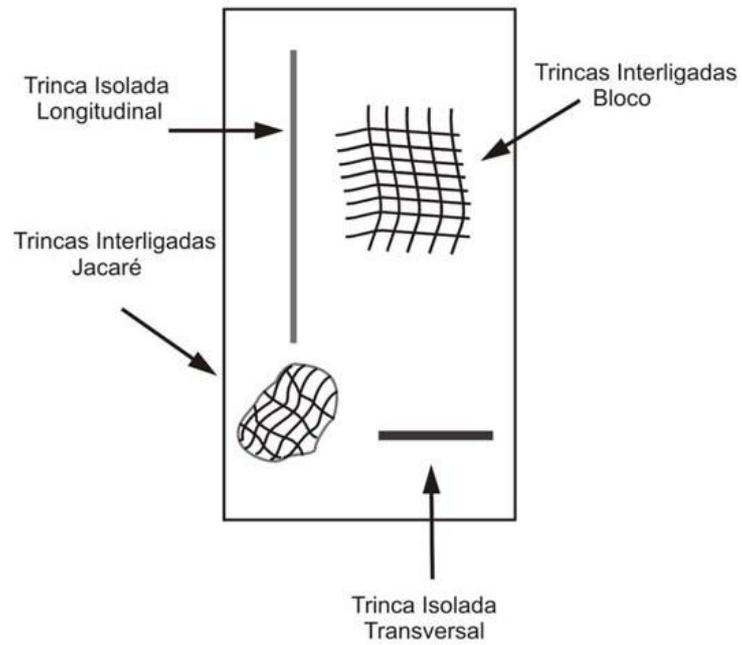


Figura 22: Tipos de trincas.
Fonte: DNIT, 2003, p. 5



Figura 23: Trinca isolada do tipo transversal.
Fonte: DNIT, 2003, p. 6



Figura 24: Trinca isolada do tipo longitudinal.
Fonte: DNIT, 2003, p. 6



Figura 25: Trinca interligada do tipo couro de jacaré.
Fonte: DNIT, 2003, p. 7



Figura 26: Trinca interligada do tipo bloco.
Fonte: DNIT, 2003, p. 7

Segundo Viera (2002) as trincas transversais e em bloco são geralmente devido aos efeitos ambientais. Já as trincas longitudinais nas trilhas de roda são originadas pelas cargas de tráfego. A referida autora sustenta que as forças cisalhantes horizontais que ocorrem abaixo dos pneus, parados ou em movimento, são responsáveis pelas elevadas tensões de tração e deformações de extensão na superfície do pavimento, que atuam perpendicularmente à direção de movimento da roda. Estas tensões ocorrem próximo à extremidade do pneumático e produzem trincas longitudinais.

De acordo com Albano (1998), o aparecimento de trincas no pavimento é caracterizado pelo rompimento da camada alfáltica 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 asfáltica e propagam-se progressivamente para a superfície.

O aparecimento de trincas na superfície de um pavimento traz conseqüências prejudiciais ao desempenho estrutural e funcional da rodovia, tais como:

- a. Perda de impermeabilização da superfície, permitindo a infiltração de água na estrutura e causando uma perda na capacidade de suporte do solo e a abertura de panelas;
- b. Degradação do revestimento próximo à trinca, devido à concentração dos esforços nos bordos da trinca, o que leva ao aumento da irregularidade;
- c. Aumento nas tensões verticais que atuam nas camadas subjacentes, devido à queda na rigidez da camada trincada.

De acordo com Gonçalves (1999), as trincas nos pavimentos pode ser devido a um grande número de motivos. As possíveis causas para o aparecimento de trincas em pavimentos asfálticos são:

- a. Fadiga: Decorrente da passagem repetida das cargas dos veículos, causando a ruptura da camada asfáltica depois de determinado número de ciclos;
- b. Retração: A adoção de camadas estabilizadas com ligantes hidráulicos (cimento, cal e outros produtos) e a ocorrência de temperaturas muito baixas provocam retração das camadas do pavimento, ocasionando, com isto, o surgimento de trincas;
- c. Movimentação do solo de fundação (subleito): Os movimentos verticais e especialmente o movimento diferencial entre os bordos da trinca também contribuem para o fenômeno. Isto é provocado por fenômenos como aumento de umidade, recalques, escorregamento, retração hidráulica e expansão;
- d. Defeitos construtivos: Causados pela má composição das camadas do pavimento, pela má execução de juntas longitudinais ou pelo deslocamento de camadas que deveriam permanecer unidas para que o desempenho seja satisfatório.

3.3.2 Modelos mecanístico-empíricos de degradação do pavimento

Apresentam-se a seguir os modelos mecanístico-empíricos de desempenho dos pavimentos flexíveis para os dois tipos de degradações apresentadas na seção anterior.

3.3.2.1. Deformação permanente

Conforme Gonçalves (2002) e Franco (2000, 2007), diversos estudos tem sido realizados ao longo dos anos em pistas de teste para prever a evolução de afundamento na trilha de roda e o conceito utilizado por alguns modelos de previsão é o da proporcionalidade com o estado de tensões ou deformações elásticas, além da influência do número de repetições de carga.

E basicamente esses estudos levam que a partir dos modelos de previsão de deformação específica permanente de cada camada do pavimento, pode-se estimar a deformação permanente total por meio do somatório das deformações parciais de cada uma das camadas, e pode ser expressão por (BARKSDALE, 1971 apud FRANCO, 2000):

$$\delta_{total}^P = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_P^i \cdot h_i) + \delta_{SL} \quad (55)$$

Em que:

- δ_{total}^P = deformação permanente total do pavimento;
- ε_P^i = deformação permanente específica média da camada ou subcamada de ordem i;

- h_i : espessura da camada ou subcamada de ordem i ;
- n : número de camadas ou subcamadas;
- δ_{SL} = deformação permanente no subleito.

Conforme estudo realizado por Svenson (1980 apud FRANCO, 2000) e Coelho (1996), são diversos os fatores que influenciam nas deformações permanentes no pavimento. Não foi encontrado na literatura existente nenhum modelo que estima efetivamente a deformação específica permanente de cada camada do pavimento relacionando as diversas variáveis que influenciam significativamente o comportamento dos materiais componentes da mistura. Segundo Franco (2000), com modelos simplificados podem-se ser obtidas boas regressões, que representam bem o comportamento à deformação permanente, tanto de solos granulares como de solos argilosos, em relação ao número de aplicações e carga.

Franco (2000, 2007) fez uma ampla revisão bibliográfica em modelos de previsão de deformação permanente e apresentou em seu trabalho de pesquisa modelos de diversos autores, subdividindo-os de acordo com o material utilizado em pavimentação. São mostrados na tabela 6 os principais modelos apresentados por Franco.

Tabela 6: Modelos de previsão de deformação permanente

Tipo de material do pavimento	Modelo	Autor	Ano	Variáveis	Comentário
Todos	$\varepsilon_p = A.N^B$	Monismith et al	1975	ε_p = deformação específica permanente; A e B = parâmetros determinados em ensaios de laboratório; N = número de repetições de carga.	Modelo mais comum encontrado.
Todos	$\varepsilon_p = \varepsilon_p^{100} + A.(N - 100)^B$	Motta	1991	ε_p = deformação específica permanente; ε_p^{100} = deformação específica permanente das primeiras cem aplicações de carga; A e B = parâmetros determinados em ensaios de laboratório; N = número de repetições de carga.	Evolução do modelo de Monismith, em que se descartam as deformações permanentes das primeiras cem aplicações de carga, por serem elas muito acentuadas em relação às seguintes.
Materiais granulares	$\varepsilon_p (\%) = 0,01 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_3} \right)$	Brown	1974	ε_p = deformação específica permanente; σ_p = tensão desvio, em psi; σ_3 = tensão confinante, em psi.	Ensaiou um tipo de brita granítica com $f_{máx} = 5\text{mm}$ na umidade ótima de compactação em ensaios drenados e não drenados. O número de repetições de carga atingido no ensaio foi de 106 ciclos.
Materiais granulares	$\varepsilon_p = \varepsilon_{0,95} \cdot \sigma_{drupt} \cdot \ln \left(1 - \frac{\sigma_d}{\sigma_{drupt}} \right)^{-0,15}$ $+ \left(\frac{n \cdot \sigma_d / \sigma_{drupt}}{(1-m) \cdot \sigma_d / \sigma_{drupt}} \right) \cdot \ln(N)$	Lentz e Baladi	1981	$n = (0,809 + 0,0038 \cdot \sigma_3) \cdot 10^{-4}$; $m = 0,856 + 0,05 \cdot \ln(\sigma_3)$; σ_3 = tensão confinante, em psi; σ_d = tensão desvio, em psi; σ_{drupt} = tensão desvio de ruptura para um certo σ_3 , em psi; $\varepsilon_{0,95}$ = deformação axial medida no ensaio triaxial estático, a 95% do σ_{drupt} , para um certo σ_3 , em psi.	Propuseram um modelo cuja definição dos parâmetros é realizada através de um único ensaio do material sob as condições de campo. Segundo os autores, obtiveram-se boas concordâncias com os resultados medidos e calculados em três amostras que não fizeram parte da regressão.

Tabela 6: Modelos de previsão de deformação permanente

Tipo de material do pavimento	Modelo	Autor	Ano	Variáveis	Comentário
Materiais granulares	$\frac{\varepsilon_p}{N} = A.N^{-m}$	Khedr	1985	ε_p = deformação específica permanente; A e m = parâmetros determinados em ensaios de laboratório; N = número de repetições de carga.	Modelo resultante de observações de ensaios realizados em uma brita graduada calcária com tensão confinante pulsante simultaneamente com a tensão desvio. Revelou-se uma excelente correlação entre a velocidade de acumulação de deformação permanente e o número de aplicações de carga.
Materiais granulares	$\varepsilon_p(N) = a \left(\frac{q}{p} \right) b \cdot \frac{N^{0,5}}{d + N^{0,5}}$	Paute et al	1988	q = $\sigma_3 - \sigma_1$; p = $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$; a, b e d = parâmetros determinados em ensaios de laboratório; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = tensões principais.	Propuseram a eliminação das cem primeiras repetições de carga e obtiveram um modelo que engloba tanto o estado de tensões quanto o número de aplicações de carga.
Materiais granulares	$\frac{\varepsilon_p(N)}{\varepsilon_R} = \mu.(N)^{-\alpha}$ $\mu = \frac{A.B}{\varepsilon_R}$ $\alpha = 1 - B$	Jacob Uzan	1982	$\varepsilon_p(N)$ = deformação permanente na n-ésima repetição de carga; ε_R = deformação específica resiliente; μ e α = parâmetros experimentais; N = número de repetições de carga; A e B = são os parâmetros experimentais do modelo de Monismith.	Modelo desenvolvido a partir da diferenciação do modelo de Monismith, e relaciona a deformação permanente com a deformação resiliente. E estima a relação das deformações na n-ésima repetição de carga.

Tabela 6: Modelos de previsão de deformação permanente

Tipo de material do pavimento	Modelo	Autor	Ano	Variáveis	Comentário
Materiais granulares	$\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_R} = 0,14 \cdot \left(\frac{700}{M_R} \right)^R$	Barker	1982	ε_P = deformação específica permanente; ε_R = deformação específica resiliente; M_R = módulo resiliente, em psi; $R = 0,2 \cdot N^{0,12}$ N = número de repetições de carga.	Barker desenvolveu uma pesquisa baseada na relação entre a deformação permanente e o número de aplicações de carga, onde considerou, também, o comportamento resiliente (M_R e ε_R) dos solos ensaiados.
Materiais granulares	$\delta_a(N) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_R} \right) \cdot e^{-\left(\frac{\rho}{N} \right)^\beta} \cdot \varepsilon_V \cdot h$	Tseng e Lytton	1898	δ_a = deformação permanente da camada; N = número de repetições de carga. $\varepsilon_0, \rho, \beta$ = propriedades dos materiais; ε_R = deformação específica resiliente e imposta nos ensaios de laboratório para se obter os parâmetros $\varepsilon_0, \rho, \beta$; ε_V = deformação específica vertical média resiliente; h = espessura da camada.	Os parâmetros ρ e β e a relação $\varepsilon_0/\varepsilon_R$ são parâmetros dos materiais derivados a partir de ensaios de deformação permanente.
Solos latéricos	Para CBR < 40%: $\varepsilon_P = \frac{128748 \cdot (N)^{0,1346} \cdot (\sigma_1)^{2,664}}{(CBR)^{5,35} \cdot (\sigma_\theta)^{1,1431}}$ Para CBR > 40%: $\varepsilon_P = \frac{(N)^{0,1878} \cdot (\sigma_1)^{6,0911}}{55,6313 \cdot (CBR)^{1,3605} \cdot (\sigma_\theta)^{4,893}}$	Cardoso	1987	ε_P = deformação específica permanente; N = número de repetições de carga; CBR = índice de suporte Califórnia; σ_1, σ_θ = tensões principais.	Os modelos relacionam a deformação permanente com o estado de tensões e o índice de suporte Califórnia (CBR) e segundo Cardoso, as deformações permanentes estimadas por esses dois modelos se aproximaram bem das deformações plásticas obtidas em laboratório, sob as mesmas condições.

Tabela 6: Modelos de previsão de deformação permanente

Tipo de material do pavimento	Modelo	Autor	Ano	Variáveis	Comentário
Misturas asfálticas	$\varepsilon_p = A \cdot \left(\frac{N}{10^5} \right)^B$ $A = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{0,65 \cdot E^* \cdot F}$ $F = 5,5 \cdot 10^{-2} \cdot \left(1 - 1,02 \cdot \frac{V_b}{V_b - V_v} \right)$	CRR, Verstraeten et al	1982	ε_p = deformação específica permanente; N = número de repetições de carga; A e B = parâmetros determinados em ensaios de laboratório; E^* = número de repetições de carga; V_v = volume de vazios da mistura asfáltica em %; V_b = teor efetivo de betume, em %.	
Misturas asfálticas	Log. linear: $\log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_R}\right) = -4,80661 + 2,58155 \cdot \log(T) + 0,429561 \cdot \log(N)$ Log. quadrático: $\log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_R}\right) = (-2,77161 + 1,451074 \cdot \log(T)) \cdot \log(N) + (-0,17796 + 0,366401 \cdot \log(T)) \cdot \log(N) - 0,015 \cdot \log(N)^2$	Ayres	1997	ε_p = deformação específica permanente; ε_R = deformação específica resiliente; N = número de repetições de carga; T = temperatura do pavimento, em °F.	Modelos desenvolvidos a partir dos dados obtidos por Leahy em 1989 e relacionam a razão entre a deformação permanente e a resiliente com a temperatura do pavimento e o número de aplicações de carga.
Misturas asfálticas	$\log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_R}\right) = -6,3748 + 0,4289 \cdot \log(N) + 2,5896 \cdot \log(T) + 0,1089 \cdot \log(\sigma_d) - 0,0004 \cdot \log(VIS) + 1,0057 \cdot \log(VB) + 0,5213 \cdot \log(VV)$ $(R^2 = 0,8149)$	Kaloush	1999	ε_p = deformação específica permanente; ε_R = deformação específica resiliente; N = número de repetições de carga; T = temperatura do pavimento, em °F; σ_d = tensão desvio, em psi; VIS = viscosidade do ligante a 70°F, em 10 ⁶ poise; VB = teor efetivo de betume, em % volume; VV = volume de vazios da mistura, em %.	Estudos realizados para o projeto AASHTO 2002, que reuniu os 2860 dados obtidos por Leahy em 1989 com 2064 dados de ensaios realizados na Universidade de Maryland. A análise feita por Kaloush buscou resolver a irracionalidade encontrada por Ayres, e acabou resultando em um novo modelo de previsão.

Tabela 6: Modelos de previsão de deformação permanente

Tipo de material do pavimento	Modelo	Autor	Ano	Variáveis	Comentário
Misturas asfálticas	$\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_R} = K_1 \cdot 10^{-3,51108} T^{1,5606} N^{0,479244}$ <p>Em que:</p> $K_1 = (C_1 + C_2 \cdot z) \cdot 0,328196^z$ $C_1 = -0,1039 \cdot H_{ac}^2 + 2,4868 \cdot H_{ac} - 17,342$ $C_2 = 0,0172 \cdot H_{ac}^2 - 1,7331 \cdot H_{ac} + 27,428$	Guia de projeto da AASHTO (NCHRP)	2004	ε_P = deformação permanente na n-ésima repetição de carga; ε_R = deformação específica resiliente como função das propriedades da mistura, temperatura e frequência de carregamento; N = número de repetições de carga; T = temperatura do pavimento, em °F; H _{ac} = espessura da camada asfáltica, em polegadas; T = profundidade, em polegadas.	O modelo foi baseado na extensa pesquisa conduzida por Leahy em 1989 e Ayres em 1997 e foi parcialmente calibrado com dados de campo obtidos de 88 seções do LTPP localizadas em 28 estados americanos.
Subleito	$\delta_{SL} = \int_0^{\infty} \varepsilon_P(z) \cdot dz = \frac{1}{K} \cdot \varepsilon_P(z=0)$ $K = \frac{1}{6} \cdot \ln \left(\frac{\varepsilon_{P,z=0}}{\varepsilon_{P,z=6''}} \right)$	Ayres	1997	$\varepsilon_P(z=0)$ = deformação específica permanente no topo do subleito; $\varepsilon_P(z)$ = deformação específica permanente na profundidade z; z = profundidade medida a partir do topo do subleito, em polegadas.	Modelo desenvolvido um método aproximado para determinar a deformação permanente do subleito a partir das deformações específicas permanentes no topo do subleito e a 15cm de profundidade. A partir de diversos resultados, Ayres verificou que a deformação específica permanente ao longo do subleito vai reduzindo exponencialmente.

Fonte: Franco, 2000, 2007.

Gonçalves (1999) apresentou alguns valores de A e B de ensaios de laboratório, derivados de pesquisas experimentais, ilustra-se na tabela 7 esses valores.

Tabela 7: Parâmetros de ensaios de laboratório para ocorrência de deformação permanente

	Fonte	A	B
1	Transport & Road Research Laboratory	1.130E-6	3.57
2	Belgian Road Research Center (BRRC)	3.050E-9	4.35
3	Instituto do Asfalto	1.365E-9	4.477
4	SHELL Research	6.15E-7	4
5	U. S. Army Corps of Engineers	1.807E-15	6.527
6	CHEVRON	1.337E-9	4.484

Fonte: Gonçalves, 1999.

3.3.2.2. Trincas por fadiga

Gonçalves (2002) e Franco (2000,2007), fizeram em seus trabalhos de pesquisa uma ampla revisão bibliográfica em pesquisas de ensaios acelerados de desempenho de pavimentos onde foram apresentados vários modelos mecanístico-empíricos para a ocorrência de trincas por fadiga. E demonstraram que em várias pesquisas a previsão do número de repetições de carga para atingir as trincas por fadiga estão relacionados às tensões de tração ou às deformações de tração que ocorre nas fibras inferiores da camada alfáltica quando da passagem das cargas do tráfego.

O desenvolvimento de modelos para avaliação das trincas por fadiga de estruturas de pavimentos tem sido feito principalmente através do estabelecimento de funções de transferência derivadas de estudos de laboratório. Os resultados dessas pesquisas são geralmente expressos através de relações do tipo (MONISMITH e BROWN, 1999; PINTO E MOTTA, 1995; LOUREIRO, 2003 apud FRANCO, 2000, 2007):

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{K_2} \quad (56)$$

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{K_2} \quad (57)$$

Em que:

- N_f = número de repetições de carga para ocorrência de trincas por fadiga;
- K_1 e K_2 = parâmetros determinados em ensaios de laboratório;
- ε_t = deformação de tração medida em dado ponto crítico;
- σ_t = tensão de tração medida em dado ponto crítico.

Atualmente, os modelos que vêm sendo desenvolvidos, baseiam-se na deformação de tração e no módulo dinâmico e pode-se ser expresso por (FRANCO, 2000):

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{K_2} \cdot \left(\frac{1}{E^*} \right)^{K_3} \quad (58)$$

Em que:

- N_f = número de repetições de carga para ocorrência de trincas por fadiga;
- K_1 , K_2 e K_3 = parâmetros determinados em ensaios de laboratório;
- E^* = modulo do revestimento asfáltico, em psi;
- ε_t = deformação de tração nas fibras inferiores do revestimento asfáltico.

Estes tipos de modelos exigem o estabelecimento de fatores de calibração obtidos a partir de ensaios de laboratório. Tal procedimento tem levado a resultados inconsistentes, o que se reflete na absurda faixa de valores que tem sido obtida para os fatores de calibração, que pode variar de 20 a 100. Alguns valores de K_1 , K_2 e K_3 de ensaios de laboratório, derivados de pesquisas experimentais, são apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros de ensaios de laboratório para ocorrência de trincas por fadiga

	Fonte	K_1	K_2	K_3
1	Departamento de Transportes de Illinois	5.00E-06	3	0
2	Transport & Road Research Laboratory	1.66E-10	4.32	0
3	Belgian Road Research Center (BRRC)	4.92E-14	4.76	0
4	Austin Research Engineers (ARE)	9.73E-15	5.16	0
5	Federal Highway Administration (FHWA)	7.56E-12	4.68	0
6	Instituto do Asfalto	0.0796	3.291	0.854
7	SHELL Oil Research	0.0685	5.671	2.363
8	U. S. Army Corps of Engineers	497.156	5	2.665
9	Arizona Department of Transportation	9.33E-7	3.84	0

Fonte: Gonçalves, 1999.

Franco (2000, 2007) apresentou em seus trabalhos de pesquisa outros modelos mecanístico-empíricos oriundos de pesquisas de ensaios acelerados realizadas ao redor do mundo. São mostrados na tabela 9 os principais modelos apresentados por Franco.

Tabela 9: Modelos de previsão de trincas por fadiga

Modelo	Autor	Ano	Variáveis	Comentário
$N_f = 18,4 \cdot 10^{4,84 \cdot \frac{V_{efb}}{V_v + V_{efb}} - 0,69}$ $0,00432 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,291} \cdot \left(\frac{1}{E^*}\right)^{0,854}$	Asphalt Institute	1981	<p>N_f = número de repetições de carga para ocorrência de trincas por fadiga; V_{efb} = teor efetivo de betume em volume da mistura asfáltica = teor de asfalto (em vol.) - teor de asfalto absorvido (em vol.), em %; V_v = teor de vazios em volume da mistura asfáltica, em %; E^* = módulo do revestimento asfáltico, em psi; ε_t = deformação de tração nas fibras inferiores do revestimento asfáltico.</p>	Modelo faz parte do manual de dimensionamento de pavimentos de rodovias e ruas do Asphalt Institute.
$N_f = 273.800 \cdot e^{0,077 \cdot V_{paA}}$ $\left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,624} \cdot \left(\frac{1}{E^{**}}\right)^{2,720}$ $E^{**} = E \cdot \text{sen}(\phi)$ $\phi = 22,34 - 1,97 \cdot \log E + 28,7 \cdot (\log E)^2 + 17,22 \cdot (\log E)^2$	Monismith et al	1995	<p>N_f = número de repetições de carga para ocorrência de trincas por fadiga; ε_t = deformação de tração nas fibras inferiores do revestimento asfáltico; V_{pa} = teor de asfalto, em %; E^{**} = módulo de perda, em psi; ϕ = ângulo de fase, em graus.</p>	Modelo apresentado para o Strategic Highway Research Program (SHRP) A-003A
$N_{lab} = 9,07 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,65} \cdot \left(\frac{1}{M_R}\right)^{-0,033}$	Pinto	1991	<p>N_{lab} = número de repetições de carga para ocorrência de trincas por fadiga no laboratório; ε_t = deformação de tração nas fibras inferiores do revestimento asfáltico; M_R = módulo resiliente do revestimento asfáltico, em kgf/cm^2.</p>	Modelo de previsão de vida por fadiga desenvolvido em laboratório a partir da deformação de tração e do módulo resiliente da camada asfáltica, obtendo uma correlação entre os 82 valores medidos e os previstos, R_2 , superior a 0,95.

Tabela 9: Modelos de previsão de trincas por fadiga

Modelo	Autor	Ano	Variáveis	Comentário
$N_{lab} = K \cdot \left[\frac{13 \cdot (1 + \nu)}{48 \cdot E} \right]^{n/2} \cdot U_d^{-n/2}$ $n = -13,75 + 6 \cdot \sigma_t - 0,687 \cdot \sigma_t^2 + 0,025 \cdot \sigma_t^3$ $\sigma_t = \frac{M_R}{5250}$ $U_d = \frac{1 + \nu}{6 \cdot E} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]$ $K = e^{(3,5156 + 3,8339 \cdot n)}$	Rodrigues	1992	<p>N_{lab} = número de repetições de carga para ocorrência de trincas por fadiga no laboratório;</p> <p>M_R = módulo resiliente do revestimento asfáltico, em kgf/cm²;</p> <p>$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = tensões principais, em kgf/cm²</p> <p>σ_t = resistência a tração na compressão diametral;</p> <p>ν = coeficiente de Poisson;</p> <p>E = módulo resiliente a 25°C, em kgf/cm².</p>	Modelo desenvolvido a partir dos dados obtidos em laboratório por Preussler (1983) e Pinto (1991) e exprimiu uma relação entre a vida de fadiga e a densidade de energia de deformação, U_d .
$\log N_f = 4,4 + \left\{ -5,4 \cdot 10^{-6} + 1,1 \cdot 10^{-7} \cdot \sigma_m - 8,5 \cdot 10^{-11} \cdot [\sigma_m^2 + 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \tau_{oct}^2] \right\} \cdot E + (-0,83 \cdot \log \sigma_m + 0,31 \cdot \log E) \cdot V_{asf} + \left\{ 3,08 \cdot [\sigma_m^2 + 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \tau_{oct}^2] / E - 0,11 \cdot \log \sigma_m \right\} \cdot V_v + [35,78 \cdot 10^6 \cdot (\sigma_m / E) - 12144 \cdot \log \sigma_m] \cdot (\sigma_m / E)$	Lytton et al	1993	<p>N_f = número de repetições de carga para ocorrência de trincas por fadiga;</p> <p>E = módulo do revestimento asfáltico, em psi;</p> <p>V_{asf} = teor em volume de betume na mistura asfáltica, em %;</p> <p>V_v = teor de vazios em volume da mistura asfáltica, em %;</p> <p>ν = coeficiente de Poisson;</p> <p>σ_m = tensões média principal, em psi</p> <p>τ_{oct} = tensão cisalhante octaédrica, em psi.</p>	Modelo desenvolvido para o programa SHRP - Superpave A-357.

Tabela 9: Modelos de previsão de trincas por fadiga

Modelo	Autor	Ano	Variáveis	Comentário
<p>Ligantes tradicionais:</p> $N_{lab} = 1,904 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,821} \cdot \left(\frac{1}{M_R}\right)^{0,74}$ <p>Ligantes modificados por polímeros SBS ou EVA:</p> $N_{lab} = 4,455 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,798} \cdot \left(\frac{1}{M_R}\right)^{1,493}$ <p>Ligantes do tipo asfalto borracha:</p> $N_{lab} = 7,265 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,103} \cdot \left(\frac{1}{M_R}\right)^{1,918}$	Franco	2007	<p>N_{lab} = número de repetições de carga para ocorrência de trincas por fadiga no laboratório;</p> <p>ε_t = deformação de tração nas fibras inferiores do revestimento asfáltico;</p> <p>M_R = módulo resiliente do revestimento asfáltico, em kgf/cm^2.</p>	Modelo desenvolvido a partir de dados levantados de ensaios de carga repetida à tensão controlada realizados no laboratório de pavimentação da COPPE e de outros publicados em diversos trabalhos técnicos e científicos para obter os modelos de previsão de fadiga das misturas asfálticas. Foram analisados 675 resultados de ensaios de fadiga, de diversas amostras de corpos-de-prova de misturas asfálticas, sendo 536 de misturas asfálticas com ligantes tradicionais; 51 de misturas com ligantes modificados por polímero; e 88 de misturas com asfalto borracha.
<p>$\%RF = a + b \cdot \log(N_f)$</p> <p>$\varepsilon_t = a + b \cdot \log(N_f)$</p>	Ceratti	1991	<p>$\%RF$ = relação entre a tensão aplicada no ensaio e a resistência à tração na flexão do material;</p> <p>ε_t = deformação inicial de tração imposta ao material;</p> <p>a e b = parâmetros determinados em ensaios de laboratório.</p>	Ceratti obteve curvas de fadiga para seis misturas diferentes de solo-cimento ensaiadas com modo de carregamento à flexão.

Fonte: Franco, 2000, 2007.

4 SIMULAÇÃO DO MODELO DE INTERAÇÃO DO CAMINHÃO-PAVIMENTO

Neste capítulo, é apresentada a simulação do modelo de interação caminhão-pavimento. Este modelo é basicamente definido pela simulação da dinâmica vertical do caminhão para obtenção das forças dinâmicas no pavimento e a partir dessas forças simula-se o desempenho do pavimento flexível resultando na estimativa da vida em serviço do pavimento e previsão da ocorrência de trincas por fadiga e da deformação permanente. É apresentado na figura 27 o esquema básico desse modelo.

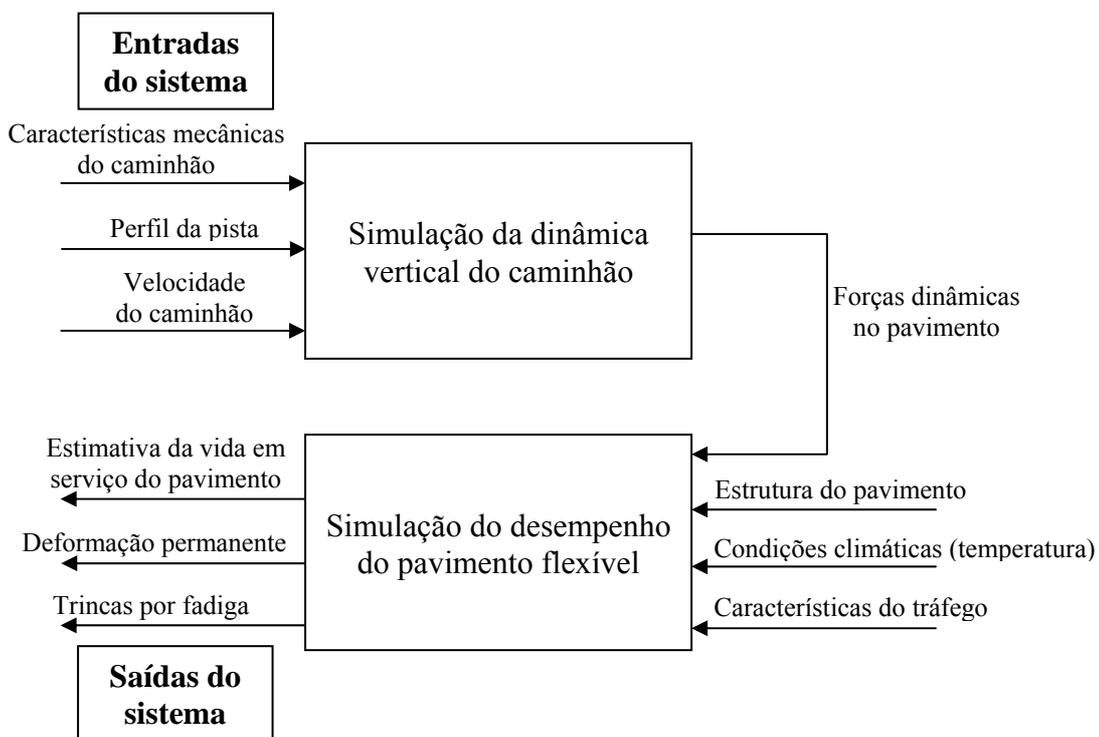


Figura 27: Esquema básico da simulação do modelo de interação caminhão-pavimento.

A simulação da dinâmica vertical do caminhão foi realizada no programa Matlab/Simulink utilizando os modelos mecânicos detalhados no capítulo 2. Para efeito de avaliar e comparar a suspensão traseira dos caminhões estudados utiliza-se o Coeficiente Dinâmico de Carga (CDC), (em inglês Dynamic Load Coefficient – DLC), o qual é usualmente utilizado por vários autores para esse fim. (HEDRIK, YI, 1991; COLLOP, CEBON, 1999).

A simulação do desempenho de pavimentos flexíveis foi realizada no programa SisPav 2009. Este programa foi desenvolvido por Franco (2007) em 2007 no COPPE/UFRJ com o objetivo de dimensionar e avaliar o desempenho de pavimentos e utiliza a teoria da elasticidade com um modelo elástico não linear para calcular as tensões e deformações no pavimento e modelos mecanístico-empíricos para previsão dos danos acumulados por fadiga, da deformação permanente e da estimativa da vida de serviço do pavimento.

4.1 Simulação da dinâmica vertical do caminhão

Para realização das simulações dos caminhões estudados, utilizam-se de dados de veículos reais modelo Scania R420 4x2 com distância entre eixos de 4,3 m obtidos com o fabricante dos mesmos. É apresentado abaixo as características mecânicas desses veículos.

- Massa suspensa (M_S) = 8000 kg
- Momento de inércia em relação ao eixo transversal do caminhão (I_S) = 7500 Kg.m²
- Massa não suspensa dianteira (M_D) = 300 kg
- Massa não suspensa traseira (M_T) = 750 kg
- Rigidez da mola dianteira (K_D) = 290000 N/m
- Coeficiente de amortecimento do amortecedor dianteiro (C_D) = 10000 Ns/m
- Rigidez da mola traseira (K_T) = 744000 N/m
- Coeficiente de amortecimento do amortecedor traseiro (C_T) = 50000 Ns/m
- Rigidez da mola do pneu dianteiro (K_{PD}) = 1030000 N/m
- Coeficiente de amortecimento do amortecedor do pneu dianteiro (C_{PD}) = 5000 Ns/m

- Rigidez da mola do pneu traseiro (K_{PT}) = 2060000 N/m
- Coeficiente de amortecimento do amortecedor do pneu traseiro (C_{PT}) = 10000 Ns/m
- Distância entre eixo dianteiro e CG (a) = 2,687 m
- Distância entre eixo traseiro e CG (b) = 1,613 m

No caso dos valores para os amortecedores com comportamento não linear e para a suspensão traseira pneumática utilizam-se curvas experimentais Força x Velocidade fornecidas pelos fabricantes.

Como entrada do sistema foi utilizado um trecho do perfil da pista de uma rodovia da Suécia realizado através de medições a laser (SCANIA, 1996). É apresentado na figura 28 esse trecho utilizado na simulações.

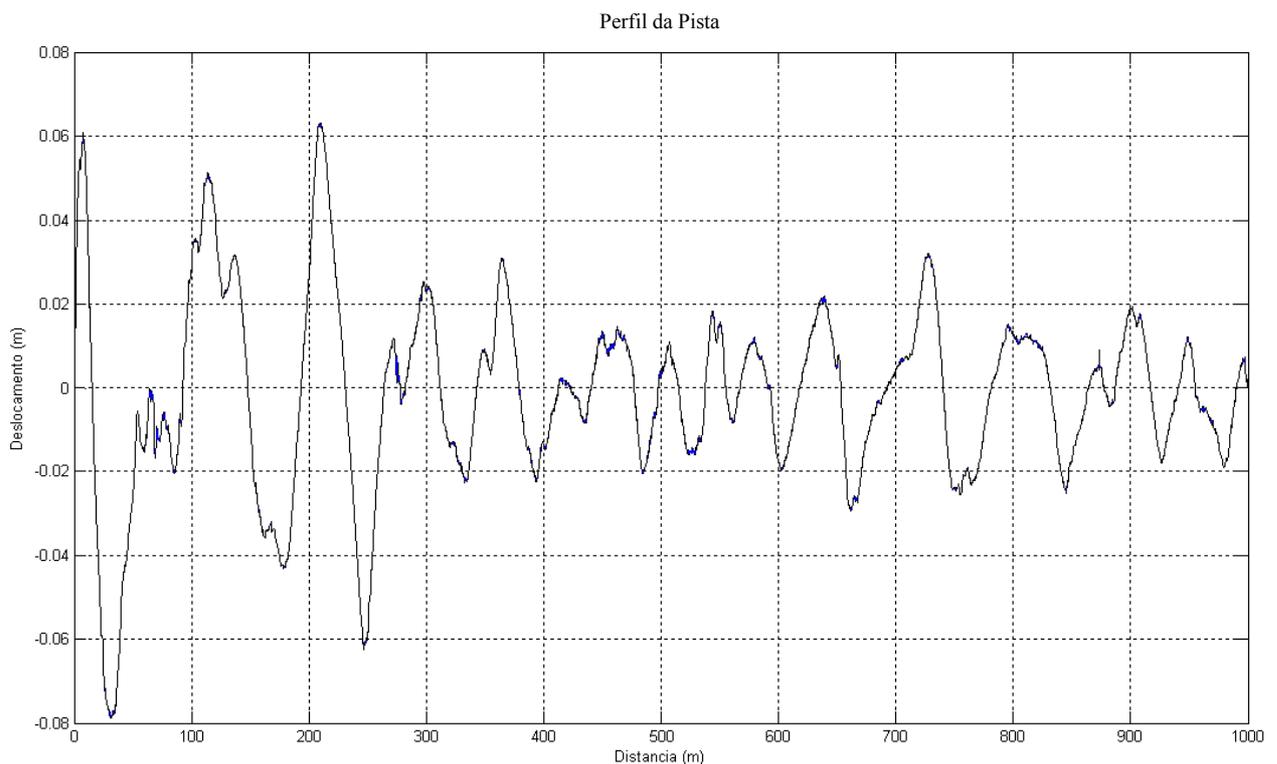


Figura 28: Perfil da pista de entrada do sistema.

As simulações foram realizadas utilizando uma integração numérica com método de Runge-Kutta de quarta ordem com passo de integração fixo de valor 0,001 que, conforme gráficos dos resultados se mostrou adequado para essas simulações. Conforme mencionado

anteriormente as simulações foram realizadas com o programa Matlab-Simulink. A figura 29 ilustra o diagrama de blocos do modelo no programa Simulink.

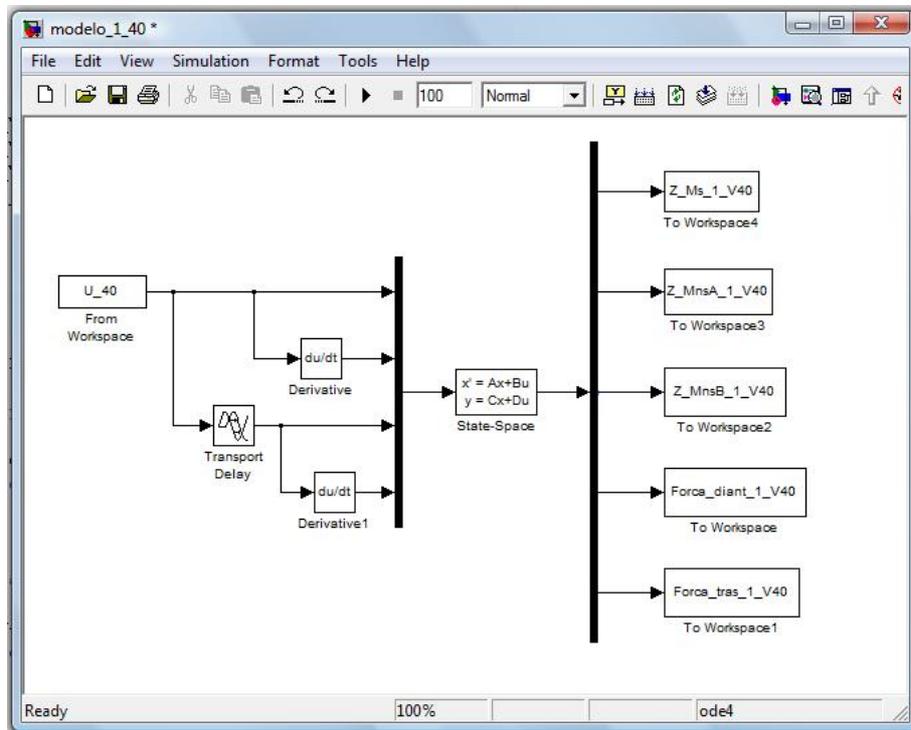


Figura 29: Diagrama de blocos do modelo 1 no programa Simulink.

Realizadas as simulações dos modelos 1, 2 e 3 para as velocidades de 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h e 100 km/h, apresentam-se nos gráficos 1, 2 e 3 as curvas da força dinâmica no pneu traseiro em função da velocidade.

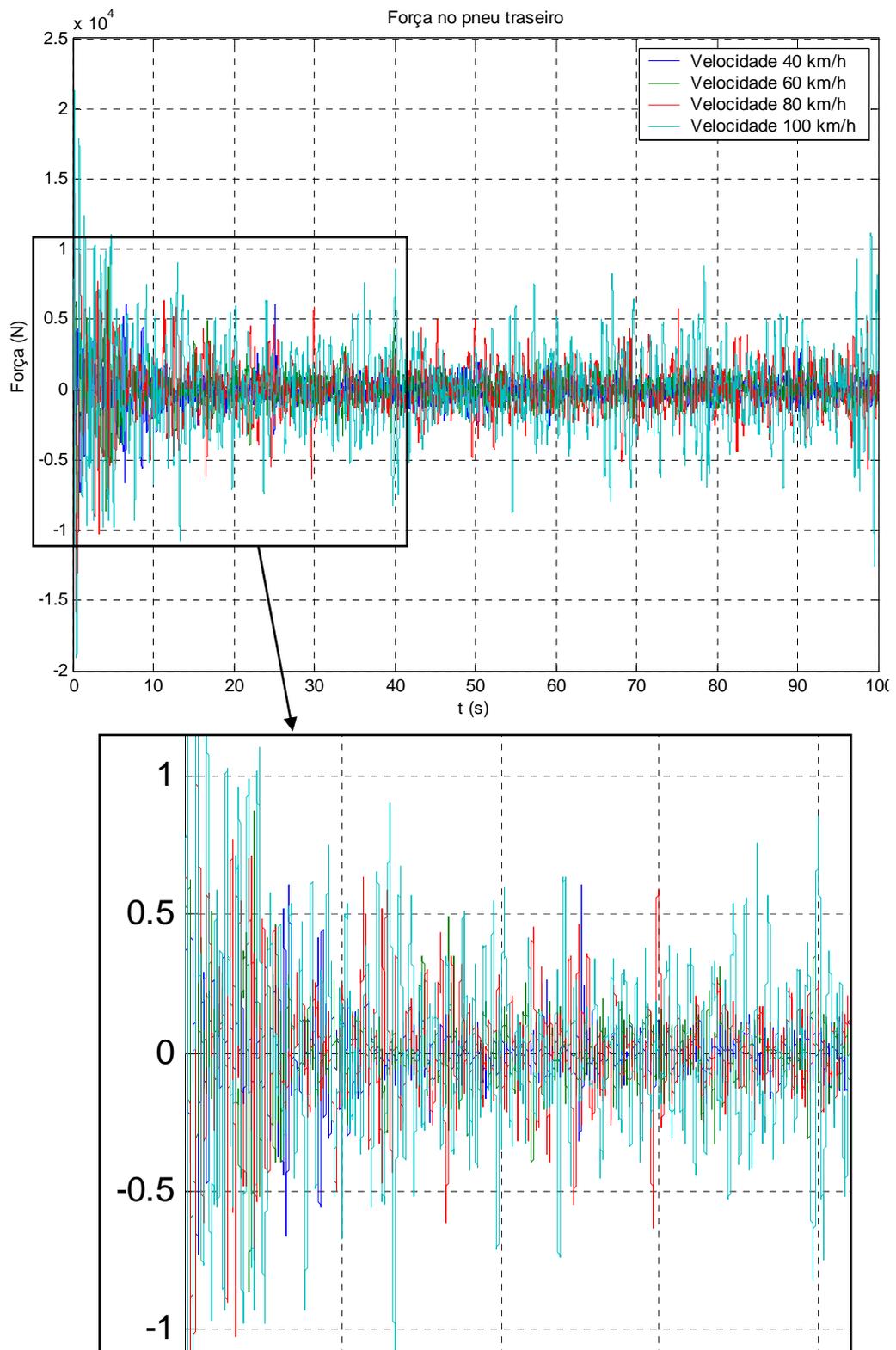


Gráfico 1: Força dinâmica no pneu traseiro para o modelo 1

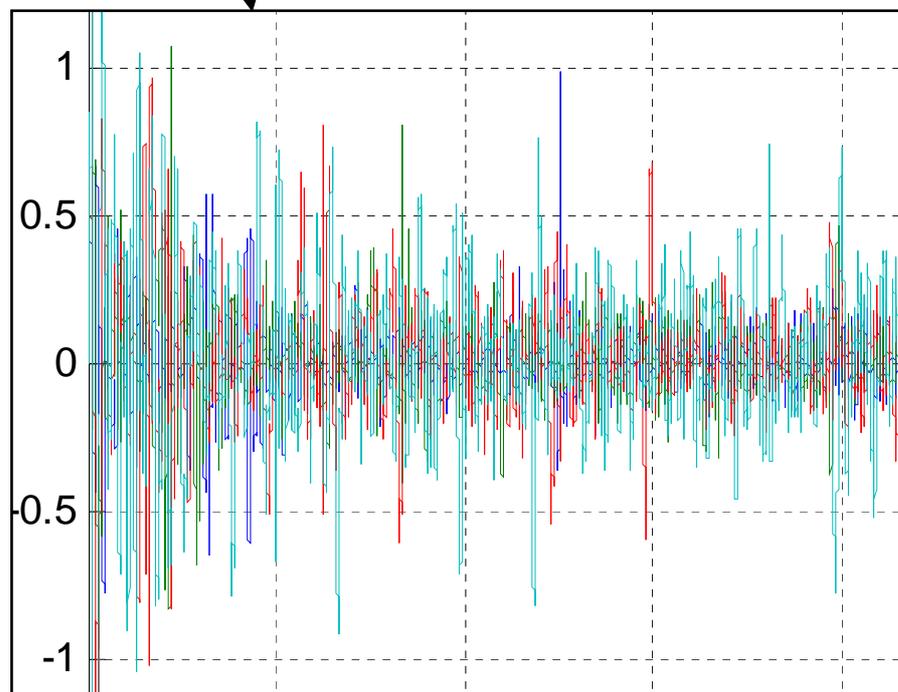
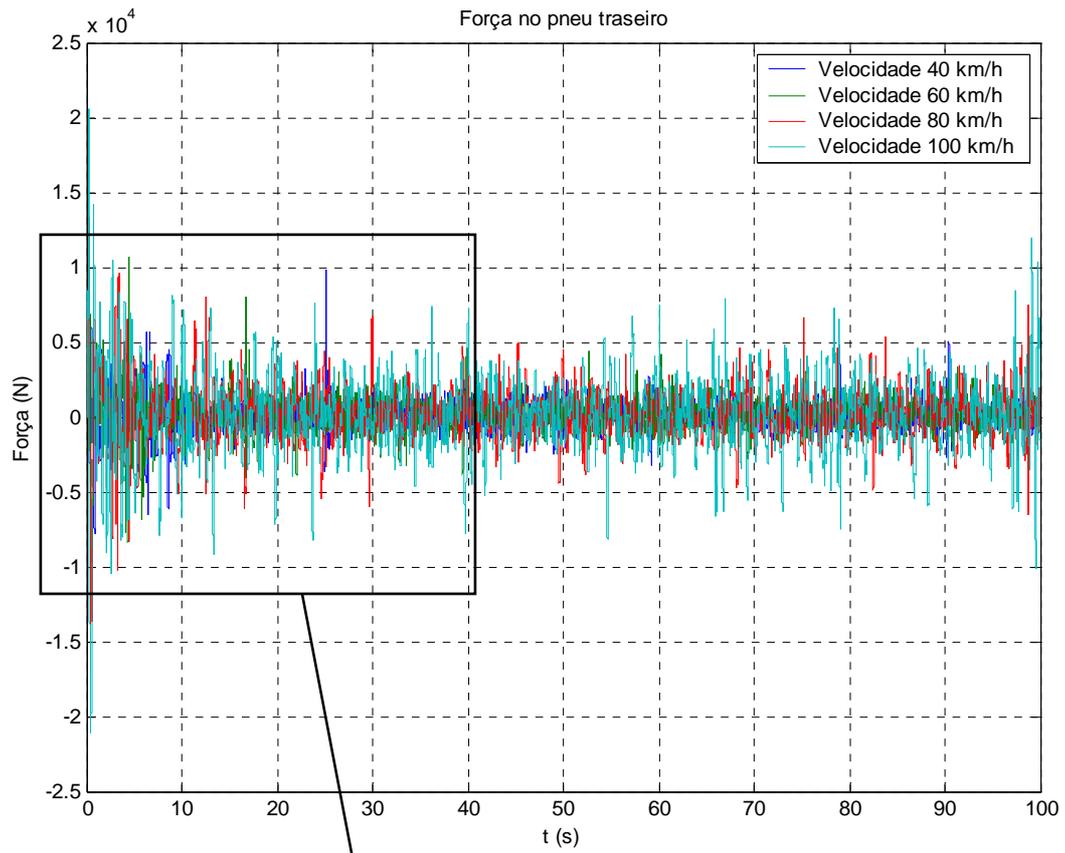


Gráfico 2: Força dinâmica no pneu traseiro para o modelo 2

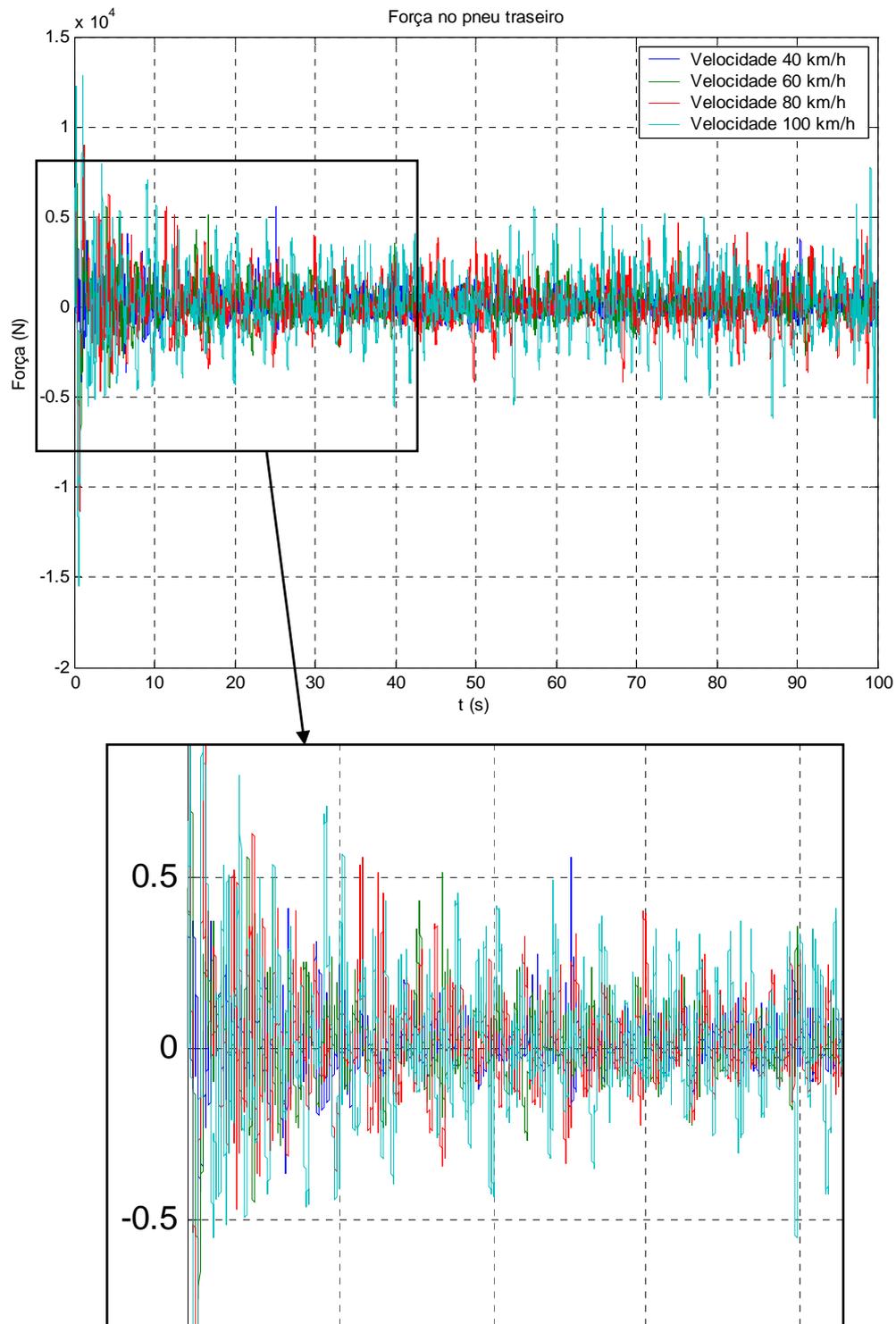


Gráfico 3: Força dinâmica no pneu traseiro para o modelo 3

Para efeito de comparar o efeito da suspensão traseira na força dinâmica no pavimento, um parâmetro comumente utilizado por vários autores para caracterizar o carregamento dinâmico é o Coeficiente Dinâmico de Carga (CDC – o coeficiente da variação da força no pneu), que pode ser definido por:

$$CDC = \frac{\phi F_{DP}}{F_{EP}} \quad (59)$$

Em que:

- ϕF_{DP} = Desvio padrão da força dinâmica no pneu
- F_{EP} = Força estática no pneu

Em condições normais de operação, valores típicos de CDC estão entre 0,1 e 0,3, entretanto Sweatman e Woodrooffe (1998 apud CEBON, 1999) encontraram valores de até 0,4 para suspensões particularmente ruins.

Utilizado-se das simulações realizadas, a partir das forças dinâmicas no pavimento calcula-se a média e o desvio padrão das forças no pavimento para o intervalo de tempo simulado. São apresentados na tabela 10 e no gráfico 4 os valores de CDC para os caminhões estudados.

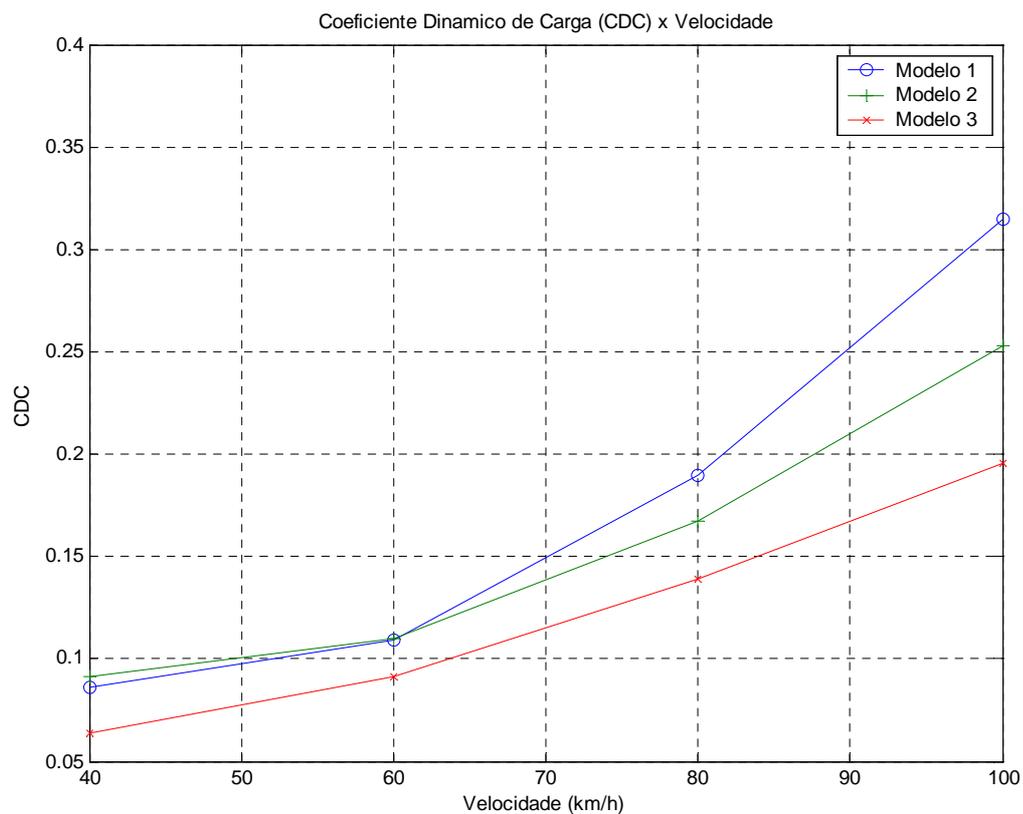


Gráfico 4: CDC x Velocidade

Tabela 10: Coeficiente dinâmico de carga

Velocidade (km/h)	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
40	0,0863	0,0917	0,0636
60	0,1095	0,1102	0,0913
80	0,1893	0,1670	0,1393
100	0,3146	0,2532	0,1954

Conforme mostrado no gráfico 4 e na tabela 10, para uma dada velocidade, o menor CDC é o do modelo 3, depois o modelo 2 e em seguida o modelo 1. Para as velocidades de maior interesse, 80 km/h e 100 km/h, no caso de 80 km/h o CDC do modelo 2 é 12% menor se comparado ao modelo 1 e o do modelo 3 é 17% menor em relação ao modelo 2. Para velocidade de 100 km/h o CDC do modelo 2 é 20% menor se comparado ao modelo 1 e o do modelo 3 é 23% menor em relação ao modelo 2.

As principais conclusões são que a força dinâmica no pneu oriunda do caminhão é menor para o caminhão com suspensão traseira a ar se comparado com aquele de suspensão traseira com feixe de molas metálicas e que, com o aumento da velocidade do caminhão, aumentam as forças dinâmicas no pneu

Nos gráficos 5 e 6 são apresentadas as forças dinâmicas no pneu traseiro para as velocidades de 80 km/h e 100 km/h em comparação com os 3 modelos estudados. Conforme discutido anteriormente, observa-se que para as duas velocidades o menor espectro de forças é o do modelo 3, depois vem o modelo 2 e em seguida o modelo 1.

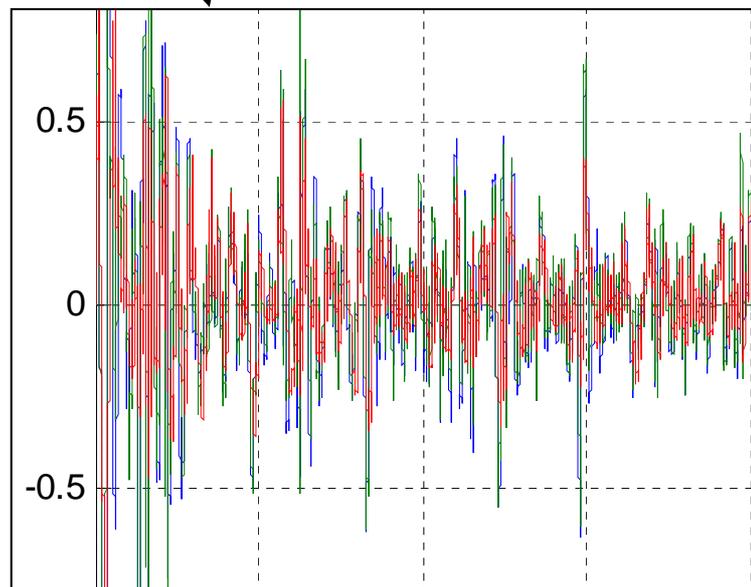
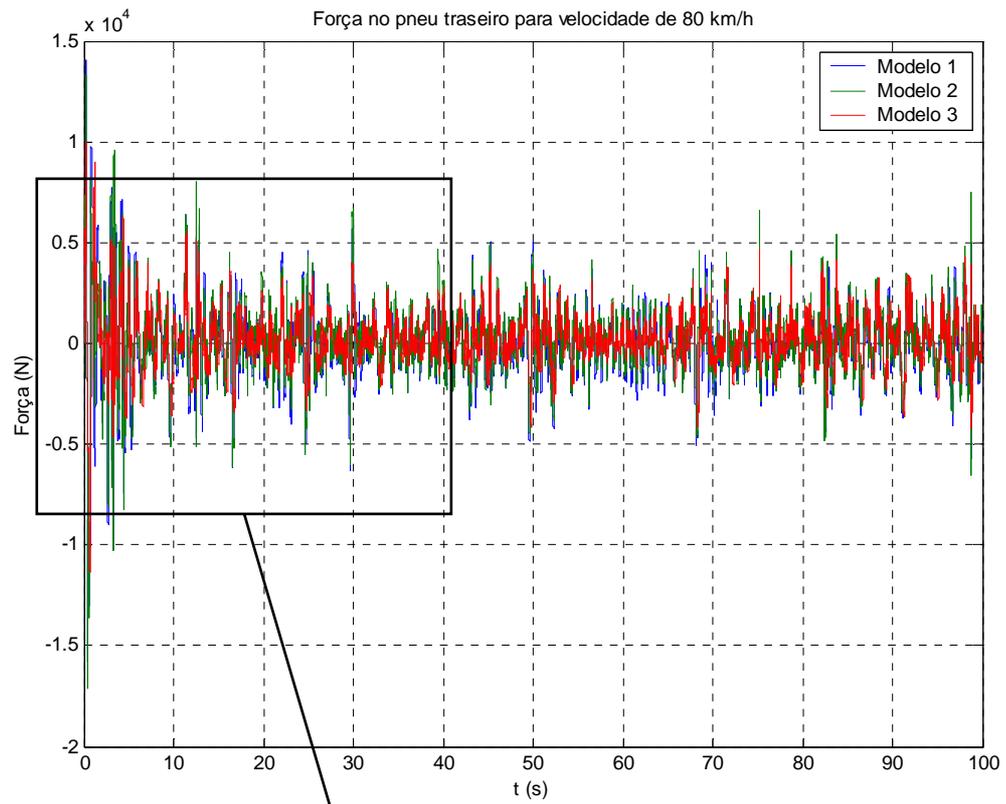


Gráfico 5: Força dinâmica no pneu traseiro para a velocidade de 80 km/h

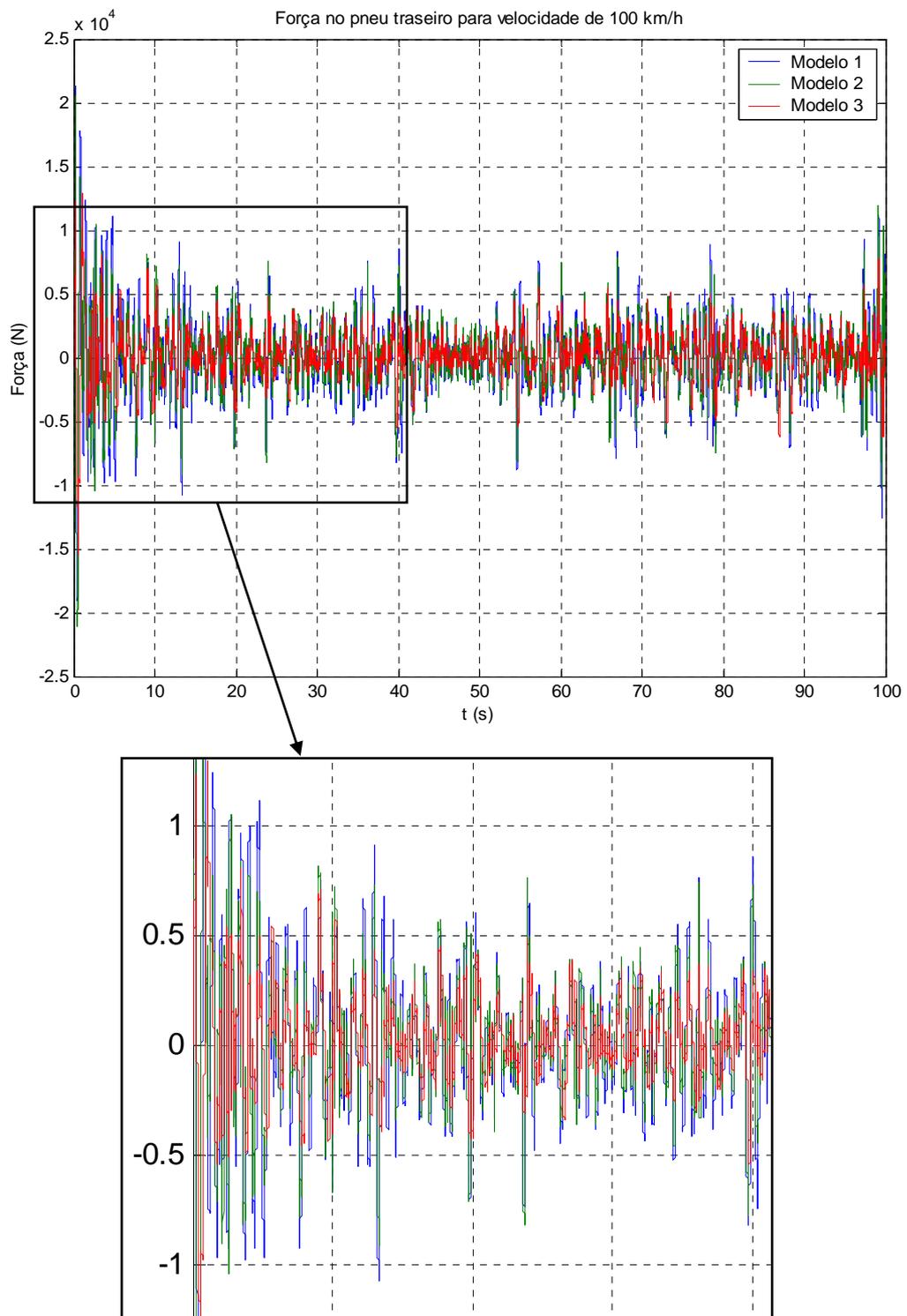


Gráfico 6: Força dinâmica no pneu traseiro para a velocidade de 100 km/h

4.2 Simulação do desempenho do pavimento

Para realização das simulações do desempenho do pavimento para os três veículos em estudo, utiliza-se o programa SisPav 2009 que foi desenvolvido com finalidade de dimensionamento de uma estrutura de pavimento ou da análise de vida de um projeto de pavimento. Neste trabalho de pesquisa utiliza-se do módulo de análise de vida de um projeto.

O programa foi desenvolvido por Franco (2007) em 2007 no COPPE/UFRJ e utilizam-se duas rotinas para calcular as tensões e deformações no pavimento: a AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas ou a EFin3D - Método dos Elementos Finitos Tridimensionais. E para estimar a vida de serviço do pavimento o programa utiliza-se de modelos mecanístico-empíricos.

A rotina AEMC processa os cálculos com base no programa JULEA, desenvolvido inicialmente por Jacob Uzan em 1978, e considera o comportamento elástico não linear dos materiais com a utilização das técnicas desenvolvidas por Rodrigues em 1998 e por Huang em 2003. Para isto, o programa divide as camadas de comportamento elástico não linear em três subcamadas e define os pontos de tensão na origem das coordenadas do carregamento ($x=y=0,00m$) e, verticalmente, no meio das subcamadas. No subleito, para todas as análises, os pontos verticais foram definidos a 0,075m; 0,225m; e 0,375m de profundidade, a partir do seu topo.

A rotina EFin3D foi desenvolvida aproveitando rotinas específicas do programa RIOPAVE, desenvolvido por Aedo em 1997 na PUC/RJ, e tendo como base o programa exemplo do curso de Introdução ao Método dos Elementos Finitos do Programa de Engenharia Civil da COPPE, com o objetivo de adaptar a técnica do MEF à particularidade da análise de estruturas de pavimentos. O EFin3D possui um módulo de pré-processamento que permite modelar o problema e gerar uma malha de forma automática, um módulo de processamento que calcula, pelo MEF, as tensões, deformações e deslocamentos nos nós e nos elementos da malha e, também, um módulo de pós-processamento que apresenta os resultados em forma de planilhas.

São duas opções de análise possíveis de serem realizadas. A primeira delas é o dimensionamento da estrutura, em que o programa analisa os dados de entrada e, por meio de 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 e opcionalmente o projetista pode solicitar as estimativas de afundamento de trilha de roda, os danos relativos à deflexão máxima na superfície do pavimento e à tensão limite no topo do subleito. Neste trabalho de pesquisa as simulações se restringem na verificação dos danos acumulados por fadiga, na estimativa de afundamento de trilha de roda e na estimativa da vida de serviço do pavimento. Para a estimativa da vida de serviço o programa utiliza-se do critério exclusivo dos danos acumulados por fadiga no revestimento asfáltico.

Para a previsão do comportamento da estrutura do pavimento o programa dispõe de nove modelos de previsão, são eles: Fadiga de misturas asfálticas; Fadiga de misturas de solo-cimento; Fadiga de materiais tratados com cimento; Deflexão admissível na superfície do pavimento; Deformação permanente de misturas asfálticas; Deformação permanente de materiais granulares; Deformação permanente de solos lateríticos; Deformação permanente de solos finos, siltosos ou argilosos; e Tensão limite no topo do subleito. Ao selecionar na lista o modelo desejado, o programa apresenta o nome do modelo de comportamento; a sua expressão de regressão matemática; os parâmetros da regressão; o fator campo-laboratório; e informações diversas como a fonte de referência, de onde se obteve o modelo e os parâmetros.

Neste trabalho de pesquisa, como é utilizado uma estrutura de pavimento definida por: revestimento asfáltico, base de material granular, sub-base de material granular e subleito, os seguintes modelos de previsão são utilizados: Fadiga de misturas asfálticas; Fadiga de misturas de solo-cimento, Deformação permanente de misturas asfálticas e Deformação permanente de materiais granulares. São apresentados na tabela 11 os modelos de previsão utilizados neste trabalho.

Tabela 11: Modelos de previsão de desempenho utilizados nas simulações

Descrição do modelo de previsão	Modelo de previsão
Fadiga de misturas asfálticas	$N_{lab} = 1,904 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,821} \cdot \left(\frac{1}{M_R}\right)^{0,74}$
Fadiga de misturas de solo-cimento	$\%RF = a + b \cdot \log(N_f)$ $\varepsilon_t = a + b \cdot \log(N_f)$
Deformação permanente de misturas asfálticas Deformação permanente de materiais granulares	$\frac{\varepsilon_p(N)}{\varepsilon_R} = \mu \cdot (N)^{-\alpha}$ $\mu = \frac{A \cdot B}{\varepsilon_R}$ $\alpha = 1 - B$

O programa SisPav 2009 utiliza-se como de entrada para o sistema, as seguintes informações:

- a. Estrutura do pavimento: definem-se o tipo de material, espessura da camada, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e a condição de aderência de cada camada do pavimento. O subleito do pavimento é representado na última camada com a sigla SL e sua espessura deverá ser representada com um valor nulo;
- b. Tráfego de projeto: definem-se os eixos previstos para o tráfego de projeto com informações de volume anual inicial, a taxa de crescimento, o peso ou a pressão dos pneus;
- c. Clima: define-se o local onde existe ou será construída a estrutura do pavimento e o programa busca no seu banco de dados as temperaturas médias mensais do ar do local e caso o local do projeto não se encontre disponível no banco de dados interno do programa, as informações deverão ser inseridas manualmente. Outra informação importante a ser definida é o mês do ano em que houve a abertura do tráfego.

Para as simulações realizadas neste trabalho de pesquisa, utilizou-se como local de referência para o pavimento à cidade de São Paulo. Na tabela 12 são apresentadas as temperaturas médias mensais do ar utilizadas nas simulações.

Tabela 12: Temperaturas médias mensais na cidade de São Paulo

	Mês	Temperatura (°C)
1	Janeiro	23,9
2	Fevereiro	24,2
3	Março	23,8
4	Abril	22,2
5	Maio	18,9
6	Junho	18,4
7	Julho	17,7
8	Agosto	19,4
9	Setembro	19,9
10	Outubro	21,6
11	Novembro	22,0
12	Dezembro	23,4

Conforme apresentado por Fernandes (2006), três tipos de estrutura de pavimentos são usualmente encontrados no Brasil: BR01 para o tráfego pesado, BR02 para o tráfego médio e BR03 para o tráfego leve. Neste trabalho, para as simulações de desempenho do pavimento são utilizadas a estrutura de pavimento tipo BR01, caracterizado para o tráfego pesado, o qual é a condição para os caminhões estudados. São mostradas na tabela 13 as propriedades mecânicas do pavimento tipo BR01.

Tabela 13: Propriedades mecânicas do pavimento tipo BR01

Camada	Espessura (H)	Módulo de elasticidade (E)	Coefficiente de Poisson (ν)
Revestimento	7,5 cm	4000 MPa	0,30
Base	7,5 cm	3000 MPa	0,30
Sub-base	25,0 cm	350 MPa	0,40
Subleito	-	70 MPa	0,45

Fonte: Fernandes et al, 2009.

Como entrada do carregamento do tráfego para o programa, utiliza-se o eixo do tipo simples com 4 pneus. Define-se uma taxa de crescimento do tráfego de 5%, com um volume de repetições anual de 365.000 para o primeiro ano. Esse valor representa 1000 repetições diárias de carregamento e equivale ao número N de $8,29 \times 10^7$ de repetições do eixo padrão, conforme método do DNIT.

Utilizam-se como valores de carga no eixo, as forças dinâmicas no eixo traseiro previamente calculadas no programa Matlab-Simulink através dos modelos mecânicos da dinâmica vertical dos caminhões. É utilizada a força máxima encontrada dentro do intervalo

onde os caminhões foram simulados. São mostradas na tabela 11 as forças utilizadas nas simulações.

Tabela 13: Forças dinâmicas no eixo traseiro dos caminhões estudados

Velocidade	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
40 km/h	11250 kg	12013 kg	11136 kg
60 km/h	11800 kg	12193 kg	11453 kg
80 km/h	12870 kg	12723 kg	12036 kg
100 km/h	14356 kg	14193 kg	12628 kg

Realizadas as simulações do desempenho do pavimento para os 3 caminhões estudados nas 4 velocidades de interesse, o programa SisPav 2009 resulta como saída do sistema as informações de: vida de serviço estimada, em anos; trincas por fadiga nas direções X e Y, em % e deformação permanente, em cm. São apresentados nas tabelas 14, 15 e 16 e nos gráficos 7, 8, 9 e 10 os resultados das simulações realizadas:

Tabela 14: Vida de serviço estimada do pavimento, em anos

Velocidade	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
40 km/h	47,7	42,8	48,5
60 km/h	44,0	41,7	46,3
80 km/h	38,2	38,9	42,6
100 km/h	32,0	32,6	39,4

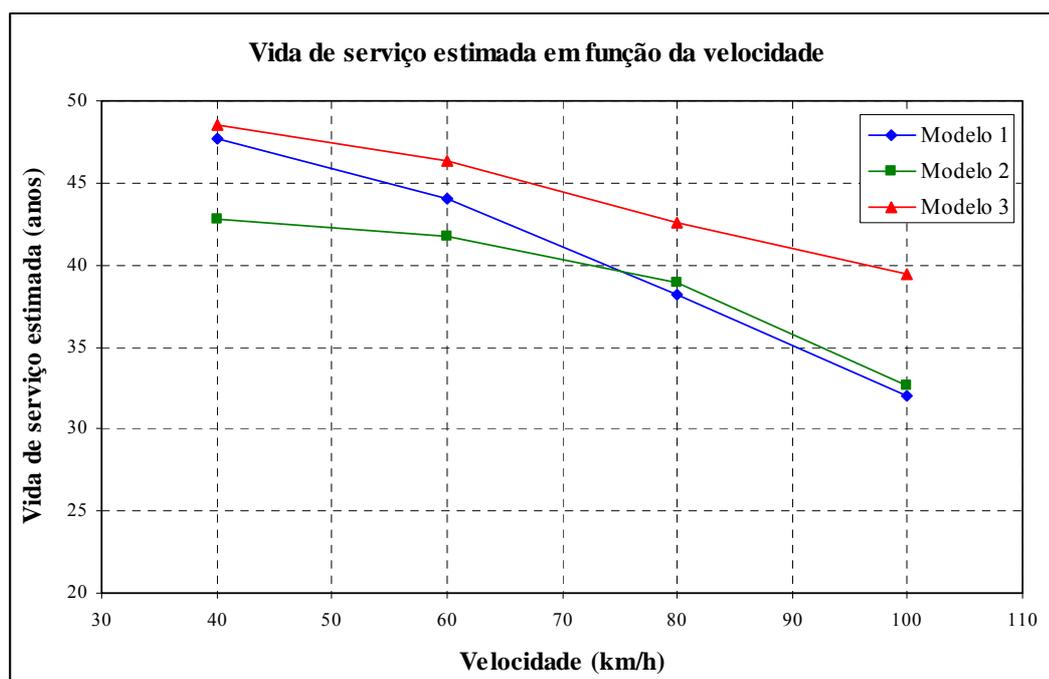


Gráfico 7: Vida de serviço estimada do pavimento, em anos

Conforme mostrado no gráfico 7 e na tabela 14, o modelo 3 apresenta a maior estimativa de vida em serviço independente da velocidade do caminhão. Para as velocidades de maior interesse, 80 km/h e 100 km/h, no caso de 80 km/h a estimativa de vida do pavimento do modelo do modelo 3 é 10% maior se comparado ao modelo 2 e 12% maior em relação ao modelo 1. Para velocidade de 100 km/h a estimativa de vida do modelo 3 é 21% maior se comparado ao modelo 2 e 23% maior em relação ao modelo 1.

Tabela 15: Trincas por fadiga no pavimento, em %

Velocidade	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
40 km/h	41,96	46,76	41,25
60 km/h	45,40	47,92	43,22
80 km/h	52,37	51,39	46,91
100 km/h	62,55	61,41	50,76

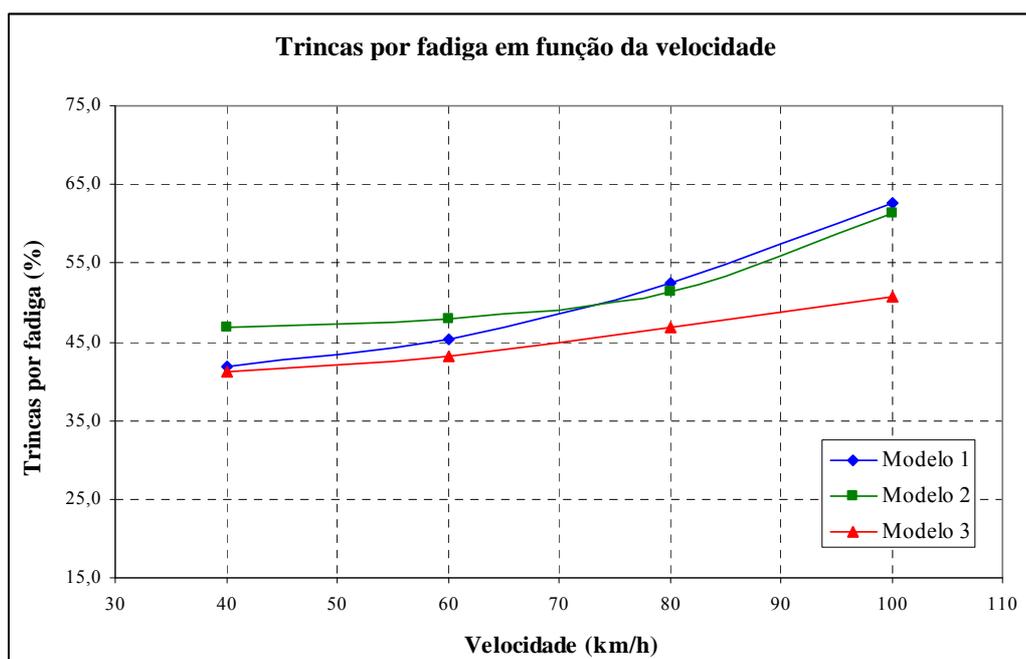


Gráfico 8: Trincas por fadiga no pavimento, em %

Pode-se verificar no gráficos 8 e na tabela 15 os dados sobre a ocorrência de trincas no pavimento. Observa-se que o modelo que causa menos trincas no pavimento é o modelo 3. Na velocidade 80 km/h as trincas do modelo 3 é 9% menor se comparado ao modelo 2 e 10% menor em relação ao modelo 1. Para velocidade de 100 km/h, as trincas do modelo 3 é 17% menor se comparado ao modelo 2 e 19% em relação ao modelo 1.

Tabela 16: Deformação permanente, em cm

Velocidade	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
40 km/h	1,095	1,165	1,083
60 km/h	1,148	1,182	1,115
80 km/h	1,250	1,236	1,167
100 km/h	1,385	1,370	1,225

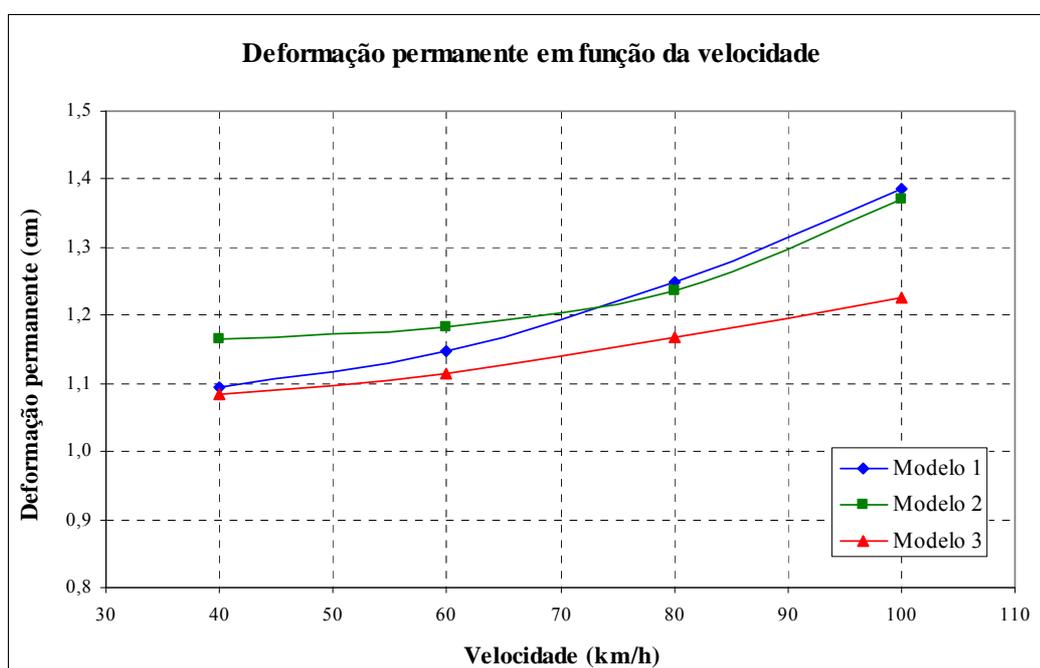


Gráfico 9: Deformação permanente, em cm

De acordo como os resultados apresentado no gráfico 9 e na tabela 16, a deformação permanente no pavimento é menor para o modelo 3. Na velocidade de 80 km/h, se comparado o modelo 3 ao modelo 2 têm-se uma redução de 6% e se comparado o modelo 3 ao modelo 1 têm-se uma redução de 7%. Para velocidade de 100 km/h, a deformação permanente no pavimento do modelo 3 é 11% menor se comparado ao modelo 2 e 12% menor em relação ao modelo 1.

Analisando os resultados das simulações do desempenho do pavimento, pode-se concluir que, têm-se um aumento da vida de serviço do pavimento se utilizado um caminhão com suspensão traseira a ar em comparação ao caminhão com suspensão traseira com mola metálica. Esse aumento de vida de serviço do pavimento varia em função da velocidade do

caminhão. Na velocidade de 80 km/h, têm-se um aumento médio de 4 anos na vida do pavimento e na velocidade de 100km/h têm-se uma aumento médio de 7 anos.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A análise do conteúdo do trabalho desenvolvido permite apresentar as seguintes conclusões:

- a. Os valores encontrados de coeficiente dinâmico de carga para os três modelos estudados mostram-se compatíveis com valores de referência de outros autores.
- b. O caminhão com suspensão traseira a ar se mostrou o que proporciona a menor força dinâmica ao pavimento, conseqüentemente menor degradação do pavimento. Se comparado com os modelos com suspensão traseira metálica a redução média é de 37% para a velocidade de 80 km/h e de 63% para a velocidade de 100 km/h.
- c. O efeito da velocidade do caminhão se mostrou uma variável importante para o cálculo das forças dinâmicas no pavimento. Quanto maior for a velocidade do veículo, maior será a força dinâmica no pavimento. Com uma variação da velocidade do caminhão de 60 km/h para 80 km/h, têm-se um aumento de 40% da força dinâmica no pavimento. E com uma variação da velocidade de 80 km/h para 100 km/h, têm-se um aumento de 52% da força dinâmica para os caminhões com suspensão traseira metálica e de 29% para o caminhão com suspensão traseira a ar.
- d. Observou-se comparando os modelos 1 e 2, que o uso da modelagem do comportamento não linear dos amortecedores hidráulicos se mostrou divergente em função da velocidade do caminhão. Para as velocidades de 40 km/h e 60 km/h, o modelo 2 apresentou as maiores forças dinâmicas no pavimento, mas para as velocidades de 80 km/h e 100 km/h, o modelo 1 apresentou as maiores forças dinâmicas no pavimento.
- e. Nas simulações do desempenho do pavimento para os caminhões estudados, obteve-se um aumento da vida de serviço do pavimento se utilizado um caminhão com suspensão traseira a ar em comparação ao caminhão com suspensão traseira com mola metálica. Esse aumento de vida de serviço do pavimento varia em função da velocidade do caminhão. Na velocidade de 80

km/h, têm-se um aumento médio de 4 anos na vida do pavimento e na velocidade de 100km/h têm-se uma aumento médio de 7 anos.

O assunto abordado na presente dissertação, é amplo e possui elevado grau de complexidade. Esta condição, antes de ser um obstáculo, é estimulante e constitui um bom desafio para quem pretende trabalhar nesta área. No sentido de colaborar com a evolução do estado do conhecimento existente, apresentam-se a seguir algumas sugestões para estudos futuros:

- a. Para validar os modelos mecânicos da dinâmica vertical do caminhão, faz-se necessária à obtenção de dados experimentais das forças dinâmicas no pavimento numa pista de teste e comparação com os dados das simulações.
- b. Modelar a dinâmica vertical de outros tipos de caminhões utilizados no Brasil, para ampliar a gama de caminhões nas simulações do desempenho do pavimento, a fim de ter uma simulação mais realista do tráfego.
- c. Na literatura pesquisada observou-se uma falta de padronização de estruturas de pavimento para as rodovias brasileiras. Nesse sentido, faz-se necessário uma pesquisa para verificar as principais estruturas de pavimentos utilizadas no Brasil e seus métodos de dimensionamento.
- d. Simular o desempenho de pavimentos analisando o efeito de outras variáveis que interagem no sistema de interação caminhão-pavimento, tais como: efeito da irregularidade longitudinal do pavimento, efeito da pressão dos pneus, efeito do tipo de configuração de pneus no eixo, efeito do clima e efeito da estrutura de pavimento do tráfego.

REFERÊNCIAS

- ALBANO, J. F. **Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos**. 2005. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Disponível em <http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/20_TeseAlbano.pdf>. Acesso em 03 mar. 2009.
- ALBANO, J. F. **Efeitos da variação da carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento**. 1998. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Disponível em <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2209/000227875.pdf>>. Acesso em 03 mar. 2009.
- AL-KHATEEB, G.; GIBSON N.; XICHENG, Q. Mechanistic Analyses of FHWA's Accelerated Loading Facility Pavements - Primary Response. **Transportation Research Record**, EUA, n.1990, p.150-161, 2007. Disponível em <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2209/000227875.pdf>>. Acesso em 03 mar. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCESSIONÁRIAS DE RODOVIAS – ABCR. **Quem somos**. Disponível em <<http://www.abcr.org.br/inst/index.html>>. Acesso em 18 fev. 2009.
- AHMED, A. K. W.; RAKHEJA, S. An equivalent linearization technique for the frequency response analysis of asymmetric dampers. **Journal of Sound and Vibration**, UK, v.153, n.3, p.537-542, dez. 1992.
- CEBON, D. **Interaction Between Heavy Vehicles and Roads**. Society for Automotive Engineers (LR Buckendale Lecture). 1993. Disponível em <http://www-mech.eng.cam.ac.uk/trg/publications/downloads/veh_road/veh_road11.pdf>. Acesso em 1 ago. 2007.
- CEBON, D. **Handbook of Vehicle – Road Interaction**. Swets and Zeitlinger Publishers, Lisse, 1999.
- CEBON, D. Theoretical road damage due to dynamic tyre forces of heavy trucks. Part 1: dynamic analysis of vehicles and road surfaces. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, UK, v. 202, n. C2, p.103-108, 1988.
- CLARK, S. K. **Mechanics of Pneumatic Tires**. US DEPARTMENT OF TRANSPORTATIO. 1981.
- COELHO, V. **Contribuição ao Estudo das Deformações Permanentes, nas Condições do Brasil, em Camadas de Concreto Asfáltico de Pavimentação**. 1996. 316 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- COLE, D.J.; CEBON, D. Influence of tractor-trailer interaction on assessment of road damaging performance. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, UK, v.212, n.1, p1-10, 1998. Disponível em <http://www-mech.eng.cam.ac.uk/trg/publications/downloads/veh_road/veh_road20.pdf>. Acesso em 1 ago. 2007
- COLE, D.J.; CEBON, D. **Truck tires, suspension design and road damage**. In: PROC. INTERNACIONAL RUBBER CONFERENCE, 1996, Manchester, UK. **Anais eletrônico...**

Disponível em: < http://www-mech.eng.cam.ac.uk/trg/publications/downloads/veh_road/veh_road17.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2007.

COLLOP, A. C.; CEBON, D. Effects of 'Road Friendly' suspension on long-term flexible pavement performance. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, UK, v.211, n.6, p.411-424, jan. 1997. Disponível em < http://www-mech.eng.cam.ac.uk/trg/publications/downloads/veh_road/veh_road19.pdf>. Acesso em 18 ago. 2007

COLLOP, A. C.; CEBON, D. A parametric study of factors affecting flexible pavement performance. **Journal of Transportation Engineering**, EUA, v.121, n.6, p.485-494, nov. 1995. Disponível em <http://www-mech.eng.cam.ac.uk/trg/publications/downloads/veh_road/veh_road15.pdf>. Acesso em 18 ago. 2007

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **PNV/2003**. Disponível em <<http://www.dnit.gov.br>>. Acesso em 18 fev. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **Norma DNIT 005/2003 – TER Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia**. Disponível em <<http://www.dnit.gov.br>>. Acesso em 13 mai. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. 1998.

ESSE, V.; RODRIGUES, R. M. **Análise crítica de modelo mecânico-empíricos para previsão de desempenho de pavimentos flexíveis com base no experimentos LTPP-FHWA-DATAPAVE 2.0**. 2003. Disponível em <<http://www.bibl.ita.br/ixencia/artigos/Infra08.pdf>>. Acesso em 13 mai. 2009.

EVANGELISTA JR., F. **Análise quasi-estática e dinâmica de pavimentos asfálticos**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: < www.det.ufc.br>. Acesso em: 10 mai. 2009.

FERNANDES JR., J. L.; PAIS, J. C.; PEREIRA, P. A. A. Effects of traffic loading factors on the performance of Portuguese and Brazilian pavements. In: Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2006, Washington, D.C., EUA. **Anais eletrônico...** Disponível em: < <http://www.mrr.dot.state.mn.us/research/apt/data/g02-03.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2009.

FERREIRA, H. T. **Determinação das frequências naturais e modos de vibrar de um veículo de dois eixos através de um programa computacional Matlab – Simulink**. 2003. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mecânica Automobilística). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

FRANCO, F. A. C. P. **Um sistema para análise mecânica de pavimentos flexíveis**. 2000. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://www.pavimentacao.ufjf.br/Filipe%20A%20C.%20P.%20Franco%20MSc%202000.PDF>>. Acesso em: 15 ago. 2009.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em:

- <http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/doutorado/geotecnia/2007/Teses/FRANCO_FACP_07_t_D_g eo.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2009.
- FU, T.-T.; CEBON, D. Economic evaluation and the design of vehicle suspensions. **International Journal of Vehicle Design**, v.31, n.2, p.125-161, 2003. Disponível em: <http://www.cvdc.org/recent_papers/FuCebon_IJVD01.pdf>. Acesso em: 2 mai. 2007.
- FU, T.-T.; CEBON, D. Analysis of a truck suspension database. **International Journal of Vehicle Design**, v.19, n.4, p.281-297, 2002. Disponível em: <http://www.cvdc.org/recent_papers/FuCebon_IJVD02.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2008.
- GILLESPIE, T. D. et al. **Effects of heavy vehicle characteristics on pavements response and performance – Final report**. Ann Arbor, Michigan, EUA. 1992. Disponível em: <<http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/996>>. Acesso em: 12 fev. 2009.
- GONÇALVES, F. J. P. **Estudo do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados**. 2002. 507 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Disponível em <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2300/000367657.pdf>>. Acesso em 03 mar. 2009.
- GONÇALVES, F. J. P. **O desempenho dos pavimentos flexíveis**. 1999. Disponível em <<http://usuarios.upf.br/~pugliero/arquivos/09.pdf>>. Acesso em 25 mai. 2009.
- GUIA DO TRANSPORTADOR RODOVIÁRIO DE CARGAS. **Matriz do Transporte de Cargas no Brasil**. Disponível em < <http://www.guiadotrc.com.br/infra/matriztcargas.asp>>. Acesso em 23 fev. 2009.
- HADI, M. N. S.; BODHINAYAKE, B. C. Non-linear finite element analysis of flexible pavements. *Advances in Engineering Software*, EUA, v.34, n.11-12, p.657-662, dez. 2003.
- KITCHING, K.J. COLE, D.J. CEBON, D. Performance of a semi-active damper for heavy vehicles. **Journal of Dynamic Systems Measurement and Control**, EUA, v.122, n.3, p.498-506, set. 2000. Disponível em:<http://www-mech.eng.cam.ac.uk/trg/publications/downloads/susp_adv/adv_susp10.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2008.
- KIRSTEIN, J. C. **Suspension system optimization to reduce whole body vibration exposure on an articulated dump truck**. 2005. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). StellenBosch University, Matieland, África do Sul. Disponível em: <<http://etd.sun.ac.za/jspui/bitstream/10019/294/2/Kirst2.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2008.
- KISING, A.; GOHLICH, H. Dynamic characteristics of large tyres. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.43, p.11-21, jan. 1989.
- LOPES, S. S.; CARDOSO, M. P.; PICCININI, M. S. O Transporte Rodoviário de Carga e o Papel do BNDES. **Revista do BNDES**. Rio de Janeiro. v.14, n.29, p.35-60, jun. 2008.
- MRAD, N. EL-GINDV, M. KENIS, W. **Effects of wheel-load spatial repeatability on road damage: a Literature review**. 1998. Federal Highway Administration / National Research Council of Canada. Disponível em:< <http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/013165.pdf>>. Acesso em: 2 fev. 2008.
- MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1987. 380 p.

MERIGHI, J. V. **Estudo da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas em Ensaios de Laboratório**. 1999. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

MERIGHI, J.V. **Curso: Estradas II Estruturas de Pavimento**. Disponível em <http://meusite.mackenzie.com.br/pavimento/PDF/Estradas_2_Aula_01.pdf>. Acesso em 27 abr. 2009.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment (DIVINE Project) – Technical report**. 1998. 151 f. Paris, France. Disponível em <<http://www.oecd.org/dataoecd/8/57/2754406.pdf>>. Acesso em 27 abr. 2008.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment (DIVINE Project) – Policy Implications**. 1998. 55 f. Paris, France. Disponível em <<http://www.oecd.org/dataoecd/9/22/2754516.pdf>>. Acesso em 27 abr. 2008.

POTTER, T. E. C.; COLE, D.J.; CEBON, D. Using Parameter Estimation to Assess Road Damage. In: Proc. 14th IAVSD Symposium on the Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, 1995, Ann Arbor, Michigan, EUA. **Anais eletrônico...** Disponível em: <<http://www-mech.eng.cam.ac.uk/trg/publications/downloads/damage/damage8.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2008.

POTTER, T. E. C.; COLE, D.J.; CEBON, D.; COLLOP, A. C. Road damage due to dynamic tire forces, measured on a public road. **International Journal of Vehicle Design**, v.3, n.1-4, p.346-362, 1996. Disponível em: <http://www-mech.eng.cam.ac.uk/trg/publications/downloads/veh_road/veh_road13.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2008.

POTTER, T. E. C.; COLE, D.J.; CEBON, D. Assessing 'Road-Friendliness': a Review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, UK, v.211, n.6, p.455-475, 1997. Disponível em: <http://www-mech.eng.cam.ac.uk/trg/publications/downloads/veh_road/veh_road18.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2008.

PRESTHUS, M. **Derivation of air spring model parameters for train simulation**. 2002. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física). Lulea University of Technology, Lulea, Suécia. Disponível em: <<http://epubl.luth.se/1402-1617/2002/059/LTU-EX-02059-SE.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2008.

RAJ, R. I. S. **Influence of road roughness and directional maneuvers on the dynamic performance of heavy vehicles**. 1998. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Concordia University, Montreal, Quebec, Canadá.

RAJALINGHAM, C.; RAKHEJA, S. Influence of suspension damper asymmetry on vehicle vibration response to ground excitation. **Journal of Sound and Vibration**, UK, v.266, n.5, p.1117-1129, 2003.

REGISTRO NACIONAL DE ACIDENTES E ESTATÍSTICAS DE TRANSITO - RENAEST. **Anuário RENAEST 2006**. Disponível em <<http://201.24.24.73:8080/renaest/inicio.do>>. Acesso em 04 mar. 2009.

SÁ, M. F. P. **Contribuição ao estudo da Influência do tráfego na infraestrutura viária com misturas asfálticas para corredores de ônibus.** 2003. 248 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em <<http://www.pavimentacao.ufjf.br/Maria%20F.%20P.%20Sa%20DSc%202003.pdf>>. Acesso em 15 abr. 2009.

SCANIA LATIN AMERICA. **Mätning av vägprofil: Väg 850 Falun - Svärdsjö.** 1996. Acesso restrito.

SCHROEDER, E. M.; CASTRO, J. C. Transporte Rodoviário de Carga: Situação Atual e Perspectivas. **Revista do BNDES.** Rio de Janeiro. n. 6. p.173-188, dez. 1996.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** São Paulo: Pini, 1997-2001. 2 v.

Shanghai Komman Vehicle Component Systems. **Products.** Disponível em <http://komman.en.alibaba.com/productshowimg/51011606_50177424/Single_Drive_Four_Airbags_Air_Suspension.html>. Acesso em 18 fev. 2008.

SIMÕES, L. R. **Estudo de uma suspensão pneumática semi-ativa não-linear para veículos de carga basead em lógica fuzzy.** 2005. 99 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

SIMON, D. E. **Experimental Evaluation of Semiactive Magnetorheological Primary Suspensions for Heavy Truck Applications.** 1998. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, EUA. Disponível em <<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-91898-203427>>. Acesso em 04 ago. 2008.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **Manual on design and application of leaf springs.** 1980.

VIERA, C. S. **Desempenho de um pavimento flexível solicitado por simulador de tráfego.** 2002. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Disponível em <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3295/000335566.pdf>>. Acesso em 03 mar. 2009.

YI, K. HENDRICK, J.K. Active and Semi-Active Heavy Truck suspension to reduce pavement damage. **SAE Transactions**, EUA, v. 892486 (SP 802), p.29-36, 1989. Disponível em <<http://www.uctc.net/papers/027.pdf>>. Acesso em 03 abr. 2008.

RAJALINGHAM, C.; RAKHEJA, S. Influence of suspension damper asymmetry on vehicle vibration response to ground excitation. **Journal of Sound and Vibration**, UK, v.266, n.5, p.1117-1129, 2003.

YI, K. HENDRICK, J.K. The Effect of Alternative heavy truck suspension on flexible pavement response. Second International symposium on heavy vehicle weights and dimensions, 1989, Kelowna, British Columbia, Canada. **Anais eletrônico...** Disponível em <<http://www.uctc.net/papers/046.pdf>>. Acesso em 03 abr. 2008.

YI, K. WARGELIN, M. HENDRICK, J.K. Dynamic Tire Force Control by semi-active suspensions. **Journal of Dynamic Systems Measurement and Control**, EUA, v.115, n.3, p.465-474, 1993. . Disponível em <<http://www.uctc.net/papers/097.pdf>>. Acesso em 03 abr. 2008.

WASHINGTON STATE OF DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - WSDOT.
Pavement guide. Disponível em <http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/09_pavement_evaluation/09-7_bodyhtm>. Acesso em 18 fev. 2009.