Campus de São Carlos

*EFEITO DAS CARGAS DINÂMICAS DOS VEÍCULOS RODOVIÁRIOS
NO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS E PONTES*

RONE EVALDO BARBOSA

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ LEOMAR FERNANDES JUNIOR

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Transportes

**Efeito das Cargas Dinâmicas dos Veículos
Rodoviários no Desempenho dos
Pavimentos e Pontes**

Rone Evaldo Barbosa

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior

São Carlos / SP
1999

Class.	TESE
Cutt.	0609
Tombo	0160/99

S/S 1047767

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B238e Barbosa, Rone Evaldo
Efeito das cargas dinâmicas dos veículos
rodoviários no desempenho dos pavimentos e pontes /
Rone Evaldo Barbosa. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior.

1. Cargas dinâmicas. 2. Desempenho de pavimentos.
3. Pontes. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **RONE EVALDO BARBOSA**

Dissertação defendida e aprovada em 06.08.99
pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **GLAUCO TULIO PESSA FABBRI (Substituto)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Profa. Dra. **LIEDI LEGI BARIANI BERNUCCI**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)

Prof. Dr. **ANTONIO CARLOS CANALE**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Assoc. **ANTÔNIO NELSON R. DA SILVA**
Coordenador da Área de Transportes

Prof. Assoc. **RENATO VAIRO BELHOT**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC
em exercício

*A minha família,
motivo de minha dedicação.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior, pela orientação dedicada a este trabalho, pela amizade e confiança na minha capacidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, na forma de bolsa de estudo e reserva técnica, concedido para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos Canale pela amizade e inestimável ajuda no esclarecimento de conceitos relativos às simulações.

Ao Prof. Dr. João Alexandre Widmer, pelas sugestões apresentadas, pela amizade e apoio à minha permanência na Cidade de São Carlos. Agradecimento este, estendido também ao amigo Eng. Mestre Ricardo Almeida de Melo.

Ao Prof. Dr. Glauco Túlio Pessa Fabbri pela amizade e inestimável ajuda no esclarecimento de alguns conceitos e pelas sugestões apresentadas.

Ao Eng. Mestre Sérgio Henrique Demarchi e ao Prof. Dr. José Reynaldo A. Setti, pelos dados fornecidos, que muito contribuíram para o engrandecimento deste trabalho.

À Mercedes-Benz do Brasil S.A. pelo fornecimento das características de seus veículos de carga, que foram simulados neste trabalho.

Aos professores do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, os quais merecem o meu respeito e admiração, pela contribuição ao meu crescimento profissional e pessoal.

Aos Funcionários do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, pelo apoio técnico e administrativo.

Aos amigos da Pós-Graduação do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, pela convivência e amizade demonstrada a todo momento.

Aos amigos: Rita, Barra, Ricardinho, Zé Luiz, Mateus, Juninho, Beraba, Fábio, Marcos e Júnior, pelos momentos de alegria compartilhados através das melodias que juntos cantamos.

À minha cunhada Socorro, meus sobrinhos Rodrigo e Roberta, minha irmãzinha Carol e meus “irmãozinhos” Taninha, Caio e Camargo, por sermos uma grande família.

À Marlúcia, pela amizade e pelo carinho e calorosa companhia dada ao meu “Velho”, além da alegria de conceder-nos o mais novo e precioso “tesouro” da família, a minha irmãzinha Ritinha.

Aos meus irmãos Renato, Ronaldo e Roberto, meus grandes incentivadores, por tantos momentos de alegrias compartilhados através da amizade e respeito, desde a nossa humilde infância.

Aos meus pais, Osvaldo Roberto Barbosa e Edite Maria Barbosa (*in memoriam*), meus primeiros mestres, a quem devo tantas alegrias e o precioso dom da vida.

E, acima de tudo, a Deus, por ter tão pouco a pedir e tanto a agradecer.

A todos,
meus sinceros agradecimentos.

Rone Evaldo Barbosa

SUMÁRIO

SUMÁRIO	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
 1. INTRODUÇÃO.....	 1
1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2. BREVE HISTÓRICO SOBRE ESTUDOS DE CARGAS DINÂMICAS	3
1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA.....	6
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	7
 2. DINÂMICA DAS ESTRUTURAS.....	 8
2.1. SISTEMAS DINÂMICOS	8
2.1.1. <i>Análise Dinâmica</i>	8
2.1.2. <i>Etapas da Análise Dinâmica</i>	9
2.1.3. <i>Objetivos da Análise Dinâmica</i>	9
2.2. TEORIA DAS VIBRAÇÕES.....	9
2.2.1. <i>Definições</i>	9
2.2.2. <i>Sistemas com Um Grau de Liberdade</i>	11
2.2.3. <i>Sistemas com Dois Graus de Liberdade</i>	13
2.2.4. <i>Sistemas com n Graus de Liberdade</i>	13
 3. DINÂMICA DOS VEÍCULOS RODOVIÁRIOS.....	 14
3.1. MODELO MATEMÁTICO DE VEÍCULO	14
3.2. SISTEMA DE REFERÊNCIA - CENTRO DE GRAVIDADE.....	17
3.3. DINÂMICA DA FRENAGEM E DA ACELERAÇÃO	20
3.4. COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS VEÍCULOS NAS CURVAS	26
 4. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	 28
4.1. MODELOS MATEMÁTICOS DE PAVIMENTOS	28
4.2. PERFIL DO PAVIMENTO: IRREGULARIDADE LONGITUDINAL.....	29
<i>Índice de Irregularidade Internacional (IRI)</i>	31
4.3. INTERAÇÃO DINÂMICA PNEU-PAVIMENTO	36
4.3.1. <i>Amortecedores</i>	37
4.3.2. <i>Aceleração Vertical</i>	38
4.3.3. <i>Coeficiente de Impacto</i>	39
4.3.4. <i>Fatores de Equivalência de Carga</i>	40
4.4. FATORES QUE INFLUENCIAM A INTERAÇÃO VEÍCULO - PAVIMENTO	44
4.4.1. <i>Carga por Eixo</i>	44

4.4.2. Peso Bruto Total Combinado	44
4.4.3. Tipo de Eixo	48
4.4.4. Tipo de Pneu	48
4.4.5. Tipo de Rodagem	49
4.4.6. Pressão de Enchimento dos Pneus	49
4.4.7. Distribuição da Pressão de Contato	50
4.4.8. Variação Lateral da Trajetória das Rodas	50
4.4.9. Manobras	50
4.4.10. Velocidade	50
4.4.11. Tipo de Suspensão	51
4.4.12. Cargas Dinâmicas	52
4.5. PONTES RODOVIÁRIAS	53
5. MODELOS DE SIMULAÇÕES DE CARGAS DINÂMICAS.....	56
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	56
5.2. MODELOS MATEMÁTICOS: PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	57
5.2.1. Modelo MOVE	57
5.2.2. Modelo SAPSI	58
5.2.3. Modelo DYNPAVE	59
5.2.4. Projeto DIVINE	59
6. O MODELO TRUCKSIM.....	61
6.1. O MODELO TRUCKSIM – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	61
6.2. FATORES QUE PODEM SER AVALIADOS COM O TRUCKSIM.....	62
6.3. O PROGRAMA COMPUTACIONAL TRUCKSIM.....	63
6.4. ENTRADA DE DADOS	66
6.4.1. Caminhões.....	66
6.4.2. Dimensões dos Caminhões, Reboques e Cavalos-Mecânicos.....	66
6.4.3. Eixos	68
6.4.4. Suspensão dos Eixos em Tandem.....	69
6.4.5. Suspensão.....	69
6.4.6. Pneus	70
6.4.7. Perfil do Pavimento	70
6.5. SAÍDA DE DADOS	72
6.6. EXECUTANDO UMA SIMULAÇÃO	73
6.7. OUTROS RECURSOS DO TRUCKSIM	74
7. PROGRAMAÇÃO DAS SIMULAÇÕES.....	75
7.1. FATORES CONSIDERADOS NAS SIMULAÇÕES	75
7.2. PAVIMENTOS – IRREGULARIDADE LONGITUDINAL.....	77
7.3. TIPOS DE CAMINHÕES	85
7.4. PESOS DOS CAMINHÕES.....	87
7.4.1. Limites Legais	88
7.4.2. Distribuição de Pesos dos Caminhões – Medidas de Balança.....	89
8. SIMULAÇÕES: DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	91
8.1. PAVIMENTOS	91
8.1.1. Saliência ou Depressão Isolada	91
8.1.2. Perfil Longitudinal	101
8.1.3. Perfis Senoidais.....	105
8.2. PONTES	107
8.3. VEÍCULOS.....	109
8.3.1. Carga por Eixo.....	109
8.3.2. Tipo de Eixo	110
8.3.3. Peso Bruto Total Combinado – Tipos de Veículos	111
8.3.4. Suspensão.....	113
8.3.5. Pressão de Enchimento dos Pneus	115
8.3.6. Velocidade.....	115

9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	118
9.1. CONCLUSÕES	118
9.1.1. <i>Quanto aos Objetivos Estabelecidos.....</i>	<i>118</i>
9.1.2. <i>Quanto aos Conceitos Aplicados nos Modelos de Simulações.....</i>	<i>119</i>
9.1.3. <i>Quanto ao Modelo Adotado: TruckSim.....</i>	<i>121</i>
9.1.4. <i>Quanto aos Resultados Obtidos.....</i>	<i>121</i>
9.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123
9.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
ANEXOS.....	125
ANEXO A - SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O VEÍCULO “TOCO” - MERCEDES BENZ, MODELO L-1618/51.....	126
ANEXO B - SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O VEÍCULO “TRUCADO” - MERCEDES BENZ, MODELO L-2318/51 (6x2).	142
ANEXO C - SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O VEÍCULO “SEMI-REBOQUE 3E” - MERCEDES BENZ, MODELO LS-1935.	152
ANEXO D - SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O VEÍCULO “SEMI-REBOQUE 5E” - MERCEDES BENZ, MODELO LS-2635.	155
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	165

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema Massa-Mola.....	10
Figura 2.2 – Sistema com Um Grau de Liberdade.....	11
Figura 2.3 – Exemplos de Sistemas com Dois Graus de Liberdade.....	13
Figura 3.1 – Esquema Idealizado do Automóvel Convencional (Adaptado de HARTOG, 1972).....	15
Figura 3.2 – Corpo Sólido Livre no Espaço.....	15
Figura 3.3 – Modelo de um Veículo Semi-reboque (adaptado de UMTRI, 1993).....	16
Figura 3.4 – Posicionamento do CG na Direção Longitudinal.....	17
Figura 3.5 – Posicionamento do CG na Direção Transversal.....	18
Figura 3.6 – Função Região de Variação da Posição do CG.....	20
Figura 3.7 – Forças que Atuam no Veículo Durante a Frenagem (Adaptado de CANALE, 1989).....	21
Figura 3.8 – Pesos Atuantes nos Eixos de um Caminhão Semi-Reboque.....	25
Figura 3.9 – Roda do Veículo em uma Curva Horizontal (Adaptado de CANALE, 1989).....	27
Figura 4.1 – Perfil de um Pavimento (Adaptado de SAYERS & KARAMIHAS, 1997).....	30
Figura 4.2 – Equipamento Tipo “Nível e Mira” (Adaptado de SAYERS & KARAMIHAS, 1997).....	30
Figura 4.3 – Esquema para a Determinação do IRI por Equipamentos do Tipo Resposta – Quarto de Carro (adaptado de SAYERS & KARAMIHAS, 1997).....	32
Figura 4.4 – Faixas de IRI Representadas por Diferentes Classes de Rodovias (Adaptado de SAYERS & KARAMIHAS, 1997).....	34
Figura 4.5 – Valores de IRI da Malha Rodoviária do Estado de São Paulo, segundo BOTTURA et. al. (1996).....	35
Figura 4.6 – Valores de IRI para Trechos da Rodovia Washington Luiz, segundo MARTINS (1996).....	36
Figura 4.7 – Automóvel Percorrendo uma Estrada Ondulada (Adaptado de HARTOG, 1972).....	38
Figura 4.8 – Ressalto numa Estrada (Adaptado de HARTOG, 1972).....	38
Figura 4.9 – Fator de Equivalência de Carga para Eixos Simples, Segundo o Método do DNER (Adaptado por SÓRIA, 1996).....	42
Figura 4.10 – Fator de Equivalência de Carga para Eixos em Tandem Duplo, Segundo o Método do DNER (Adaptado por SÓRIA, 1996).....	42
Figura 4.11 – Configurações dos Eixos de Veículos Rodoviários de Carga (Adaptado de FERNANDES JR., 1994).....	48
Figura 4.12 – Esquema Estático Típico de uma Viga de Ponte.....	55
Figura 4.13 – Coeficiente de Impacto em Função do Vão Teórico.....	55
Figura 6.1 – Bibliotecas do AutoSim e Interface com o TruckSim.....	62
Figura 6.2 – Tela “Runs” do TruckSim.....	64
Figura 6.3 – Seleção de Propriedades de um Veículo.....	65
Figura 6.4 – Criando um Novo Banco de Dados.....	65
Figura 6.5 – Categorias e Sub-categorias de Caminhões no Programa TruckSim.....	66
Figura 6.6 – Propriedades dos Caminhões no Programa TruckSim.....	67
Figura 6.7 – Propriedades dos Reboques no Programa TruckSim.....	67
Figura 6.8 – Propriedades dos Cavalos-Mecânicos no Programa TruckSim.....	68
Figura 6.9 – Dimensões e Propriedades dos Eixos no Programa TruckSim.....	68
Figura 6.10 – Propriedades dos Eixos em Tandem no Programa TruckSim.....	69
Figura 6.11 – Propriedades das Suspensões no Programa TruckSim.....	69
Figura 6.12 – Propriedades dos Pneus no Programa TruckSim.....	70
Figura 6.13 – Perfil do Pavimento (Irregularidade) no Programa TruckSim.....	71
Figura 6.14 – Definição das Informações de Saída.....	72
Figura 6.15 – Seleção dos Dados a Serem Plotados.....	72
Figura 6.16 – Exemplo de Escolha da Área de Plotagem de Dados de Saída Gráfica.....	73

Figura 6.17 – Barra de Indicação da Simulação.	73
Figura 6.18 – Simulação Gráfica do Animator.	74
Figura 7.1 – Matriz Fatorial da Programação de Simulações, Realizadas com o TruckSim, para Cada Eixo do Veículo.	76
Figura 7.2 – Perfil de Pavimento de Concreto de Cimento Portland em Más Condições (Faultpcc.erd).	78
Figura 7.3 – Perfil de Pavimento de Concreto de Cimento Portland em Boas Condições (Goodpcc.erd).	78
Figura 7.4 – Perfil de Pavimento Asfáltico com Elevada Irregularidade Longitudinal (Roughac.erd).	78
Figura 7.5 – Perfil de Pavimento com Tratamento Superficial Ondulado (Wavyst.erd).	79
Figura 7.6 – Perfis dos Pavimentos Simulados.	79
Figura 7.7 – Detalhe dos Perfis dos Pavimentos Simulados.	80
Figura 7.8 – Perfis dos Pavimentos em Forma de Senóide.	81
Figura 7.9 – Detalhe dos Perfis dos Pavimentos em Forma de Senóide.	81
Figura 7.10 – Irregularidades longitudinais Isoladas.	82
Figura 7.11 – Comparação do IRI dos Pavimentos Simulados com os Valores Propostos por SAYERS & KARAMIHAS (1997).	85
Figura 7.12 – Distribuição dos Veículos por Eixo.	86
Figura 7.13 – Distribuição dos Veículos por Tipo de Carroceria.	86
Figura 7.14 – Distribuição dos Veículos por Fabricante.	87
Figura 7.15 – Distribuições do Peso Bruto Total Combinado dos Caminhões Seleccionados (Adaptado de DEMARCHI & SETTI, 1998).	90
Figura 8.1 – Carga por Eixo em Função do Tempo e do Espaço, para Veículo “Toco” a 90 km/h sobre a “Panela” com Profundidade de 10 cm.	92
Figura 8.2 – Carga Vertical Máxima em Função da Velocidade, para Veículo “Toco” com Limite Legal de Carga por Eixo, Trafegando sobre “Painelas”.	93
Figura 8.3 – Carga Vertical Máxima em Função da Profundidade da “Panela”, para Veículo “Toco” com Limite Legal de Carga por Eixo.	94
Figura 8.4 – Carga Vertical Máxima em Função da Carga Vertical Estática, para Veículo “Toco” a 90 km/h sobre “painelas”.	94
Figura 8.5 – Carga por Eixo em Função do Tempo e do Espaço, para Veículo “Toco” a 90 km/h sobre o Desnível Pavimento/Ponte 2.	96
Figura 8.6 – Carga Vertical Máxima em Função da Altura do Desnível entre Pavimento e Ponte, para Veículo “Toco” com Limite Legal de Carga por Eixo.	97
Figura 8.7 – Carga Vertical Máxima em Função da Carga Vertical Estática, para Veículo “Toco” a 90 km/h sobre Desnível Pavimento/Ponte.	97
Figura 8.8 – Carga por Eixo em Função do Tempo, para Veículo “Toco” a 90 km/h sobre o Sonorizador.	99
Figura 8.9 – Carga Vertical Máxima em Função da Velocidade, para Veículo “Toco” com Limite Legal de Carga por Eixo sobre Sonorizador.	100
Figura 8.10 – Carga Vertical Máxima em Função da Carga Vertical Estática, para Veículo “Toco” a 90 km/h sobre Sonorizador.	100
Figura 8.11 – Simulação de um Veículo “Trucado” a 90 km/h sobre Pavimento Asfáltico com Tratamento Superficial Ondulado (Wavyst).	102
Figura 8.12 – Carga Vertical Máxima em Função da Velocidade para um Veículo “Trucado” com Limite Legal de Carga.	103
Figura 8.13 – Carga Vertical Máxima em Função do IRI para um Veículo “Trucado” com Limite Legal de Carga.	103
Figura 8.14 – Carga Vertical Máxima em Função da Carga Estática para um Veículo “Trucado” a 90 km/h sobre Perfis de Pavimentos.	104
Figura 8.15 – Carga Vertical Máxima em Função da Velocidade para um Veículo “Toco”, com Limite Legal de Carga, sobre Perfis Senoidais.	106
Figura 8.16 – Carga Vertical Máxima para o Veículo “Trucado” com Suspensão em Feixe de Molas com Rigidez Padrão e com Menor Rigidez.	113
Figura 8.17 – Carga Vertical Máxima em Função da Velocidade para o Veículo “Trucado” Trafegando sobre o Pavimento Wavyst.	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Força Lateral Máxima do Pneu de um Veículo em uma Curva Horizontal (PACEJKA et al., 1987).	27
Tabela 4.1 – Estado Geral da Irregularidade Longitudinal da Malha Rodoviária do Estado de São Paulo (BOTTURA et al., 1996).	34
Tabela 4.2 – Fatores de Equivalência de Carga para o Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis (DNER-PRO 159-85).	40
Tabela 4.3 – Classificação dos Veículos Convencionais e Especiais, segundo o Fator de Destruição dos Pavimentos (adaptado de FABBRI et. al, 1990).	45
Tabela 4.4 – Planilha de Cálculo dos Valores Máximos de Carga Vertical, Médias e Desvios-Padrão de Uma Simulação.	47
Tabela 7.1 – Perfis de Pavimentos: Local, Quantidade e Número de Medidas dos Perfis.	77
Tabela 7.2 – Características dos Perfis de Pavimentos Senoidais.	81
Tabela 7.3 – IRI dos Perfis dos Pavimentos de Concreto de Cimento Portland.	83
Tabela 7.4 – IRI dos Perfis dos Pavimentos Asfálticos.	83
Tabela 7.5 – IRI dos Perfis dos Pavimentos em Forma de Senóides.	84
Tabela 7.6 – Caminhões da Mercedes-Benz Utilizados nas Simulações.	87
Tabela 7.7 – Cargas por Eixo para as Diferentes Condições de Carregamento (adaptada de FERNANDES JR, 1994).	88
Tabela 7.8 – Características dos Veículos Rodoviários de Carga, Limites de Carga por Eixo (adaptada de FERNANDES JR, 1994).	89
Tabela 7.9 – Modelos Representativos de Cada Categoria de Caminhões (Adaptado de DEMARCHI & SETTIL, 1998).	89
Tabela 7.10 – Porcentagens dos Caminhões com Peso Bruto Total Combinado Acima dos Limites Legais de Carga Estabelecidos pelo CONTRAN.	90
Tabela 8.1 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica do Veículo “Toco” a 90 km/h, com Limite Legal de Carga, sobre “Painelas”.	95
Tabela 8.2 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica do Veículo “Toco” a 90 km/h, com Limite Legal de Carga, sobre Desnível Pavimento/Ponte.	98
Tabela 8.3 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica do Veículo “Toco” Trafegando a 90 km/h, com Limite Legal de Carga, sobre Sonorizador.	101
Tabela 8.4 – Perfis de Pavimentos Simulados para Avaliação do Efeito da Irregularidade Longitudinal.	101
Tabela 8.5 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica do Veículo “Trucado” a 90 km/h, com Limite Legal de Carga, sobre Perfis de Pavimentos.	104
Tabela 8.6 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica do Veículo “Toco” a 90 km/h, com Limite Legal de Carga por Eixo, Trafegando sobre Perfis Senoidais.	107
Tabela 8.7 – Coeficientes de Impacto do Veículo “Trucado” Trafegando sobre os Perfis de Pavimentos <i>Faultpcc</i> e <i>Goodpcc</i> .	108
Tabela 8.8 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica dos Eixos dos Veículos a 90 km/h, sobre o Perfil <i>Wavyst</i> .	109
Tabela 8.8 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica dos Eixos dos Veículos a 90 km/h, sobre o Perfil <i>Wavyst</i> .	110
Tabela 8.10 – Classificação dos Veículos Segundo o FD_{din} para FECD dos Veículos a 90 km/h, sobre o Perfil <i>Wavyst</i> .	112
Tabela 8.11 – Fatores de equivalência de Carga Dinâmica para o Eixo ESRS do Veículo “Trucado” com Suspensão em Feixe de Molas com Menor Rigidez e Rigidez Padrão.	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	- American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCE	- American Society of Civil Engineering
ASTM	- American Society of Testing and Materials
BI	- Bump Integrator
CG	- Centro de Gravidade
CONTRAN	- Conselho Nacional de Trânsito
DIVINE	- Dynamic Interaction Between Vehicles and Infrastructures Experiment
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DOF	- Degree of Freedom
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
ERD	- Engineering Research Division
ESRD	- Eixo Simples com Rodas Duplas
ESRS	- Eixo Simples com Rodas Simples
FHWA	- Federal Highway Administration
HPMS	- Highway Performance Monitoring System
IRI	- International Roughness Index
MERLIN	- Machine for Evaluating Roughness Using Low Cost Instrumentation
OECD	- Organization for Economic Cooperation and Development
PBTC	- Peso Bruto Total Combinado
PICR	- Pesquisa de Interrelacionamento dos Custos Rodoviários
QI	- Quarter-Car Index
RPUG	- Road Profile User Group
SGUI	- Simulation Graphical User Interface
TDRD	- Tandem Duplo com Rodas Duplas
TTRD	- Tandem Triplo com Rodas Duplas
USP	- Universidade de São Paulo
UMTRI	- The University of Michigan Transportation Research Institute
VCL	- Veículo Combinado Longo

LISTA DE SÍMBOLOS

B	- força de frenagem;
$B_{\text{máx}}$	- força de frenagem máxima;
B_f	- força de frenagem nas rodas dianteiras;
B_r	- força de frenagem nas rodas traseiras;
CG	- posição do centro de gravidade do veículo;
CG_{cm}	- posição do centro de gravidade do cavalo mecânico;
CG_{rb}	- posição do centro de gravidade do reboque;
F	- força;
FD	- fator de destruição;
FD_{din}	- fator de destruição, devido às cargas dinâmicas;
FEC	- fator de equivalência de carga;
$FECD$	- fator de equivalência de carga dinâmica;
F_{SD}	- fator de equivalência de carga para ESRD (DNER-PRO 159/85);
F_{SS}	- fator de equivalência de carga para ESRS (DNER-PRO 159/85);
F_{TD}	- fator de equivalência de carga para TDRD (DNER-PRO 159/85);
F_{TT}	- fator de equivalência de carga para TTRD (DNER-PRO 159/85);
$F_{y,\text{máx}}$	- força lateral máxima;
F_z	- carga vertical;
$F_{z_{\text{din}}}$	- carga dinâmica vertical;
$F_{z_{\text{est}}}$	- carga estática vertical;
$F_{z_{\text{max}}}$	- carga dinâmica vertical máxima;
H	- altura do centro de gravidade;
H_0	- hipótese nula;
H_a	- altura do ponto de aplicação da resistência do ar;
H_i	- hipótese inicial;
L	- distância entre os eixos traseiro e dianteiro;
L_f	- distância entre o eixo dianteiro e o CG;
LL	- limite legal de carga por eixo, estabelecido pelo CONTRAN;
L_r	- distância entre o eixo traseiro e o CG;
L_t	- lotação;

M_i	- momento de inércia das partes rotativas do veículo nos eixos das rodas;
M_t	- torque de resistência na roda proveniente do sistema de transmissão de movimento;
M_{db}	- torque de frenagem proveniente do motor (“freio-motor”);
N_i	- número de aplicações da carga P_i ;
O_{xyz}	- sistema de referência;
P	- força externa ou carregamento;
P_0	- carga padrão ou de referência;
PBTC	- peso bruto total combinado;
P_{eixo}	- peso bruto total sobre o eixo;
P_i	- carga qualquer i ;
POM	- peso do veículo em ordem de marcha;
R_a	- resistência do ar;
R_g	- resistência de rampa;
R_i	- resistência de inércia;
R_r	- resistência ao rolamento;
R_{rf}	- resistência ao rolamento no eixo dianteiro;
R_{rr}	- resistência ao rolamento no eixo traseiro;
S	- bitola (distância entre rodas);
S_1	- distância das rodas laterais esquerdas ao CG;
S_2	- distância das rodas laterais direitas ao CG;
TDP_i	- trilha de roda direita do pavimento i ;
TEP_i	- trilha de roda esquerda do pavimento i ;
W	- peso total do veículo;
W_1	- peso nas rodas laterais esquerdas;
W_2	- peso nas rodas laterais direitas;
W_{5R}	- peso aplicado na “quinta roda”;
W_b	- peso dinâmico;
W_{bf}	- peso dinâmico nas rodas dianteiras;
W_{bi}	- peso dinâmico no eixo i ;
W_{br}	- peso dinâmico nas rodas traseiras;
W_f	- peso nas rodas dianteiras;
W_r	- peso nas rodas traseiras;

- b - desaceleração do veículo na frenagem;
- c - constante de amortecimento;
- f - coeficiente de resistência ao rolamento;
- k - constante da mola ou rigidez;
- l - vão teórico de elementos estruturais (pontes);
- m - massa;
- t - tempo;
- v - velocidade;
- x, y, z - eixos de referência;
- x - deslocamento;
- x_0 - referencial do deslocamento ou deslocamento inicial;
- $\dot{x}$ - velocidade;
- $\ddot{x}$ - aceleração;
- $\dot{y}$ - velocidade vertical;
- $\ddot{y}$ - aceleração vertical;
- ΔW_b - transferência do peso dinâmico na frenagem;
- ψ - ângulo de escorregamento longitudinal;
- f - coeficiente de impacto em pavimentos, devido a cargas móveis;
- φ - coeficiente de impacto em pontes; devido a cargas móveis
- θ - ângulo de inclinação do pavimento (rampa);
- ω_n - frequência natural de oscilação.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar os efeitos das cargas dinâmicas, devido ao tráfego de veículos rodoviários, no desempenho dos pavimentos e pontes. Para este propósito, foi realizada uma revisão dos principais conceitos relativos à dinâmica das estruturas, dos veículos rodoviários e dos pavimentos, bem como os métodos de simulações dos efeitos das cargas dinâmicas sobre os pavimentos. Para avaliar os fatores de carga de tráfego, foi utilizado o programa computacional *TruckSim*, que é baseado em modelos matemáticos de veículos e perfil longitudinal dos pavimentos. Com base em parâmetros de veículos de carga brasileiros, foram realizadas simulações para avaliar os seguintes fatores: tipo de veículo, cargas por eixo, velocidade, tipo de suspensão, tipo de eixo e condição do pavimentos (irregularidade longitudinal). Também foram analisados, comparativamente, os efeitos dos Veículos Combinados Longos (VCL's) e dos caminhões convencionais.

ABSTRACT

This work aims to quantify the effects of dynamic loads, due to the traffic of road vehicles on the performance of pavement and bridges. It is performance a revision of the main concepts related to the dynamic of structures, road vehicles and pavements. The methods of dynamic load simulation and its effects on pavements are analyzed. For the evaluation of traffic loading factors it is used the computer program TruckSim, which is based on mathematical models of vehicles and the longitudinal profile of pavements. Based on Brazilian vehicle parameters it is performed simulations to evaluate the following factors: vehicle type, axle load, velocity, suspension type, axle type and pavement conditions (longitudinal roughness). It is also analyzed the relative effect of Long Combination Vehicles (LCV's) and conventional trucks.

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A interação entre os veículos e os pavimentos, bem como a interação entre os veículos e as pontes, tem sido objeto de pesquisas em diversas instituições em todo o mundo. Trata-se de um assunto complexo, ainda com muitos possíveis caminhos para o aperfeiçoamento das normas técnicas de projeto e construção da infra-estrutura rodoviária a serem investigados.

A ação provocada pelo tráfego dos veículos nos pavimentos e nas pontes, de caráter dinâmico, é influenciada por diversos fatores de tráfego, tais como carga por eixo, pressão de enchimento dos pneus, tipo de rodagem, tipo de pneu, distribuição da pressão de contato pneu-pavimento, tipo de veículo, tipo de suspensão e velocidade dos veículos. Além disso, também é importante a condição da superfície de rolamento, particularmente em termos da irregularidade longitudinal.

No Brasil ainda é relativamente pequeno o número de pesquisas visando avaliar os efeitos das cargas dinâmicas do tráfego, sendo, portanto, adotados métodos de dimensionamento de pavimentos e pontes que nem sempre refletem a realidade operacional brasileira, podendo resultar em obras sub ou superdimensionadas.

A análise dos efeitos dinâmicos dos veículos tem-se baseado em métodos teóricos e experimentais. Destacam-se a utilização de equipamentos que provocam vibrações estimuladas, medindo-se os resultados por

deflectômetros dinâmicos, e a análise dinâmica de estruturas por modelos matemáticos, como o método dos elementos finitos entre outros que envolvem soluções iterativas.

Embora existam, atualmente, diversos métodos experimentais capazes de analisar os critérios de projeto quanto aos efeitos dinâmicos provocados pelo tráfego dos veículos, o custo relativamente alto destes ainda inviabiliza a utilização em projetos convencionais e até mesmo a realização de pesquisas análogas no Brasil.

O advento dos métodos computacionais, mais acessíveis, apresentam-se como uma alternativa viável, talvez única no curto prazo, para a realização desses estudos. Dessa forma, o desenvolvimento deste trabalho teve como ferramenta básica um programa computacional, através do qual as simulações de cargas foram realizadas em conformidade com os padrões técnicos das rodovias, pontes e veículos brasileiros.

Em julho de 1995, o Instituto de Pesquisa em Transportes da Universidade de Michigan (UMTRI - *The University of Michigan Transportation Research Institute*) concluiu o desenvolvimento da versão inicial de um grupo integrado de ferramentas computacionais para a simulação e análise de ações provocadas por veículos de carga, o *TruckSim*.

TruckSim é um programa computacional baseado em modelos matemáticos de veículos que foram validados mediante comparações com outros modelos existentes e com resultados de teste de campo, permitindo a análise de vários tipos de veículos, mediante composição de diferentes características de sistemas de suspensão, direcionamento, carregamento, eixos e pneus, velocidade, aceleração e frenagem. Pode, portanto, servir para a análise dos esforços dinâmicos resultantes da interação entre os veículos e pavimentos brasileiros.

Os estudos realizados neste trabalho consistem na revisão bibliográfica dos métodos disponíveis para a simulação dos efeitos dinâmicos dos veículos rodoviários sobre pavimentos e pontes, abordando conceitos relacionados à dinâmica dos veículos rodoviários, dinâmica das estruturas e a interação dinâmica entre os veículos e a via.

Com a utilização do *TruckSim* e considerando-se as características dos veículos brasileiros e de condição de pavimentos típicas da realidade brasileira, são obtidos, por simulação computacional, os efeitos dos seguintes fatores: irregularidade longitudinal, carga por eixo, tipo de eixo, peso bruto total combinado, tipo de veículo, sistema de suspensão, pressão de enchimento dos pneus e velocidade.

Uma questão muito importante, principalmente no Estado de São Paulo, é a análise da compatibilidade dos Veículos Combinados Longos (VCL), muito utilizados no transporte da cana-de-açúcar, com as características físicas dos pavimentos e pontes brasileiras. Dentre os aspectos a serem estudados, deve-se incluir o desgaste provocado aos pavimentos e pontes pelas quais trafegam. Neste trabalho é apresentada uma análise comparativa das cargas dinâmicas provocadas pelos VCL's e os caminhões convencionais que trafegam pelas rodovias brasileiras.

1.2. BREVE HISTÓRICO SOBRE ESTUDOS DE CARGAS DINÂMICAS

Os diversos fatores que causam a deterioração dos pavimentos foram identificados ao longo do tempo pela observação de suas conseqüências nos pavimentos construídos. Algumas atitudes foram tomadas tanto para melhorar a segurança e o conforto, quanto para aumentar a eficiência do pavimento. No século XVII, suspensões de aço foram inicialmente utilizadas em veículos de passageiros (carroças e charretes), posteriormente utilizadas também nos veículos de carga, que na época eram carroções ou vagões de carga (CEBON, 1993). O advento da borracha permitiu uma melhor aderência entre as rodas e

o pavimento, além de amenizar o impacto que havia com as rodas rígidas (madeira ou aço).

Quanto aos pavimentos, os primeiros estudos foram realizados por Tresaguet, em 1775, e por McAdam em 1820. Porém, Os primeiros métodos de dimensionamento de pavimentos só foram elaborados na primeira metade do século XX, utilizando-se modelos empíricos. Muitos continuam sendo utilizados ainda hoje, ao menos em parte, apesar das limitações em razão da influência de fatores relacionados às solicitações, intempéries, e propriedades físicas dos materiais utilizados nos pavimentos.

Historicamente, os efeitos dinâmicos dos veículos sobre os pavimentos e pontes têm sido levados em consideração através de fatores de impacto pré-estabelecidos em normas. Existem, no entanto, divergências entre os organismos internacionais quanto aos valores e critérios utilizados.

Para as pontes, por exemplo, o Comitê de Cargas e Esforços em Pontes da ASCE (*American Society of Civil Engineering-1981*) sugere considerações de natureza probabilística para o problema do impacto dinâmico, focalizando dois aspectos: no primeiro, as pontes são caracterizadas por uma condição relativamente incerta de tráfego; o segundo aspecto relata a probabilidade de ocorrer o máximo efeito dinâmico devido a uma variação na velocidade do veículo. Essas considerações foram incorporadas pelo Código de Pontes de Ontário / Canadá (*Ontario Bridge Code*).

Já a *American Association of State Highways and Transportation Officials* (AASHTO, 1980) fornece em suas especificações valores tabelados para coeficientes de impacto, os quais resultaram de uma análise por elementos finitos desenvolvida por SHORE & RABIZADEH (1974). No Brasil tem sido utilizadas as especificações da AASHTO, com um pequeno número de pesquisas voltadas para a análise das conseqüências desse procedimento.

Fatores mais específicos, tais como a pressão de enchimento dos pneus, a velocidade dos veículos, os tipos de pneus e outras propriedades dinâmicas dos veículos e dos pavimentos, só começaram a ser intensamente estudados a partir da década de 70. Antes, porém, o problema de uma carga móvel viajando a uma velocidade constante sobre a superfície de um semi-espaço foi considerado por SNEDDON (1951), dando como solução uma integral geral para cargas móveis. COLE & HUTH (1958) e BARON et al. (1967) consideraram uma carga linear de comprimento finito movendo-se na superfície de um semi-espaço.

Soluções considerando cargas pontuais movendo-se com velocidade variável foram estudadas por MILES (1960) e PAYTON (1964). Os resultados dessas análises eram dados por integrais que precisavam de uma solução numérica para uma camada simples infinita, inviabilizando a aplicação aos pavimentos em razão da diferença entre a rigidez das camadas que o constituem (ZAFIR et al, 1994).

Modificações introduzidas por CHEN (1987) apud ZAFIR et al. (1994)¹, apresentaram como solução a utilização de uma camada média, cujo modelo foi aplicado em um programa computacional chamado *MOVE*. Recentemente outros pesquisadores têm considerado também as propriedades dos materiais nos estudos dos pavimentos (SOUZA et al, 1987 e 1988; CHATTI et al, 1995; JACOB, 1995; ULLIDTZ, 1994; HSU et al, 1995).

Como pode ser observado, as pesquisas têm-se concentrado na análise da estrutura do pavimento e dos materiais que o constituem, enquanto os efeitos da superfície de rolamento (irregularidade longitudinal) sobre o comportamento dinâmico dos veículos têm sido estudados principalmente para

---

¹ CHEN, S. S.; *The Response of Multilayered System to Dynamic Surface Loads*; PhD Dissertation; University of California; Berkeley, 1987; apud ZAFIR, Z.; SIDDHARTHAN, R.; SEBAALY, P. E.; *Dynamic Pavement-Strain Histories from Moving Traffic Load*; Journal of Transportation Engineering, vol. 120, No. 5; Reno/NV, 1994.

a avaliação da estabilidade e desempenho dos veículos sob diferentes condições de pavimentos.

1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA

Para a realização dessa pesquisa, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- Apresentar os métodos convencionais e novos métodos utilizados por diversos organismos internacionais na simulação das cargas dinâmicas sobre os pavimentos;
- Avaliar as especificações adotadas pelos organismos rodoviários brasileiros para o dimensionamento das pontes, no que se refere à consideração dos efeitos dinâmicos provocados pelo tráfego rodoviário;
- Efetuar levantamento de dados reais de carga dos veículos rodoviários brasileiros (PBTC – Peso Bruto Total Combinado), bem como dos demais fatores intervenientes: tipos de veículos, carga por eixo, velocidade, pneus, sistema de suspensão e irregularidade longitudinal dos pavimentos;
- Simular os efeitos dos fatores que afetam as cargas dinâmicas dos veículos rodoviários sobre os pavimentos e pontes com a utilização do programa computacional *TruckSim*;
- Analisar os efeitos dos fatores selecionados e, comparativamente, das cargas dinâmicas devidas ao tráfego de veículos dentro dos limites legais de cargas estáticas, estabelecidos pelo Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN.

- Analisar comparativamente os efeitos provocados pelos Veículos Combinados Longos – VCL's e os caminhões convencionais, através de simulações realizadas com o *TrukSim*

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta inicialmente, no Capítulo 2, os conceitos aplicados à Dinâmica das Estruturas de um modo geral, cuja teoria também serve como base para a modelagem dinâmica dos veículos rodoviários, apresentada no Capítulo 3.

Os pavimentos são apresentados no Capítulo 4, caracterizados principalmente, em termos de irregularidade longitudinal, cujos efeitos são estudados neste trabalho.

O Capítulo 5 apresenta alguns modelos matemáticos utilizados para simular cargas dinâmicas sobre os pavimentos rodoviários. O modelo *TruckSim*, utilizado nesse trabalho, é apresentado de forma detalhada no Capítulo 6. A programação fatorial das simulações, com todos os fatores e níveis considerados, é apresentada no Capítulo 7.

O Capítulo 8 mostra os resultados e a análise das simulações realizadas. Finalmente, no Capítulo 9 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. DINÂMICA DAS ESTRUTURAS

Grande parte dos conceitos estudados neste Capítulo são aplicados não apenas à dinâmica das estruturas de obras civis, mas também aos diversos sistemas mecânicos sujeitos a movimentação, seja ela periódica ou não, desde que seja passível de uma modelagem matemática demonstrável ou, no mínimo, comparável com dados reais de simulações de campo.

2.1. SISTEMAS DINÂMICOS

Na natureza o comportamento de todo objeto real, ou estrutura física, se processa de forma dinâmica quando considerado não isoladamente. Entretanto, a irregularidade da ocorrência das interações dinâmicas e a grande variabilidade de intensidade das ações resultantes dessas interações (entre estruturas físicas) fazem com que, na maioria das vezes, se considere um sistema estático. Nesse caso, apenas as massas e propriedades de resistência dos materiais são consideradas. Contudo, em alguns casos, a intensidade dos efeitos dinâmicos é significativa, de tal modo que uma determinação mais precisa do comportamento das estruturas se faz necessária, tanto próxima da real quanto possível.

2.1.1. Análise Dinâmica

De um modo geral, a análise dinâmica deve ser feita quando ocorre pelo menos uma das duas situações:

- a) Quando as forças de inércia, ou $(m \cdot \ddot{x})$, onde m = massa e $\ddot{x}$ = aceleração), alteram significativamente o equilíbrio da estrutura;

- b) Quando os movimentos causam desconforto aos usuários (acima de certos níveis);

2.1.2. Etapas da Análise Dinâmica

Segundo LAIER (1998), a análise dinâmica de uma estrutura consta das seguintes etapas:

- a) Definição da Solicitação: Magnitude (P) e variação no espaço e no tempo $P(x,t)$;
- b) Modelagem da Estrutura: Modelo teórico de comportamento;
- c) Aplicação da Teoria das Vibrações: Técnicas de integração da equação de movimento da estrutura.

2.1.3. Objetivos da Análise Dinâmica

Segundo LAIER (1998), a análise dinâmica de uma estrutura tem por objetivos determinar:

- a) Deslocamentos: Limitações de Projeto;
- b) Velocidades e acelerações: Conforto dos usuários;
- c) Esforços internos: Resistência;
- d) Tensões e Deformações: Fadiga do material que compõe a estrutura.

2.2. TEORIA DAS VIBRAÇÕES

2.2.1. Definições

Para melhor compreensão da Teoria das Vibrações, é necessário conhecer as seguintes definições, apresentadas por THOMSON (1978):

- *Vibração*: Refere-se a movimentos oscilatórios de corpos às forças que lhes são associadas. Todos os corpos dotados de massa e elasticidade são capazes de vibração.

- *Vibração Livre:* Acontece quando um sistema oscila sob a ação de forças que lhe são inerentes e na ausência da ação de qualquer força externa. Neste caso, o sistema poderá vibrar em uma ou mais das suas frequências naturais, que são peculiares ao sistema dinâmico estabelecido pela distribuição de sua massa (m) e rigidez (k).
- *Vibração Forçada:* Quando ela ocorre sob a excitação de forças externas. Quando a excitação é oscilatória, o sistema é obrigado a vibrar na frequência da excitação.
- *Graus de Liberdade:* Refere-se ao número de coordenadas independentes requerido para a descrição do movimento de um sistema.

E outras definições:

- *Frequência Natural:* Frequência (ω_n) de oscilação de um sistema.
- *Sistema Massa-Mola:* Sistema oscilatório composto por objeto de massa (m) e uma mola de massa desprezível e constante de rigidez (k), cuja força (F), mediante um deslocamento (x) em relação à sua posição inicial (x_0), pode ser expressa pela Lei de Hooke:

$$F = k \cdot x \quad (2.1)$$

Figura 2.1 – Sistema Massa-Mola

2.2.2. Sistemas com Um Grau de Liberdade

Os sistemas com um grau de liberdade podem ser representados da seguinte forma:

Figura 2.2 – Sistema com Um Grau de Liberdade

Onde:

m → massa do sistema;

k → constante da mola;

c → constante de amortecimento.

Observa-se na Figura 2.2 que o deslocamento ocorre apenas na direção x , ou seja, apenas em uma direção. De acordo com a definição dada no item 2.2.1, esse sistema corresponde a apenas um grau de liberdade.

Tomando-se por base o sistema massa-mola, a força da mola (Equação 2.1) tem sentido contrário ao movimento da massa (m). Portanto, de acordo com o referencial (x_0) da Figura 2.1, a força da mola no sistema será $-kx$.

A força de amortecimento atua apenas quando a massa se move, sendo expressa por $c \frac{dx}{dt}$ ou $c\dot{x}$, portanto, proporcional à velocidade e na direção oposta ($-c\dot{x}$) a esta (HARTOG, 1972).

Aplicando-se ao sistema (Figura 2.2) a Segunda Lei de Newton, pela qual a soma das forças ($\vec{F}$) aplicadas em um corpo é igual ao produto entre a massa (m) e a aceleração ($\ddot{x}$), tem-se:

$$\Sigma \vec{F} = m \frac{d^2x}{dt^2} = m\ddot{x} = -kx - c\dot{x} + P(t) \quad (2.2)$$

A equação do movimento de um sistema com um grau de liberdade é dada por:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P(t) \quad (2.3)$$

Onde:

$m\ddot{x}$ → força de inércia;

$c\dot{x}$ → força de amortecimento;

kx → força da mola ou rigidez;

$P(t)$ → força externa.

Quando se estuda o comportamento dinâmico de qualquer estrutura, algumas propriedades são comuns. Desse modo, uma modelagem básica única serve como ponto de partida para a elaboração de um modelo matemático capaz de prever o comportamento da estrutura quando solicitada dinamicamente. Esse modelo básico tem como ponto de partida a Equação 2.3, com ajustes específicos no que se refere às propriedades físicas e demais fatores envolvidos, inclusive a forma de vibração e método de integração mais conveniente para cada equação de movimento da estrutura.

Note-se que a Equação 2.3 refere-se a um sistema com um grau de liberdade sujeito a vibração forçada. Para um sistema com um grau de liberdade sujeito a vibração livre ($P(t) = 0$), a equação reduz-se a:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.4)$$

2.2.3. Sistemas com Dois Graus de Liberdade

A seguir, exemplos de sistemas com dois graus de liberdade:

Figura 2.3 – Exemplos de Sistemas com Dois Graus de Liberdade

A Equação do movimento de sistemas com dois graus de liberdade tem por base a Equação 2.3, sendo composta pelos elementos das matrizes de massa, amortecimento e rigidez, e os elementos dos vetores aceleração, velocidade e força externa. A mesma pode ser expressa da seguinte forma:

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{P(t)\} \quad (2.5)$$

2.2.4. Sistemas com n Graus de Liberdade

Sistemas com n graus de liberdade são modelados conforme a Equação 2.5, no entanto, quanto maior o valor de n mais complexo será o sistema e maior será o esforço computacional para resolvê-lo. Para evitar erros ou incompatibilidades entre os resultados práticos (reais) e os previstos pelos algoritmos computacionais, deve-se conhecer em detalhes o modelo que será utilizado e suas limitações.

3. DINÂMICA DOS VEÍCULOS RODOVIÁRIOS

Os pavimentos são construídos, sobretudo para suportar as solicitações dos veículos durante um determinado período de tempo. Portanto, a inclusão das propriedades dinâmicas destes no estudo do comportamento dinâmico das estruturas dos pavimentos e pontes é fator determinante para uma melhor representação da realidade.

Os conceitos de dinâmica das estruturas, mostrados no Capítulo 2, são aqui aplicados para a modelagem matemática dos veículos, sendo também apresentados os tipos de movimentos a que está sujeito uma estrutura dinâmica espacial.

A análise do comportamento dinâmico dos veículos rodoviários leva em consideração diversos fatores, tais como: geometria do veículo e posicionamento do centro de gravidade, movimento das rodas, forças de resistências ao movimento, comportamento na frenagem e na realização de curvas, estabilidade e desempenho, controle direcional, dentre outros fatores. Entretanto, apenas parte destes fatores está diretamente relacionada à dinâmica dos pavimentos, objeto deste estudo, os quais são descritos neste Capítulo.

3.1. MODELO MATEMÁTICO DE VEÍCULO

Vistos os conceitos de Dinâmica da Estruturas, mostrados no Capítulo 2, torna-se mais fácil a compreensão dos modelos dinâmicos de veículos considerados em simulações. A figura 3.1 mostra o esquema idealizado do

automóvel convencional, com um eixo dianteiro, um eixo traseiro e absorvedores de choque.

Figura 3.1 – Esquema Idealizado do Automóvel Convencional (Adaptado de HARTOG, 1972).

Um automóvel de projeto convencional (Figura 3.1), com suas molas e pneus, é um sistema oscilatório complexo, visto que uma composição básica do mesmo pode ser descrita por três massas distintas (corpo, eixo dianteiro e eixo traseiro) e oito molas distintas (quatro molas e quatro pneus).

Segundo HARTOG (1972), um corpo sólido livre no espaço tem seis graus de liberdade: ele pode oscilar para cima e para baixo, para os lados e para frente e para trás (três translações: x , y , z , conforme figura 3.2); e ainda mais, pode ter três rotações, conhecidas por:

- *Balanço*: em torno do eixo longitudinal (x);
- *Arfagem*: em torno do eixo lateral (y);
- *Aproamento*: direcionamento em torno do eixo vertical (z).

Figura 3.2 – Corpo Sólido Livre no Espaço.

Como o automóvel mostrado na figura 3.1 tem três corpos, conforme mencionado, ele tem na realidade 18 (dezoito) graus de liberdade. Entretanto, segundo HARTOG (1972), boa parte dos movimentos possíveis não têm importância, sendo mais importantes os seguintes movimentos:

- a) De frequência natural (ω_n) ligeiramente menores que 1 Hz:
  - Oscilação vertical do corpo com os eixos praticamente estacionários;
  - Arfagem do corpo com os eixos aproximadamente estacionários;
- b) De frequência natural (ω_n) entre 6 e 8 Hz:
  - Oscilação vertical de cada eixo sobre a elasticidade do pneu, com o chassi praticamente imperturbável;
  - Balanço dos eixos com pequeno movimento do corpo.

Para o caso de veículos com suspensão “ativa”, as frequências naturais são, nestes casos, mais baixas.

Os modelos mais recentes de veículos levam em consideração esquemas mais complexos ainda. Em virtude da maior facilidade de se trabalhar com métodos computacionais, os modelos atuais levam em consideração a influência de peças rotativas, diferentes tipos de suspensões e pneus, entre outros fatores. A figura 3.3 mostra um modelo matemático de um caminhão semi-reboque com 42 graus de liberdade.

Figura 3.3 - Modelo de um Veículo Semi-reboque (adaptado de UMTRI, 1993).

3.2. SISTEMA DE REFERÊNCIA - CENTRO DE GRAVIDADE

O posicionamento do Centro de gravidade (CG) dos veículos é de grande importância na obtenção de suas características de desempenho e estabilidade. A determinação do CG é fundamental, também, para uma adequada distribuição das cargas efetivamente atuantes nos eixos dos veículos, fator preponderante nos estudos do comportamento dos pavimentos (CANALE, 1989; GILLESPIE, 1992).

O sistema de referência **0xyz** normalmente adotado para todos os tipos de veículos tem origem no próprio CG. O método mais utilizado para a determinação do CG em um veículo rodoviário baseia-se na determinação da carga por eixo e por roda, fazendo-se em seguida, o equilíbrio de torques (momentos) em relação a diferentes pontos de referência conhecidos.

Figura 3.4 – Posicionamento do CG na Direção Longitudinal.

Na figura 3.4, fazendo-se o somatório das forças em **z**, têm-se:

$$W = W_f + W_r \quad (3.1)$$

Fazendo-se o somatório dos momentos em torno dos pontos de aplicação de W_f e W_r , respectivamente, resulta:

$$L_f = \frac{W_r \cdot L}{W} \quad (3.2)$$

$$L_r = \frac{W_f \cdot L}{W} \quad (3.3)$$

onde:

$W \rightarrow$ peso total do veículo;

$W_f \rightarrow$ peso nas rodas dianteiras;

$W_r \rightarrow$ peso nas rodas traseiras;

$L_f \rightarrow$ distância entre o eixo dianteiro e o CG;

$L_r \rightarrow$ distância entre o eixo traseiro e o CG;

$L \rightarrow$ distância entre os eixos traseiro e dianteiro;

Figura 3.5 – Posicionamento do CG na Direção Transversal.

Na figura 3.5, fazendo-se o somatório das forças em z , têm-se:

$$W = W_1 + W_2 \quad (3.4)$$

Fazendo-se o somatório dos momentos em torno dos pontos de aplicação de W_1 e W_2 , respectivamente, resulta:

$$S_1 = \frac{W_2 \cdot S}{W} \quad (3.5)$$

$$S_2 = \frac{W_1 \cdot S}{W} \quad (3.6)$$

onde:

S → bitola (distância entre rodas);

S_1 → distância das rodas laterais esquerdas ao CG;

S_2 → distância das rodas laterais direitas ao CG;

W → peso total do veículo;

W_1 → peso nas rodas laterais esquerdas;

W_2 → peso nas rodas laterais direitas;

Na posição vertical o CG pode ser determinado inclinando-se o veículo em torno do eixo Y em um ângulo conhecido, medindo-se o peso W_f . Faz-se em seguida o equilíbrio de torques em relação aos eixos das rodas.

Para os veículos carregados o procedimento é similar, levando-se em consideração, além das cargas medidas nos eixos/rodas, o posicionamento e peso dos objetos transportados. Vale aqui ressaltar que a variação do posicionamento do CG, para os caminhões, é bastante significativa e depende diretamente do posicionamento da carga.

Normalmente os fabricantes fornecem o peso e posicionamento do CG do veículo vazio ou em ordem de marcha (veículo + motorista), além do peso máximo admitido para o veículo carregado. Por este motivo não se estuda uma função posição do CG mas a função região de variação da posição do CG (área sombreada da Figura 3.6), limitada pelo peso do veículo vazio (ou em ordem de marcha) e pelo peso total máximo. Mesmo na condição de peso total máximo, existem várias posições para o CG.

Os veículos de passeio possuem uma pequena variação de posição do CG, resultando em uma menor área no gráfico (fechamento e encurtamento da área sombreada).

Figura 3.6 – Função Região de Variação da Posição do CG.

As maiores dificuldades de obtenção da função região de variação da posição do CG referem-se aos veículos do tipo semi-reboque, que geralmente são de fabricantes diferentes (caminhão e reboque). Tal fato dificulta a obtenção das medidas de posição do CG para os diferentes carregamentos, em razão das diferentes dimensões e quantidade de eixos.

3.3. DINÂMICA DA FRENAGEM E DA ACELERAÇÃO

A preocupação fundamental que normalmente se tem em relação à frenagem refere-se à eficiência do sistema quando solicitado. Entretanto, para a estrutura dos pavimentos, é conveniente avaliar as solicitações dinâmicas decorrentes do comportamento do veículo durante a frenagem em alguns pontos localizados. A frenagem e a aceleração do veículo para retomada de velocidade são freqüentes, por exemplo, nas áreas adjacentes às pontes,

lombadas (obstáculos), ou ainda onde há necessidade de parada obrigatória (interseções e pontos de paradas de ônibus, por exemplo).

A Figura 3.7 mostra todas as forças que agem no veículo durante uma frenagem:

Figura 3.7 – Forças que Atuam no Veículo Durante a Frenagem (Adaptado de CANALE, 1989).

Essas forças podem ser determinadas pelas fórmulas apresentadas por CANALE (1989). São elas:

- Forças de frenagem (B_f e B_r) nas rodas dianteiras e traseiras, respectivamente: dependem da força de compressão das pastilhas, do coeficiente de atrito das superfícies e do raio efetivo da força de frenagem no disco;
- Resistência de rampa (R_g): depende do peso total do veículo e do ângulo de inclinação da pista de rolamento, que será positivo quando o veículo desce a rampa e negativo quando sobe;

- Resistência de Rolamento (R_r): dada pela soma das resistências (R_f e R_r) nas rodas dianteiras e traseira, respectivamente. Ela depende basicamente do peso total do veículo e do coeficiente de resistência ao rolamento;
- Resistência do ar (R_a): exerce pouca influência na frenagem de veículos tradicionais, sendo considerada apenas para os veículos que operam a grandes velocidades;
- Força devido à inércia do veículo (R_i): depende da massa do veículo (m) e da desaceleração do veículo na frenagem (b); outro efeito da inércia é o momento de inércia (M_i) das partes rotativas do veículo no eixo das rodas;
- Resistência da transmissão (M_t): é o torque necessário para vencer os atritos das engrenagens, mancais, juntas e movimentação de óleo. Comparada com as outras forças de frenagem, ela pode ser desprezada;
- Resistência do motor (M_{db}): é o torque de frenagem proveniente do motor, também conhecido por “freio-motor”, que depende da velocidade do veículo em cada instante e da marcha engrenada;
- Peso dinâmico (W_b): Durante a frenagem, o “peso” nas rodas dianteiras torna-se maior que nas rodas traseiras, por efeito da inércia. Esta distribuição dinâmica do peso têm influência básica nos limites de desempenho da frenagem e na distribuição ótima das forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras. Sob o ponto de vista da infra-estrutura dos transportes, vale observar a carga que o eixo dianteiro exercerá sobre o pavimento, visto que ocorre uma sobrecarga no mesmo e um alívio no eixo traseiro do veículo.

Os pesos dinâmicos, ainda tendo por base o apresentado por CANALE (1989), podem ser determinados fazendo-se o somatório dos torques em torno dos pontos “A” e “B” da figura 3.7:

$$W_{br} = \frac{1}{L} \cdot (L_f \cdot W - H \cdot W \cdot \text{Sen } \theta - m \cdot b \cdot H + R_a \cdot H_a) \quad (3.7)$$

$$W_{bf} = \frac{1}{L} \cdot (L_r \cdot W + H \cdot W \cdot \text{Sen } \theta + m \cdot b \cdot H - R_a \cdot H_a) \quad (3.8)$$

onde:

W_{bf} → Peso dinâmico nas rodas dianteiras;

W_{br} → Peso dinâmico nas rodas traseiras;

H → Altura do centro de gravidade;

H_a → Altura do ponto de aplicação da resistência do ar;

R_a → Resistência do ar;

θ → Ângulo de inclinação do pavimento (rampa);

m → Massa do veículo;

b → Desaceleração do veículo na frenagem;

Fazendo o somatório das forças na direção paralela ao solo, tem-se:

$$m \cdot b - R_a + W \cdot \text{Sen } \theta = B + f \cdot W \quad (3.9)$$

onde:

B → Força de Frenagem;

f → Coeficiente de resistência ao rolamento;

Assumindo a simplificação $H = H_a$ e aplicando 3.9 em 3.7 e 3.8, tem-se:

$$W_{br} = \frac{1}{L} \cdot (L_f \cdot W - H \cdot (B + f \cdot W)) = \frac{L_f \cdot W}{L} - \frac{H \cdot (B + f \cdot W)}{L} \quad (3.10)$$

$$W_{bf} = \frac{1}{L} \cdot (L_r \cdot W + H \cdot (B + f \cdot W)) = \frac{L_r \cdot W}{L} + \frac{H \cdot (B + f \cdot W)}{L} \quad (3.11)$$

Das Equações 3.2 e 3.3 e designando a transferência do peso dinâmico durante a frenagem por ΔW_b , tem-se:

$$W_{bf} = W_f + \Delta W_b \quad (3.12)$$

$$W_{br} = W_r - \Delta W_b \quad (3.13)$$

Conforme observado, este efeito gera uma sobrecarga no eixo dianteiro e, portanto, no pavimento, sendo mais significativos para os veículos de carga, visto que os mesmos tem um peso total muito maior que os veículos de passeio. Uma pequena variação no peso dinâmico dos caminhões pode resultar em uma grande sobrecarga nos pavimentos.

As Equações 3.7 a 3.13 refletem apenas um modelo simplificado para veículos com dois eixos. Para os caminhões com mais eixos o cálculo é um pouco mais complexo, mas o procedimento é similar. Neste caso deve-se quantificar $\Delta W_{b(i)}$ atuante no eixo i (Figura 3.8), o que pode ser feito através de medições práticas ou com o auxílio de modelos matemáticos em simulações no computador.

Figura 3.8 – Pesos Atuantes nos Eixos de um Caminhão Semi-Reboque.

Outra formulação foi apresentada por PACEJKA et al. (1987), que observaram que a força de frenagem exercida sobre o pavimento obedecia aproximadamente uma função seno do ângulo de escorregamento da roda. Essa “função inicial” foi comparada com dados medidos em campo através de um reboque (*test trailer*), construído pela *VOLVO Car Corp.* especialmente para a realização de testes nas condições de *Steady-State*⁽¹⁾, sendo realizados ajustes nos fatores envolvidos na função para adequá-la aos dados obtidos nos testes de campo.

O comportamento do veículo durante a retomada de velocidade é menos significativo que na frenagem e os pesos dinâmicos têm comportamento oposto (alívio no eixo dianteiro e sobrecarga no eixo traseiro), visto que se trata de uma aceleração e não desaceleração, como ocorre na frenagem.

Além da força de frenagem, a formulação apresentada por PACEJKA et al. (1987) também é capaz de determinar a força lateral do pneu em uma

⁽¹⁾ As condições de *Steady-State* consideram a variação da aceleração nula ($\frac{d\vec{a}}{dt} = 0$); $\left(\frac{d\vec{v}}{dt} = \text{constante}\right)$, ou seja, devido à pequena magnitude das acelerações, adota-se equações diferenciais lineares na modelagem dinâmica do veículo, adotando-se coeficientes de segurança para os transitórios (perturbações).

curva e também prever esses esforços quando os mesmos ocorrem de forma combinada.

3.4. COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS VEÍCULOS NAS CURVAS

O movimento das rodas exerce pouca influência sobre o comportamento dos pavimentos em termos de cargas dinâmicas, representando, entretanto, um fator importante no estudo da estabilidade dos veículos.

O movimento do veículo na realização de uma curva, descrito por HARTOG (1972) como “aproamento ou direcionamento em torno do eixo vertical”, produz um esforço lateral significativo quando realizado por veículos pesados. Tal fato pode ser observado nas rotatórias, onde nota-se, em grande parte dos casos, a ocorrência de corrugação do pavimento.

Quando o veículo está andando em uma curva, a interação dinâmica pneu-pavimento pode ser definida não apenas por esforços longitudinais (direção x), mas sim por componentes de esforços longitudinais e laterais, nas direções x e y , respectivamente.

Este comportamento pode ser estudado tanto pela realização de testes práticos com caminhões quanto pela utilização de modelos matemáticos que forneçam os esforços atuantes no pavimento. Conforme descrito no item 3.3, PACEJKA et al (1987) apresentam uma formulação capaz de prever a força lateral exercida pelos pneus no pavimento, na realização de uma curva. Foi ainda estudado o comportamento dos esforços quando há a combinação da frenagem e realização de uma curva. Entretanto, para esse caso a modelagem matemática mostra-se bastante complexa devido ao grande número de variáveis envolvidas e apresenta imprecisão.

Alguns resultados obtidos por PACEJKA et al. (1987) podem ser melhor observados na Tabela 3.1 para a força lateral máxima ($F_{y,máx}$),

considerando-se um de ângulo de escorregamento (ψ) de 10° (Figura 3.9) mediante uma força vertical (F_z) aplicada.

Figura 3.9 – Roda do Veículo em uma Curva Horizontal (Adaptado de CANALE, 1989)

Tabela 3.1 – Força Lateral Máxima do Pneu de um Veículo em uma Curva Horizontal (PACEJKA et al., 1987).

Força Lateral Máxima: $F_{y,máx}$ (N)	Força Vertical Aplicada: F_z (N)
6.900	8.000
5.600	6.000
3.800	4.000
2.000	2.000

Como pode ser observado na Tabela 3.1, para essa condição específica, os esforços tangenciais (laterais) nos pavimentos são significativos, de tal modo que devem ser melhor estudados, a fim de se prever e evitar defeitos do tipo “corrugação”, comuns nas curvas horizontais de pequenos raios.

As fórmulas apresentadas por PACEJKA et al. (1987) não levam em consideração o veículo como um todo, elas referem-se apenas a um modelo de pneu, sobre o qual uma força vertical é aplicada. Portanto, as mesmas representam apenas um modelo simplificado, eficiente para o estudo do comportamento do pneu, servindo como ferramenta auxiliar no estudo da dinâmica dos veículos rodoviários.

4. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Este capítulo mostra, de forma objetiva, os modelos matemáticos de pavimentos que podem ser aplicados nas simulações, sem levar em conta, no entanto, as propriedades dos materiais que os compõem. Mostra ainda como o perfil do pavimento é considerado na grande maioria dos modelos de simulações, inclusive no *TruckSim*. A interação dinâmica entre o veículo e o pavimento é apresentada considerando-se também os fatores de tráfego que influenciam no comportamento dinâmico dos pavimentos.

4.1. MODELOS MATEMÁTICOS DE PAVIMENTOS

Algumas propriedades e conceitos de dinâmica das estruturas são, também, aplicáveis aos pavimentos rodoviários. Entretanto, as equações do movimento das estruturas de pavimentos consideram, além do fator tempo (t), o fator espaço (z). Nesse caso, a Equação 2.3, resulta em:

$$m\ddot{x}_{(t,z)} + c\dot{x}_{(t,z)} + kx_{(t,z)} = P(t, z) \quad (4.1)$$

Embora os pavimentos apresentem propriedades visco-elásticas, as análises têm-se limitado, na maioria das vezes, à utilização de modelos elástico-lineares e não-lineares. Embora os conceitos da teoria das vibrações permitam tecer algumas considerações quanto aos modelos visco-elásticos, os mesmos não tem sido considerados nas. Tal fato deve-se às dificuldades de se obter, na prática, dados para as simulações, sendo ainda limitada a aplicação dessa teoria para os modelos visco-elásticos.

4.2. PERFIL DO PAVIMENTO: IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

De acordo com a definição (E867) da ASTM (*American Society of Testing and Materials*) apud SAYERS & KARAMIHAS (1997)², a irregularidade longitudinal pode ser definida como sendo desvios da superfície de um pavimento, em relação a uma superfície de referência plana perfeita, com dimensões características de modo a afetar a dinâmica do veículo, a qualidade de rolamento, as cargas dinâmicas e a drenagem da via.

Irregularidade é o desvio de pontos da superfície do pavimento de uma rodovia em relação a um plano de referência. Ela afeta a dinâmica e qualidade de rolamento de veículos e as ações de cargas dinâmicas transmitidas à via, podendo gerar aceleração vertical e lateral, sendo a aceleração vertical o principal fator que afeta a sensação de conforto dos motoristas e passageiros.

Muitos modelos de simulações de veículos consideram-no trafegando sobre uma superfície perfeitamente plana, o que não ocorre na realidade. Outros, no entanto, consideram um perfil hipotético irregular ou, ainda, permitem a entrada de dados reais medidos em campo com a utilização de equipamentos apropriados.

O perfil de um pavimento (Figura 4.1) é representado por dimensões horizontais e verticais relativas a um referencial adotado, que podem ser obtidas com diferentes equipamentos. SAYERS & KARAMIHAS (1997) comentam sobre os perfilômetros, que trabalham combinando três medidas: (1) uma elevação de referência; (2) uma altura relativa ao referencial; e (3) distância longitudinal. Essas três medidas são combinadas de diferentes formas, de acordo com o projeto do perfilômetro.

---

² ASTM - American Society of Testing and Materials (E867), 1996; apud SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M.; *The Little Book of Profiling – Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*; UMTRI – The University of Michigan Transportation Research Institute; Ann Arbor/MI, 1997.

Figura 4.1 – Perfil de um Pavimento (Adaptado de SAYERS & KARAMIHAS, 1997).

A irregularidade longitudinal pode ser identificada por diferentes formas de medidas: medidas diretas ou indiretas do perfil do pavimento, medidas baseadas na reação do veículo ou por medidas com laser. As medidas diretas podem ser obtidas com a utilização de equipamentos simples, como o conjunto “nível e mira” (figura 4.2).

Figura 4.2 – Equipamento Tipo “Nível e Mira” (Adaptado de SAYERS & KARAMIHAS, 1997).

As medidas indiretas são obtidas com equipamentos tipo perfilômetros, como o perfilômetro MERLIN (*Machine for Evaluating Roughness Using Low Cost Instrumentation*). As medidas baseadas na reação do veículo são obtidas com equipamentos tipo resposta: *Maysmeter*, *Bump Integrator* (BI), Rugosímetro BPR ou Integrador IPR/USP. Também existem perfilômetros que operam a altas velocidades, efetuando medidas com a utilização de raio laser.

Índice de Irregularidade Internacional (IRI)

O IRI (*International Roughness Index*) é um índice estatístico que mede, em metros por quilômetro (m/km) ou polegadas por milha (in/mi), a irregularidade do pavimento em relação ao perfil longitudinal do mesmo, com a utilização dos equipamentos apropriados anteriormente descritos.

Segundo SAYERS & KARAMIHAS (1997), várias experiências de medidas do IRI foram compartilhadas entre o *Road Profiler User Group* (RPUG), a *Federal Highway Administration* (FHWA), o *Highway Performance Monitoring System* (HPMS) e usuários de perfilômetros. Como resultado, verificou-se que as medidas do IRI de diferentes regiões são amplamente compatíveis. Até mesmo medidas de diferentes países podem ser comparadas diretamente.

Os equipamentos de medida direta, como o “nível e mira” (Figura 4.2), fornecem as medidas reais do perfil do pavimento, enquanto os equipamentos do tipo resposta necessitam de transformações matemáticas, geralmente com a utilização de algoritmos computacionais, para determinar o valor do IRI como uma função do perfil do pavimento.

A Figura 4.3 mostra o modelo físico “quarto de carro” (*Quarter Car*), considerado nos métodos computacionais que utilizam dados de equipamentos do tipo resposta.

Figura 4.3 – Esquema para a Determinação do IRI por Equipamentos do Tipo Resposta – Quarto de Carro (adaptado de SAYERS & KARAMIHAS, 1997).

Algumas considerações acerca do IRI foram feitas por SAYERS (1995):

- O IRI descreve as irregularidades do perfil que causam vibrações nos veículos;
- O IRI pode ser utilizado como parâmetro em funções que forneçam como resposta as medidas do perfil do pavimento, a aceleração vertical sentida pelo passageiro (qualidade de rolamento) e as cargas nos pneus (controle do veículo e segurança);
- O IRI é influenciado por comprimentos de onda na faixa de 1,2 a 30 metros;
- A escala IRI é linearmente proporcional à irregularidade do pavimento;
- O IRI foi o primeiro índice de irregularidade representativo e estável com o tempo;
- O IRI é rigorosamente definido como uma “transformação matemática” de um perfil real de pavimento.

Segundo QUEIRÓZ (1993), os valores típicos do IRI são:

- 1,5 a 2,5 m/km : pavimentos em excelente condição;
- > 12 m/km : pavimentos em péssimas condições.

Outras escalas têm sido usadas para representar a irregularidade longitudinal, com destaque para o QI (*Quarter-car Index*), expresso em contagens/ quilômetro e que foi muito utilizado quando da PICR - Pesquisa de Interrelacionamento dos Custos Rodoviários (QUEIRÓZ, 1993). Uma representação aproximada do QI em função do IRI é dada por:

$$QI = 13 \cdot IRI \quad (4.2)$$

A condição do pavimento em função do QI tem sido considerada da seguinte forma (QUEIRÓZ, 1993):

$15 < QI < 30$	excelente
$30 \leq QI < 45$	boa
$45 \leq QI < 60$	regular
$60 \leq QI < 75$	má
$QI \geq 75$	péssima.

Essa mesma noção de condições do pavimento, para o caso do IRI, pode ser observada na Figura 4.4, que mostra faixas do IRI representadas por diferentes classes de rodovias, identificando as velocidades normalmente utilizadas e características dos pavimentos.

Figura 4.4 – Faixas de IRI Representadas por Diferentes Classes de Rodovias (Adaptado de SAYERS & KARAMIHAS, 1997).

Estudos realizados por BOTTURA et al. (1996) mostraram o estado geral da irregularidade longitudinal da malha rodoviária do Estado de São Paulo, resumidos na Tabela 4.1. De acordo com esses valores, a malha rodoviária paulista, com extensão aproximada de 16.000 km, apresentou cerca de 85% de sua extensão com irregularidade menor que 39 contagens/quilômetro.

Tabela 4.1 – Estado Geral da Irregularidade Longitudinal da Malha Rodoviária do Estado de São Paulo (BOTTURA et al., 1996).

IRI	QI	Porcentagem da extensão Total
0 a 1	0 a 13	2,63
1 a 2	13 a 26	50,79
2 a 3	26 a 39	31,10
3 a 4	39 a 52	9,77
4 a 5	52 a 65	3,44
5 a 6	65 a 78	1,30
6 a 7	78 a 91	0,53
7 a 8	91 a 104	0,21
8 a 9	104 a 117	0,11
9 a 10	117 a 130	0,07
> 10	> 130	0,05
Total:		100,00

A Figura 4.5 mostra esses valores do IRI na forma gráfica, sendo expressas a porcentagem da extensão total e porcentagem acumulada.

Figura 4.5 – Valores de IRI da Malha Rodoviária do Estado de São Paulo, segundo BOTTURA et. al. (1996).

Nota-se, a partir da Figura 4.5, que cerca de 98% dos pavimentos paulistas estavam, na ocasião da realização da coleta dos dados, com o IRI entre 0 e 5, ou seja, em condições excelentes a regulares. Qualitativamente, tem-se a impressão que a malha rodoviária do Estado de São Paulo apresenta, na realidade, condições piores que as apresentadas por BOTTURA et. al. (1996). Tal impressão é corroborada pelos valores obtidos por MARTINS (1996), Figura 4.6, em uma importante rodovia que interliga o interior do Estado de São Paulo à Capital, passando por São Carlos, a rodovia Washington Luiz (SP-310).

Figura 4.6 – Valores de IRI para Trechos da Rodovia Washington Luiz, segundo MARTINS (1996).

Nota-se, a partir da figura 4.6, que grande parte dos trechos analisados apresentam valores de IRI superiores a 4 m/km, portanto, em condições ruins a péssimas. Tratando-se de uma grande rodovia, acredita-se que as vias secundárias, ou de menor porte, apresentam, muitas vezes, condições ainda piores.

4.3. INTERAÇÃO DINÂMICA PNEU-PAVIMENTO

A interação existente entre os veículos e os pavimentos tem sido objeto de pesquisa em diversas instituições em todo o mundo. De fato, a complexidade acerca deste assunto abre amplos caminhos na busca de novos conhecimentos que possam ser incorporados às normas técnicas.

A ação provocada pelo tráfego dos veículos nos pavimentos e nas pontes acentuam esta complexidade por se tratar de uma carga dinâmica, influenciada por diversos fatores de tráfego, tais como carga por eixo, pressão de enchimento dos pneus, tipo de rodagem, tipo de pneu, distribuição da pressão de contato pneu-pavimento, tipos de veículos e velocidade dos veículos. Tais fatores foram estudados por diversos pesquisadores (SEBAALY & TABATABAEE, 1993; FERNANDES JR., 1994; ROMERO et al., 1994; HSU et al., 1995; PIDWERBESKY, 1995).

Segundo KULAKOWSKI (1994), a maioria dos problemas associados à segurança, economia e qualidade total dos transportes rodoviários é afetada pelas características dos pavimentos e dos veículos, e ainda pelo modo como esses dois sistemas dinâmicos interagem.

Tanto as propriedades dinâmicas dos veículos quanto as dos pavimentos sempre foram consideradas isoladamente. Tais fatos conduziram a um desenvolvimento paralelo de estudos que não consideravam a interação entre os mesmos, como realmente ocorre. Com o intuito de eliminar esses conflitos, desde 1990 tem sido realizadas conferências sobre a interação veículo-via (*“Vehicle-Tire-Pavement Interface Conference”*) que muito tem contribuído para a evolução dos estudos acerca da interação dinâmica veículo-pavimento.

4.3.1. Amortecedores

Segundo HARTOG (1972), as ressonâncias ocorrem muitas vezes e podem ser facilmente observadas em modelos antigos e também em veículos modernos, quando removidos os amortecedores. O movimento de arfagem do corpo do veículo (vide item 3.1, a) entra em ressonância nas velocidades médias, quando em operação numa estrada com irregularidades de comprimento de onda longo. Por exemplo, a 45 km/h em estradas de concreto, com juntas regularmente espaçadas de cerca de 12 metros, ocorre uma arfagem violenta nos carros com amortecedores insuficientes. A outra frequência natural (vide item 3.1, b) normalmente entra em ressonância a baixas velocidades, quando operando sobre paralelepípedos, por exemplo. Os eixos podem vibrar tanto que os pneus abandonam o chão a cada ciclo.

Esses problemas, foram controlados pela introdução de absorvedores de choque através das molas do corpo ou amortecedores comuns (Figura 3.6), além do amortecimento obtido através dos pneus. Os maiores problemas, entretanto, referem-se aos ressaltos ou irregularidades que ocorrem nos

pavimentos flexíveis que, além desconforto ao usuário, aceleram o desgaste tanto dos veículos quanto do pavimento.

4.3.2. Aceleração Vertical

A aceleração vertical é produzida pela interação entre o pneu do veículo e os ressaltos do pavimento (irregularidades). O efeito da aceleração vertical é tanto pior quanto maior o seu valor, acelerando o desgaste do pavimento e do veículo, além de gerar desconforto ao usuário.

Considere uma estrada cujas irregularidades formem uma superfície senoidal (Figura 4.7) ou uma estrada lisa com um ressalto único sobre ela (Figura 4.8). Considere, também, uma roda completamente rígida.

Figura 4.7 – Automóvel Percorrendo uma Estrada Ondulada (Adaptado de HARTOG, 1972).

Figura 4.8 – Ressonância numa Estrada (Adaptado de HARTOG, 1972).

Seja $y = f(x)$ a representação do ressalto da estrada (Figura 4.8). Para um carro com velocidade v , temos $x = vt$. Então a velocidade vertical será:

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = v \frac{dy}{d(vt)} = v \frac{dy}{dx} \quad (4.3)$$

e a aceleração vertical será:

$$\ddot{y} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dt} \right) = v \frac{d}{d(vt)} \left(\frac{dy}{dt} \right) = v \frac{d}{dx} \left(v \frac{dy}{dx} \right) = v^2 \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (4.4)$$

Como d^2y/dx^2 depende apenas da forma do ressalto, a aceleração vertical da roda aumenta com o quadrado da velocidade. Se a roda for rígida (sem pneu), as forças que atuam sobre a roda, assim como aquelas sobre a estrada, são o produto da massa da roda e essa aceleração (HARTOG, 1972).

4.3.3. Coeficiente de Impacto

Neste trabalho considera-se como parâmetro de comparação, entre as cargas dinâmicas e estáticas, um coeficiente de impacto (f), que é expresso pela relação entre a carga dinâmica vertical máxima ($Fz_{\max}$) e a carga estática (Fz_{est}) aplicada no eixo de um veículo trafegando sobre um perfil de pavimento. Esse coeficiente é dado pela Equação 4.5.

$$f = \frac{Fz_{\max}}{Fz_{\text{est}}} \quad (4.5)$$

Fisicamente, isso significa que a carga vertical máxima, causada pelo ao impacto dinâmico, pode ser até f vezes a carga estática considerada. Ou seja, para $Fz_{\max} = Fz_{\text{est}}$, tem-se $f = 1,0$.

São também utilizados, como parâmetros estatísticos, a média aritmética e o desvio padrão dos valores de carga vertical. A média dos valores de carga vertical serve para verificar a existência de possíveis erros nas simulações, visto que a média obtida deve ser próxima do valor da carga estática considerada. Já o desvio padrão serve para avaliar a magnitude das variações da carga dinâmica ao longo do trecho considerado.

Neste trabalho, as medidas de carga foram obtidas para intervalos de tempo de 0,01 s, durante 10 segundos de simulação, resultando em 1001 medidas de carga vertical por roda para cada simulação. Vale ressaltar que foram realizadas um total de 450 simulações, 207 das quais efetivamente apresentadas neste trabalho, com as demais 243 tendo sido utilizadas para a

identificação dos recursos e limitações do Programa *TruckSim* e para a realização de pré-análises do comportamento dos fatores a serem avaliados.

4.3.4. Fatores de Equivalência de Carga

Os fatores de equivalência de carga (FEC) permitem a conversão de aplicações de diferentes solicitações em um número equivalente de aplicações da solicitação padrão, possibilitando o dimensionamento e a previsão do desempenho de pavimentos para o tráfego misto real.

Os fatores de equivalência de carga utilizados no Brasil são aplicados no dimensionamento de pavimentos novos e de reforço de pavimentos existentes. Para o Método de Restauração de Pavimentos DNER-PRO 159-85 (DNER, 1985), os FEC's são baseados no Método da AASHTO, cujos valores são dados pelas equações apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Fatores de Equivalência de Carga para o Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis (DNER-PRO 159-85).

Tipo de Eixo	Equações (P em kN)
ESRS	$F_{SS} = \left(\frac{P_{\text{eixo}}}{76,20} \right)^{4,32} \quad (4.6)$
ESRD	$F_{SD} = \left(\frac{P_{\text{eixo}}}{80,12} \right)^{4,32} \quad (4.7)$
TDRD	$F_{TD} = \left(\frac{P_{\text{eixo}}}{147,88} \right)^{4,14} \quad (4.8)$
TTRD	$F_{TT} = \left(\frac{P_{\text{eixo}}}{225,06} \right)^{4,22} \quad (4.9)$

onde: P_{eixo} = peso bruto total sobre o eixo.

O método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem –DNER (SOUZA, 1981) utiliza os FEC's do Método do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Os FEC's são apresentados na forma de gráficos, em função da carga por eixo, para eixos simples e tandem duplo.

A curva original do Método do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos resulta na Equação 4.10 (SÓRIA, 1996).

$$FEC_{1/0} = 10^a \quad (4.10)$$

onde:

$FEC_{1/0}$: fator de equivalência da carga P_1 em relação à carga P_0 ;

$$a = \frac{\sqrt{\frac{P_1}{P_0}} - 1}{0,231} \quad \text{Para eixos simples} \quad (4.11)$$

$$a = \frac{\sqrt{\frac{P_1}{P_0}} - 1}{0,260} \quad \text{Para eixos em tandem} \quad (4.12)$$

P_1 : carga qualquer;

P_0 : carga padrão ou carga de referência.

Isso significa que uma aplicação de uma carga qualquer (P_1) equivale a FEC aplicações de uma carga padrão (P_0) ou que N_1 aplicações da carga P_1 equivalem a $N_1 \times FEC = N_{(0/1)}$ aplicações da carga P_0 (SÓRIA, 1997).

A curva original, dada pela Equação 4.10, aparece no Método do DNER estendida até 20 toneladas. As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam valores obtidos nos gráficos do DNER e as curvas calculadas pelo método original, para eixos simples e tandem duplo, respectivamente.

Figura 4.9 – Fator de Equivalência de Carga para Eixos Simples, Segundo o Método do DNER (Adaptado por SÓRIA, 1996).

Figura 4.10 – Fator de Equivalência de Carga para Eixos em Tandem Duplo, Segundo o Método do DNER (Adaptado por SÓRIA, 1996).

Segundo SÓRIA (1997), por razões de coerência interna do modelo matemático do “Método CBR” (SOUZA, 1981), a expressão do FEC pode ser dada por:

$$FEC_{1/0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{4,5} \quad (4.13)$$

Neste trabalho, o mesmo conceito é utilizado apenas para avaliar o efeito relativo das cargas dinâmicas (Fz_{din}), obtidas nas simulações, com as cargas estáticas (Fz_{est}) consideradas. Nesse caso, os Fatores de Equivalência de Cargas Dinâmicas (FECD) são dados por:

$$FECD = \left(\frac{Fz_{din}}{Fz_{est}} \right)^{4,5} \quad (4.14)$$

As cargas dinâmicas são instantâneas, variando ao longo do tempo de simulação e apresentando valor médio próximo ao valor da carga estática. Portanto, considera-se neste trabalho a carga dinâmica máxima (Fz_{max}) para a avaliação dos efeitos de possíveis sobrecargas no pavimento. Nesse caso, a Equação 4.14 resulta em:

$$FECD = \left(\frac{Fz_{max}}{Fz_{est}} \right)^{4,5} = f^{4,5} \quad (4.15)$$

onde f é o coeficiente de impacto devido à carga dinâmica vertical máxima observada, determinado pela Equação 4.5.

4.4. FATORES QUE INFLUENCIAM A INTERAÇÃO VEÍCULO - PAVIMENTO

Diversos fatores de tráfego e propriedades dinâmicas dos veículos influenciam diretamente o comportamento estrutural dos pavimentos, conforme descritos por FERNANDES JR. (1994).

4.4.1. Carga por Eixo

A carga por eixo, independentemente dos fatores ambientais, do comportamento estrutural dos pavimentos e da ação combinada de outros fatores de tráfego, é a que mais afeta a deterioração dos pavimentos. A carga por eixo, pode, muitas vezes, não ser o único fator significativo, mas tem que ser considerada, sempre, quando se tratar dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho dos pavimentos.

Segundo FERNANDES JR. (1994), há uma relação exponencial entre as cargas por eixo e a deterioração dos pavimentos, tendo sido obtido um valor da ordem de 4 (quatro) em estudos realizados no *AASHO Road Test* (década de 60). Independentemente do valor desse expoente, que normalmente varia entre 3 e 6, pode-se afirmar que há considerável aumento de deterioração dos pavimentos quando ocorrem acréscimos nas cargas por eixo.

4.4.2. Peso Bruto Total Combinado

O que causa a deterioração dos pavimentos é a carga por eixo, não havendo relação direta, nas análises estáticas, entre o peso bruto total combinado (PBTC) e o desempenho dos pavimentos. Estudos realizados por FABRI et al. (1990) compararam os diferentes tipos de caminhões que normalmente trafegam nas rodovias brasileiras e os veículos que trafegam com permissão especial (VCL's - Veículos Combinados Longos), classificando-os segundo um fator de destruição (FD), dado pela equação:

$$FD = \frac{\sum FEC}{L_t} \quad (4.16)$$

onde:

FEC : Fator de Equivalência de Cargas;

Lt : Lotação (t).

Os resultados desses estudos são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Classificação dos Veículos Convencionais e Especiais, segundo o Fator de Destruição dos Pavimentos (adaptado de FABBRI et. al, 1990).

Veículos Convencionais: que trafegam normalmente nas rodovias brasileiras (veículos com no máximo uma articulação)					
Veículo	Configuração	FD x 100		Classificação	
		AASHTO*	DNER*	AASHTO	DNER
<i>Toco</i>		31,13	42,63	Sexto	Primeiro
<i>Trucado</i>		12,71	57,93	Primeiro	Sétimo
<i>Semi-Reb.3</i>		32,12	44,53	Oitavo	Terceiro
<i>Semi-Reb.4</i>		20,65	57,05	Terceiro	Sexto
<i>Romeu & Julieta-4</i>		31,96	44,49	Sétimo	Segundo
<i>Romeu & Julieta-5</i>		26,45	60,04	Quarto	Oitavo
Veículos Especiais: que trafegam com permissão especial nas rodovias brasileiras (veículos com duas ou mais articulações)					
Veículo	Configuração	FD		Classificação	
		AASHTO*	DNER*	AASHTO	DNER
<i>Tre-minhão</i>		28,67	54,64	Quinto	Quinto
<i>Rodo-trem 5</i>		32,26	45,01	Nono	Quarto
<i>Rodo-trem 9</i>		13,87	66,48	Segundo	Nono
* Método de cálculo dos FEC's para a determinação do Fator de Destruição.					

De acordo com a classificação mostrada na Tabela 4.3, os veículos especiais não necessariamente acarretam maior deterioração aos pavimentos. Independentemente do método de cálculo dos Fatores de Equivalência de Cargas (AASHTO ou DNER), as composições especiais (VCL's – Veículos Combinados Longos) ocupam posições intermediárias na classificação segundo o Fator de Destruição e, portanto, com base em análises estáticas, não são piores nem melhores que as convencionais sob o ponto de vista da deterioração dos pavimentos (FERNANDES JR., 1994).

Analogamente, considera-se neste trabalho o fator de destruição devido às cargas dinâmicas (FD_{din}) como a relação entre a soma dos FECD's e a lotação do veículo (Equação 4.17).

$$FD_{din} = \frac{\sum FECD}{Lt} \quad (4.17)$$

Neste trabalho, tanto a carga vertical máxima por eixo (Fz_{max}), quanto o peso bruto total combinado (PBTC), foram observados em instantes isolados. Ou seja, os mesmos não ocorrem necessariamente no mesmo instante. A forma de determinação desses valores pode ser melhor observada na Tabela 4.4, que mostra um exemplo da planilha de cálculo utilizada para a determinação dos valores máximos, médias e desvios-padrão, cujos resultados são apresentados nos anexos deste trabalho.

A carga vertical foi obtida para intervalos de 0,01 segundo, durante 10 segundos de simulação, resultando em 1001 medidas de cargas verticais para cada roda (em apenas uma simulação). Para o caso dos redutores de velocidade (sonorizadores), foram obtidos dados em intervalos de 0,001 segundo para maior precisão.

Tabela 4.4 – Planilha de Cálculo dos Valores Máximos de Carga Vertical, Médias e Desvios-Padrão de Uma Simulação.

Medida	Pavimento: Wavyst			IRI (m/km): 4,379			Arquivo: W1
	Velocidade (mi/h): 43,50			Suspensão: Padrão			
	Carga por eixo:Limite Legal - 20% (lbf):				10782,57	30550,6	41333,17
	Tempo (s) (s)	Fz L1 (lbf)	Fz L2 (lbf)	Fz L3 (lbf)	E1:ES-RS (lbf)	E2:TD-RD (lbf)	PBTC (lbf)
1	0,00	5391,50	7637,75	7637,75	10783,00	30551,00	41334,00
2	0,01	4903,36	7648,71	7625,74	9806,71	30548,89	40355,60
3	0,02	4831,01	7671,73	7601,21	9662,02	30545,88	40207,90
4	0,03	4975,00	7698,29	7573,85	9950,01	30544,30	40494,30
5	0,04	5227,10	7718,54	7552,53	10454,21	30542,14	40996,35
:	:	:	:	:	:	:	:
542	5,41	5068,11	10114,33	9037,81	10136,21	38304,27	48440,49
543	5,42	5330,59	10223,87	9395,93	10661,18	39239,61	49900,79
544	5,43	5530,19	9383,71	9419,56	11060,38	37606,55	48666,93
:	:	:	:	:	:	:	:
964	9,63	6466,77	8285,99	8835,96	12933,53	34243,88	47177,42
965	9,64	6862,12	9172,22	8460,64	13724,25	35265,73	48989,98
966	9,65	6771,27	9547,51	7818,41	13542,55	34731,83	48274,38
:	:	:	:	:	:	:	:
997	9,96	4290,27	7239,03	9009,33	8580,55	32496,71	41077,26
998	9,97	4268,30	8187,32	9967,53	8536,61	36309,71	44846,32
999	9,98	4722,85	9264,08	10099,28	9445,69	38726,71	48172,41
1000	9,99	4815,40	9671,89	9427,38	9630,81	38198,54	47829,35
1001	10,00	4553,23	9424,54	8052,39	9106,47	34953,87	44060,33
Carga (lbf)		Roda 1	Roda 2	Roda 3	E1:ES-RS	E2:TD-RD	PBTC
Máximo:		6862,12	10223,87	10099,28	13724,25	39239,61	49900,79
Média:		5250,44	8680,60	8594,71	10500,89	34550,60	45051,49
DesvPad:		805,84	1011,24	911,97	1611,69	3311,03	3735,50
QUADRO RESUMO - 1							
Carga(kN)		Roda 1	Roda 2	Roda 3	E1:ES-RS	E2:TD-RD	PBTC
Máximo:		30,55	45,51	44,96	61,10	174,68	222,14
Média:		23,37	38,64	38,26	46,75	153,81	200,55
Desvio Padrão:		3,59	4,50	4,06	7,17	14,74	16,63
Carga por eixo:Limite Legal - 20% (kN):					48	136	184
Pavimento: Wavyst				IRI (m/km): 4,379		Arquivo:	
Velocidade (km/h): 70				Suspensão: Padrão		W1	

4.4.3. Tipo de Eixo

Os quatro tipos de eixos normalmente utilizados pelos veículos de carga que trafegam nas rodovias brasileiras são apresentados na figura 4.9.

Figura 4.11 – Configurações dos Eixos de Veículos Rodoviários de Carga (Adaptado de FERNANDES JR., 1994).

Para se ter uma idéia da influência do tipo de eixo sobre os pavimentos, o dano causado por um tandem duplo de 160 kN (FEC=1,7) é menor que o dano causado por duas passagens de um eixo simples de 80 kN (FEC=2,0), de acordo com o método da AASHTO (1986).

4.4.4. Tipo de Pneu

Os pneus normalmente utilizados pelos veículos de carga brasileiros são os pneus do tipo radial e diagonal. Os pneus radiais apresentam, conforme apresentado por FERNANDES JR. (1994), melhores características quanto à durabilidade, desgaste, economia de combustível, estabilidade, dirigibilidade e controle, apresentando, ainda, a mesma facilidade de manutenção. Embora os pneus radiais apresentem maior custo de aquisição, os mesmos vêm substituindo, de forma crescente, os pneus diagonais.

Outro tipo de pneu que é usado nos veículos de carga, é o pneu extralargo (conhecido por *supersingle* ou *wide-single*). Resultados obtidos em estudos realizados por GILLESPIE et al. (1992), mostraram que, considerando-se a forma de deterioração “trincas por fadiga do revestimento”,

os pneus extralargos chegam a ser de 4 a 7 vezes mais danosos que as rodas duplas e, considerando-se a “deformação permanente nas trilhas de rodas”, os pneus extralargos são de 1,5 a 2 vezes mais danosos que as rodas duplas.

4.4.5. Tipo de Rodagem

Os tipos de rodagem normalmente utilizados nos veículos rodoviários de carga são as rodas simples com pneus convencionais nos eixos dianteiros e rodas duplas com pneus convencionais nos demais eixos. CHRISTISON et. al. (1978) *apud* FERNANDES JR. (1994)³, afirmam que, para uma mesma carga por eixo, um pneu simples é de 7 a 10 vezes pior que as rodas duplas. Outros estudos realizados por GILLESPIE et al. (1992), mostraram que eixos dianteiros com pneus simples convencionais, carregando 55 kN, podem ser mais danosos que eixos com rodas duplas convencionais carregando 90 kN.

4.4.6. Pressão de Enchimento dos Pneus

O efeito da pressão de enchimento dos pneus afeta a área de contato com o pavimento, que será menor quanto maior a pressão de enchimento. Tal concentração de esforços resulta em maiores tensões e deformações nos pavimentos.

A pressão de enchimento dos pneus utilizados durante o *AASHO Road Test* variou entre 528 e 563 kPa (75 e 80 psi), tendo aumentado, nos Estados Unidos, para cerca de 703 a 738 kPa (100 e 105 psi) com o advento dos pneus radiais. Na Europa, chega a cerca de 985 kPa (140 psi) nos pneus extralargos e, no Brasil, pode-se admitir que a pressão de enchimento dos pneus (média) é da ordem de 844 kPa (120 psi), (FERNANDES JR., 1994).

---

³ CHRISTISON, J. T.; ANDERSON, K. O.; SHIELDS, B. P.; *In Situ Measurements of Strains and Deflections in a Full-Depth Asphaltic Concrete Pavement*; Proc. Assoc. Asphalt Paving Technology – Vol. 47; 1978; *apud* FERNANDES JR., J. L.; *Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego Sobre o Desempenho de Pavimentos*; Tese de Doutorado - EESC/USP, São Carlos/SP, 1995.

4.4.7. Distribuição da Pressão de Contato

Conforme descrito anteriormente, o efeito da pressão de enchimento dos pneus influencia diretamente a distribuição da pressão de contato e, conseqüentemente, as solicitações atuantes nos pavimentos.

A pressão de contato pneu-pavimento não é uniforme e nem atua sobre uma superfície circular. Na realidade, ela distribui-se irregularmente sobre uma superfície aproximadamente elíptica e, apesar de pequena, existe uma diferença entre as tensões e deformações em um pavimento causadas por pneus radiais e diagonais com uma mesma carga por eixo (FERNANDES JR., 1994). No entanto, vários modelos de simulações de carga sobre pavimentos consideram-na circular. Por exemplo, o programa computacional ELSYM5, que faz análise elástico-linear de pavimentos em multi-camadas, considera a área de distribuição da pressão de contato circular.

4.4.8. Variação Lateral da Trajetória das Rodas

Esse fator refere-se ao fato de que os veículos, além de possuírem diferentes configurações de eixos, não passam sempre sobre uma mesma trajetória. Em função dessa variação lateral da trajetória dos veículos, a um determinado número de operações corresponde um número inferior de “coberturas” (passagem da carga considerada sobre um mesmo ponto da estrutura em análise), sendo de maior interesse para o dimensionamento de pavimentos o número de “coberturas” (FERNANDES JR., 1994).

4.4.9. Manobras

A influência de fatores relacionados à manobra dos veículos (aceleração, frenagem e realização de curvas) sobre a deterioração dos pavimentos rodoviários já foi descrita no capítulo 3 do presente trabalho.

4.4.10. Velocidade

A influência da velocidade está, sobretudo, relacionada às condições de rolamento da superfície dos pavimentos, conforme descrito nos itens 4.2 e 4.3,

mas não se deve esquecer que uma maior velocidade também implica em menor tempo de aplicação de carga, o que é benéfico para o pavimento.

Segundo GILLESPIE et. al. (1992), os efeitos dinâmicos da velocidade prevalecem a partir de um determinado nível de irregularidade longitudinal, ou seja, as cargas dinâmicas e a deterioração aumentam com o aumento da velocidade, enquanto que a redução da deterioração com o aumento da velocidade, em função do menor tempo de aplicação da carga, prevalece em rodovias com pequena irregularidade longitudinal.

4.4.11. Tipo de Suspensão

A suspensão é um sistema mecânico que conecta os eixos ao chassis (estrutura) do veículo, sendo projetada para maximizar a capacidade de suportar as cargas, a durabilidade, a estabilidade e o controle dos veículos, mediante a redução e amortecimento dos movimentos verticais dos veículos. Elas podem ser representadas por um sistema mola e amortecedor, combinados em paralelo, conforme o modelo físico de veículo mostrado na Figura 3.1.

Os tipos mais utilizados de suspensão são os seguintes:

- *Feixe de Molas*: apresenta baixo custo, é leve e quase não necessita de manutenção. É o tipo mais comum e foi o sistema de suspensão utilizado pelos veículos de carga durante o *AASHO Road Test*, sendo ainda quase universal nos eixos dianteiros dos caminhões. Sua atividade dinâmica é moderada. São também conhecidas como molas semi-elípticas, em razão da forma como as “folhas de aço” são dispostas;
- *Suspensão Pneumática*: consiste de ar comprimido contido por bolsas de borracha. É o tipo mais caro, mas fornece maior conforto e proteção às cargas em virtude de apresentar atividade dinâmica mais baixa.

Segundo GILLESPIE et. al. (1992), os dois tipos de suspensão têm efeito moderado sobre a deterioração dos pavimentos, sendo que os efeitos da irregularidade longitudinal sobre o desempenho dos pavimentos são maiores que as diferenças observadas entre os dois tipos de suspensão, ou seja, a suspensão pneumática resulta em redução de deterioração entre 10 e 20%, quando comparada com a suspensão em feixe de molas, variação inferior à que ocorre em função da passagem de uma condição de irregularidade longitudinal alta para uma condição de irregularidade baixa.

4.4.12. Cargas Dinâmicas

Conforme enfatizado em vários pontos desse trabalho, as cargas atuantes nos pavimentos são dinâmicas, sendo influenciadas por vários fatores (listados anteriormente). Algumas conclusões, apresentadas por diferentes autores e listadas por FERNANDES JR. (1994) são:

- As cargas dinâmicas aumentam com a velocidade (não-linearmente) e com a irregularidade longitudinal dos pavimentos;
- As suspensões pneumáticas acarretam menores cargas dinâmicas que as suspensões em feixe de molas;
- A redução da rigidez do sistema de suspensão geralmente reduz os efeitos dinâmicos;
- as cargas dinâmicas aumentam com a pressão dos pneus (ou seja, a pressão enrijece os pneus, prejudicando o desempenho do sistema de suspensão, do qual o pneu participa);
- Pneus radiais acarretam cargas dinâmicas levemente inferiores às dos pneus diagonais;
- As cargas dinâmicas podem resultar, nos locais críticos, em deterioração dos pavimentos 4 vezes maior do que a que seria obtida com uma carga estática, em função de “repetibilidade espacial” das solicitações dinâmicas. Segundo o conceito de repetibilidade espacial, existem pontos críticos em uma rodovia que são significativamente mais solicitados por todos os veículos.

4.5. PONTES RODOVIÁRIAS

Usualmente no estudo das estruturas supõe-se que as cargas sejam aplicadas de maneira que sua intensidade cresça gradualmente desde zero até o valor total, no entanto as cargas móveis reais nas pontes são aplicadas bruscamente (DEBS & TAKEYA, 1995). Esse impacto vertical corresponde ao acréscimo das cargas dos veículos provocado pelo movimento das mesmas cargas sobre a ponte (PFEIL, 1979).

O impacto vertical nas pontes rodoviárias é causado pelos seguintes efeitos:

- a) *Efeito do deslocamento das cargas*: pode ser interpretado analiticamente, tendo sido realizados trabalhos de pesquisa, nos quais os resultados matemáticos foram confirmados em modelos de laboratório (PFEIL, 1979);
- b) *Força centrífuga causada pela deformação da estrutura da ponte sob a ação das cargas*: efeito Willis-Zimmermann (DEBS & TAKEYA, 1995);
- c) *Irregularidades no pavimento*: efeito aleatório, determinado por processos experimentais (PFEIL, 1979);
- d) *Propriedades dinâmicas dos veículos*: existência de excêntricos nas rodas, ação das molas, oscilações próprias dos veículos em torno do seu eixo longitudinal (BERNARDO, 1980; DEBS & TAKEYA, 1995).

Neste trabalho é avaliado apenas o efeito da irregularidade no pavimento, mediante simulações sobre perfis de pavimentos em concreto de

cimento Portland (Capítulo 7). Vale ressaltar que as propriedades dinâmicas dos veículos são consideradas implicitamente nos modelos matemáticos de veículos do *TruckSim*.

No Brasil os valores característicos das cargas móveis verticais são fixados nas normas NBR 7188 (ABNT, 1984) e NBR 7189 (ABNT, 1985). De acordo com o item 7.2.1.2 da NBR 7187 (ABNT, 1986), o efeito das cargas móveis nas pontes deve ser analisado pela teoria da Dinâmica das Estruturas. É permitido, no entanto, assimilar as cargas móveis a cargas estáticas, através de uma simplificação por coeficientes de impacto que, nos elementos estruturais de obras rodoviárias, é definido por:

$$\varphi = 1,4 - 0,007 \ell \geq 1,00 \quad (4.18)$$

sendo φ o coeficiente de impacto e ℓ o comprimento, em metros, de cada vão teórico (Figura 4.12) do elemento carregado, qualquer que seja o sistema estrutural. No caso de vãos desiguais, em que o menor vão seja igual ou superior a 70% do maior, permite-se considerar um vão ideal equivalente à média aritmética dos vãos teóricos. No caso de vigas em balanço, é tomado igual a duas vezes o seu comprimento (NBR 7187 - ABNT, 1986).

A Figura 4.12 mostra uma situação típica de um elemento estrutural carregado de uma ponte simples, com apenas um vão livre, bem como o esquema estático considerado.

Figura 4.12 – Esquema Estático Típico de uma Viga de Ponte.

Segundo (DEBS & TAKEYA, 1995), é importante observar que o efeito dinâmico das cargas nas pontes é tanto maior quanto mais leve for a estrutura em relação às cargas que o provocam, resultando em maiores coeficientes de impacto para pontes com menores vãos. Ainda em decorrência disso, nota-se que a influência da ação dinâmica das cargas há de ser maior em pontes metálicas do que em pontes de concreto, mais pesadas.

A Figura 4.13 mostra valores calculados de coeficientes de impacto em função dos vãos teóricos, tomando-se por base a Equação 4.18.

Figura 4.13 – Coeficiente de Impacto em Função do Vão Teórico.

5. MODELOS DE SIMULAÇÕES DE CARGAS DINÂMICAS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A maioria dos métodos mecanísticos de dimensionamento de pavimentos não consideram os efeitos dinâmicos provocados pelo tráfego dos veículos, assumindo que as cargas móveis têm o mesmo comportamento que cargas estáticas. As respostas dos pavimentos, medidas em campo, têm indicado claramente que alguns fatores como a velocidade e a pressão de enchimento dos pneus afetam significativamente as tensões e deformações nos pavimentos.

SEBAALY et al (1993) constataram uma redução em torno de 50% na deformação elástica máxima quando a velocidade do veículo era aumentada de 32 km/h para 56 km/h. Outros estudos realizados por HUHTALA & PIHLAJAMÄKI (1992), baseados em um modelo tridimensional por elementos finitos, chegaram a resultados similares. Entretanto, o problema do efeito conjunto da velocidade e irregularidades nos pavimentos conduz a um comportamento oposto, que é levado em conta através de coeficientes de impacto. Embora se tenha conhecimento da importância da consideração dos efeitos dinâmicos nos projetos dos pavimentos, apenas recentemente os mesmos têm sido tratados analiticamente.

Este capítulo apresenta alguns modelos aplicados em simulações de cargas dinâmicas dos veículos rodoviários sobre os pavimentos. São também

apresentadas algumas características dos programas computacionais em que os mesmos são aplicados.

Conforme descrito anteriormente, a análise dos efeitos dinâmicos dos veículos é baseada em métodos analíticos e experimentais. Os estudos experimentais dos efeitos dinâmicos provocados pelo tráfego dos veículos apresentam custo relativamente alto, o que torna atrativos os métodos computacionais, alternativa utilizada neste estudo.

5.2. MODELOS MATEMÁTICOS: PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Os estudos e simulações de cargas dinâmicas em pavimentos rodoviários e pontes são relativamente recentes, de tal modo que os modelos disponíveis são poucos e alguns deles ainda utilizam-se de princípios da estática adaptados às simulações dinâmicas.

5.2.1. Modelo MOVE

Modelo baseado em uma única camada com características médias de cada propriedade considerada. Foi utilizado por CHEN (1987) *apud* ZAFIR et al. (1994)⁴, e incorporado ao programa computacional *MOVE*.

Face à grande diversidade de materiais que compõem as camadas dos pavimentos, o modelo incorporado ao programa *MOVE* representa uma solução apenas razoável para o estudo dos mesmos, pois ignora o comportamento individual das camadas, ou seja, para um determinado número de solicitações pode ocorrer ruptura de uma camada, embora outras ainda apresentem boas condições.

---

⁴ CHEN, S. S.; *The Response of Multilayered System to Dynamic Surface Loads*; PhD Dissertation; University of California; Berkeley, 1987; *apud* ZAFIR, Z.; SIDDHARTHAN, R.; SEBAALY, P. E.; *Dynamic Pavement-Strain Histories from Moving Traffic Load*; Journal of Transportation Engineering, vol. 120, No. 5; Reno/NV, 1994.

5.2.2. Modelo SAPSI

O programa computacional *SAPSI*, descrito por MONISMITH (1992) e SOUZA et al. (1988), é baseado na teoria de camadas visco-elásticas lineares e no método dos elementos finitos. Na realidade, o *SAPSI* não considera uma carga verdadeiramente móvel, mas um pulso de carga com duração igual ao tempo necessário para a roda passar pela área em análise (a duração da pulsação é uma função da velocidade do caminhão).

Estudos realizados por CHATTI et al. (1995) mostraram que a modelagem de uma carga móvel de caminhão como uma pulsação estacionária não fornece uma representação exata, mas apenas razoável, visto que neste caso a carga/pressão do pneu é aplicada apenas quando o pneu está em contato direto com o ponto de medida no pavimento, ou seja, quando o pneu não está em contato com esse ponto, o pneu não exerce efeito algum sobre o mesmo. Na realidade a carga de roda envia ondas de tensão quando se aproxima do ponto de medida. Essas ondas se propagam de forma que o efeito da carga de roda, apesar de mais pronunciado à medida em que se aproxima do ponto, também é sentido antes e depois que a carga esteja diretamente sobre o ponto.

Alguns resultados do *SAPSI* são descritos a seguir (CHATTI et al., 1995):

- Cálculos teóricos indicam que o efeito da velocidade é mais pronunciado na deflexão vertical do que na deformação elástica na parte inferior na camada de concreto asfáltico;
- A deformação elástica aumenta cerca de 50% quando a pressão do pneu aumenta de 30 para 90 Psi;
- A pressão do pneu tem menor efeito na deflexão vertical do que na deformação elástica na camada de concreto asfáltico.

5.2.3. Modelo DYNPAVE

Apresentado por ZAFIR et al. (1994), baseia-se em uma aproximação da teoria das camadas finitas, utilizando-se da técnica de transformação de Fourier, sendo capaz de prever a resposta do pavimento em termos de tensões, deformações e deslocamentos (deflexões). O mesmo considera cargas múltiplas e uma pressão de interação pneu-pavimento não uniforme. A área de contato do pneu do veículo em movimento é considerada retangular. A camada de concreto asfáltico é considerada visco-elástica e as propriedades podem variar como uma função da frequência de carregamento, sendo a base e o subleito considerados através do modelo elástico-linear. Segundo HUHTALA & PIHLAJAMÄKI (1992), esse modelo é computacionalmente mais eficiente que o modelo de cargas móveis baseado no método dos elementos finitos.

5.2.4. Projeto DIVINE

Um projeto de pesquisa da OECD (*Organization for Economic Co-operation and Development*) está sendo desenvolvido com o objetivo de minimizar os custos de manutenção dos pavimentos e pontes. Denominado Projeto DIVINE (*Dynamic Interaction Between Vehicles and Infrastructures Experiment*), consiste basicamente de seis partes (JACOB, 1995):

- Testes acelerados de deterioração dos pavimentos do CAPTIF (*circular fatigue test track*), em Christchurch, Nova Zelândia, comparando o efeito de dois tipos de suspensão, mola (aço) e ar;
- Análise das respostas primárias de diferentes estruturas de pavimentos sob a ação de veículos e eixos equipados com ambos os tipos de suspensão, em função da carga por eixo, da irregularidade longitudinal e da velocidade;
- Identificação dos parâmetros dinâmicos dos veículos pesados, em função do tipo de suspensão;

- Modelagem numérica dos veículos e de sua interação dinâmica com os pavimentos;
- Análise da “Repetibilidade Espacial” das forças de impacto em função da irregularidade dos pavimentos e das características dos veículos;
- Estudo da interação dinâmica entre veículos e pontes.

O projeto DIVINE consiste basicamente da realização de ensaios em pistas instrumentadas, onde os dados obtidos serão aplicados na elaboração de modelos analíticos de desempenho dos pavimentos, considerando-se a interação dinâmica entre o veículo e o pavimento.

Os resultados publicados até o momento são apenas parte de todo o projeto, sendo que os modelos analíticos ainda estão sendo desenvolvidos. Os valores práticos, obtidos a partir dos ensaios de campo, servirão para validar os modelos adotados.

6. O MODELO TRUCKSIM

O Programa Computacional *TruckSim*, desenvolvido pelo UMTRI (*The University of Michigan Transportation Research Institute*), apresenta-se em duas versões, uma para fins comerciais (US\$ 90.000,00) e outra para fins acadêmicos (versão adquirida pela EESC / USP a US\$ 1.400,00).

São apresentadas, neste capítulo, as características do modelo dinâmico de veículo e a forma que o pavimento é considerado nas simulações. São apresentados, ainda, os fatores que podem ser avaliados com o *TruckSim*, suas potencialidades e os procedimentos e parâmetros de entrada e saída de dados.

6.1. O MODELO TRUCKSIM – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os modelos matemáticos de veículos utilizados no *TruckSim* são resultados de vinte anos de pesquisa do UMTRI (*The University of Michigan Transportation Research Institute*), tendo sido enfatizados os principais fatores que influenciam o comportamento dinâmico dos veículos. Os modelos foram validados mediante comparações com outros modelos computacionais existentes e com resultados de testes de campo.

O modelo completo do *TruckSim* inclui:

- Uma “frota” de modelos de simulação incluindo desde caminhões simples até veículos combinados longos (VCL's) e ônibus. Os modelos variam, em complexidade, de um caminhão de dois eixos, equivalente a um sistema com 26 graus de liberdade (DOF: *degree-*

of-freedom), até um modelo de caminhão semi-reboque, com 67 graus de liberdade;

- Modelos não lineares de suspensões e amortecedores;
- Sistemas assimétricos de direcionamento (caminhões);
- Sistemas de freios com dinâmica pneumática, controladores ABS e propriedades não lineares do torque de frenagem;
- Modelo não linear detalhado do pneu;

Para gerar as equações dos modelos, mediante os dados fornecidos pelo usuário, o *TruckSim* utiliza um outro sistema, o *AutoSim*, que também foi desenvolvido no UMTRI. A Figura 6.1 mostra, de forma esquemática, as bibliotecas de modelos do *AutoSim* e a interface com o *TruckSim*.

Figura 6.1 – Bibliotecas do AutoSim e Interface com o TruckSim.

6.2. FATORES QUE PODEM SER AVALIADOS COM O TRUCKSIM

As simulações realizadas com o *Trucksim* permitem avaliar os seguintes fatores:

- *Condição do Pavimentos*: caracterizada pela irregularidade longitudinal do trecho considerado;

- *Velocidade do veículo*;
- *Tipo de veículo de carga*: as diferentes configurações de caminhões e ônibus são caracterizadas por suas dimensões, número de eixos e espaçamento entre eixos;
- *Carga por eixo*: o somatório das cargas por eixo permite, conseqüentemente, a análise do Peso Bruto Total Combinado (PBTC);
- *Tipo de eixo*: propriedades referentes à massa, momento de inércia e rigidez;
- *Suspensão*: os diferentes tipos de suspensão são caracterizados pelas propriedades das molas referentes à carga padrão, pelo tipo de mola e pelo tipo de suspensão;
- *Pneu*: propriedades referentes à rigidez (que depende do tipo de pneu e da pressão de enchimento), amortecimento e comprimento de relaxação;

Vale ressaltar que apenas a versão comercial do *TruckSim* dispõe de todos os recursos do programa. As simulações realizadas neste trabalho limitam-se às potencialidades da sua versão acadêmica.

6.3. O PROGRAMA COMPUTACIONAL TRUCKSIM

O *TruckSim* foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa em Transportes da Universidade de Michigan (UMTRI - *The University of Michigan Transportation Research Institute*) e consiste de um grupo integrado de ferramentas computacionais para a simulação e análise de ações provocadas por caminhões pesados e veículos combinados longos. O *TruckSim* inclui vários programas de simulação baseados em modelos matemáticos de veículos, permitindo a realização de repetidas simulações, a criação de novos tipos de veículos e a variação de diferentes parâmetros.

O programa computacional *TruckSim* usa uma interface gráfica chamada SGUI (*Simulation Graphical User Interface*), que fornece ao usuário um ambiente de trabalho agradável e facilita novas simulações ou o fornecimento de dados de entrada.

As principais atividades relacionadas às simulações são controladas na tela “Runs” do *TruckSim* (Figura 6.2). Na parte superior dessa tela são mostrados diversos comandos nos quais as informações são fornecidas ao programa (*Ribbon Bar*) e na parte inferior está uma barra de informações que mostram a descrição dos objetos da tela (*Status Bar*).

Figura 6.2 – Tela “Runs” do TruckSim.

Todas as telas de dados do SGUI têm o mesmo formato, colocando-se o cursor sobre qualquer comando da *Ribbon Bar* aparecerá na *Status Bar* uma breve descrição do mesmo. Isso permite que o usuário familiarize-se com o programa e tenha uma rápida idéia de cada comando.

O *TruckSim* possui uma biblioteca de arquivos que podem ser acessados e utilizados nas simulações. Dentro de cada modelo de caminhão, por exemplo, o usuário pode selecionar o número de eixos e alterá-lo conforme as opções oferecidas (Figura 6.3). O usuário pode ainda criar e armazenar novos modelos de caminhões e criar um banco de dados para as simulações (Figura 6.4), podendo, inclusive, copiar características de veículos existentes na biblioteca do *TruckSim*.

Figura 6.3 – Seleção de Propriedades de um Veículo.

Figura 6.4 – Criando um Novo Banco de Dados.

A tela *Runs* mostra, também, três regiões distintas, que compõem o Banco de Dados (Figura 6.2), que são utilizadas nas várias etapas de uma simulação:

- *Simulation Input*: Dados de entrada necessários para descrever o veículo;
- *Computer Run*: Ambiente do computador no qual o tipo de simulação e os parâmetros de computação são fornecidos, tais como os passos da simulação, intervalos de impressão etc.;
- *Output*: Dados de saída gerados pela simulação.

6.4. ENTRADA DE DADOS

Embora os modelos de veículos apresentados na versão completa do programa tenham uma grande abrangência, o *TruckSim* permite que se crie um novo modelo, caso as propriedades usuais indicadas não sejam compatíveis com aquelas que se pretende simular. Deve-se destacar que as simulações realizadas neste trabalho limitam-se aos modelos apresentados na versão acadêmica do *TruckSim* e considerando-se as características dos veículos que trafegam nas rodovias brasileiras.

6.4.1. Caminhões

Os modelos de caminhões apresentados no *TruckSim* são divididos em quatro categorias: (1) 2 eixos; (2) semi-reboque com 3 eixos; (3) simples com 3 eixos e; (4) semi-reboque com 5 eixos. Essas categorias são divididas em 16 sub-categorias, conforme mostrado na Figura 6.5.

Figura 6.5 – Categorias e Sub-categorias de Caminhões no Programa *TruckSim*.

6.4.2. Dimensões dos Caminhões, Reboques e Cavalos-Mecânicos

As Figuras 6.6, 6.7 e 6.8 mostram, respectivamente, os parâmetros de entrada de dados de caminhões simples, reboques e cavalos-mecânicos no *TruckSim*.

Data set: **Generic 3-axle truck** | New | Delete | GO | Back | ☐ Changed | ID 13 | ☒ Notes | 3:35:11 | ☐ Locked | 2/21/96

Category: | |

All dimensions are in inches.

Total Unladen Truck Moments of Inertia

Cab Data: {No Library Selected}

Roll: 71851 in-lb-s²
Pitch: 439445 in-lb-s²
Yaw: 440636 in-lb-s²

Front Axle
Front axle: 3a truck

First Rear Axle
Rear axle 1: 3a truck

Second Rear Axle
Rear axle 2: 3a truck

Unladen front axle load: 9602 lb

Steering System
Stiff system

Tandem Suspension
{No Library Selected}

Truck Reference Point
Reference origin

Unladen rear suspension load: 9068 lb

Notes: These are typical values for a 3 axle truck.

6-22-95

Figura 6.6 – Propriedades dos Caminhões no Programa TruckSim.

Data set: **2-Axle trailer** | New | Delete | GO | Back | ☐ Changed | ID 7 | ☒ Notes | 3:34:59 | ☐ Locked | 2/21/96

Category: | |

All dimensions are in inches.

Total unladen trailer mass: 12800.0 lb

Total Unladen Trailer Moments of Inertia

Roll: 81540 in-lb-s²
Pitch: 978624 in-lb-s²
Yaw: 971352 in-lb-s²

First Axle
Axle: 2a trailer

Second Axle
Axle: 2a trailer

First unladen axle load: 4150.0 lb

Second unladen axle load: 4150.0 lb

Notes: These are typical values for a 2 Axle Trailer.

6-22-95

Figura 6.7 – Propriedades dos Reboques no Programa TruckSim.

Data set: **3-Axle tractor** ◀ ▶ ⏪ ⏩ New Delete GO Back ○ Changed ID5
 Category: 📁 📄 🖨️ 🗑️ 🔄 📏 📐 📊 📋 📌 📍 📎 📏 📐 📊 📋 📌 📍 📎 ☑ Notes 3:34:54
☐ Locked 2/21/96

CG of total tractor

36.0 52.0 44.0 144.0

All dimensions are in inches.

Loads When Tractor is not Connected to a Trailer

Front axle load: 9314.0 lb Rear suspension load: 5676.0 lb

Fifth wheel roll stiffness:	1000000	in-lb/deg
Fifth wheel pitch stiffness:	0.0	in-lb/deg
Fifth wheel articulation stiffness:	0.0	in-lb/deg

Total Tractor Moments of Inertia

Roll:	40308	in-lb-s ²
Pitch:	171617	in-lb-s ²
Yaw:	181130	in-lb-s ²

Front Axle: Front axle: 3a tractor

First Rear Axle: First rear axle: 3a tractor

Second Rear Axle: Second rear axle: 3a tractor

Notes

These are typical values for a 3 Axle Tractor.

6-22-95

Figura 6.8 – Propriedades dos Cavalos-Mecânicos no Programa TruckSim.

6.4.3. Eixos

Além de dimensões dos eixos, é também necessário fornecer informações relativas à massa, momento de inércia, rigidez etc., conforme mostrado na Figura 6.9.

Data set: **Second rear axle: 3a tractor** ◀ ▶ ⏪ ⏩ New Delete GO Back ○ Changed ID67
 Category: 📁 📄 🖨️ 🗑️ 🔄 📏 📐 📊 📋 📌 📍 📎 ☑ Notes 3:33:57
☐ Locked 2/21/96

(Use 0.0 for single tires.)

Damper Kinematic roll center CG

Spring

36.0 36.0 13.0 30.0 20.0 72.0

All dimensions are in inches.

Spring: Rear 23K Rated Flat Leaf

Axle mass:	2300	lb
Roll and yaw moment of inertia:	5200	in-lb-s ²
Auxiliary roll stiffness:	38000	in-lb/deg
Lateral displacement stiffness:	26000	lb/in
Roll-steer coefficient:	0.0	deg steer/deg rel. axle roll
Linear damper coefficient:	1.0	lb-s/in

Notes

These are typical values for a 3 axle tractor rear axle.

6-22-95

Figura 6.9 – Dimensões e Propriedades dos Eixos no Programa TruckSim.

6.4.4. Suspensão dos Eixos em Tandem

Os parâmetros da suspensão dos eixos em tandem, considerados no Programa *TruckSim* (Figura 6.10), incluem apenas tandem duplo, não permitindo a simulação do tandem triplo, comum no Brasil.

Figura 6.10 – Propriedades dos Eixos em Tandem no Programa *TruckSim*.

6.4.5. Suspensão

As propriedades das molas referem-se à carga padrão, tipo de mola, tipo e classe de suspensão etc., conforme a Figura 6.11.

Figura 6.11 – Propriedades das Suspensões no Programa *TruckSim*.

Vale ressaltar que a versão acadêmica do *TruckSim* possui em sua biblioteca apenas modelos de suspensão em feixe de molas, não permitindo, portanto, a simulação de suspensões pneumáticas.

6.4.6. Pneus

Os dados de pneus requeridos referem-se à rigidez, amortecimento e comprimento de relaxação, conforme mostrado na Figura 6.12.

Figura 6.12 – Propriedades dos Pneus no Programa TruckSim.

6.4.7. Perfil do Pavimento

Os modelos de pavimentos usados no *TruckSim* consideram o perfil da estrada como parâmetro de entrada. O programa permite dois tipos de entradas: (1) um perfil “tabular”, feito para simular um simples impacto ou eventos relativamente curtos, e (2) um arquivo com elevações do perfil de estradas, fornecidas a intervalos constantes. As entradas do tipo tabular podem ter apenas três ou quatro pontos, conforme o exemplo mostrado na Figura 6.13. Já os arquivos de perfil de estradas, podem ter milhares dos pontos. O *TruckSim* vem com quatro arquivos de perfis de estradas, que são mostrados a seguir, no Capítulo 7, e utilizados nas simulações realizadas neste trabalho.

Figura 6.13 – Perfil do Pavimento (Irregularidade) no Programa TruckSim.

Os arquivos de entrada de dados utilizados no programa *TruckSim* têm a extensão “ERD” e foram idealizados especificamente para os sistemas desenvolvidos pela *Engineering Research Division* (ERD, órgão do UMTRI). Os arquivos “ERD” estão em um formato padronizado para armazenar dados na forma de tabelas, facilitando a aplicação dos mesmos nos algoritmos computacionais para o processamento das informações e geração de resultados. É possível, contudo, criar um banco de dados capaz de gerar arquivos com a extensão “ERD”, de tal modo que, de posse das medidas de campo, o perfil longitudinal de pavimentos brasileiros possa ser usado nas simulações. O UMTRI possui um banco de dados com o perfil de pavimentos de várias rodovias e várias regiões dos Estados Unidos e do Canadá. Tais dados podem ser utilizados como parâmetros de comparação com os pavimentos brasileiros.

Para os objetivos deste trabalho, no entanto, são suficientes os perfis apresentados no próprio *TruckSim*, visto que pretende-se analisar apenas o efeito da irregularidade longitudinal, e não a condição atual dos pavimentos.

6.5. SAÍDA DE DADOS

O usuário pode escolher os parâmetros de saída desejados (tensões, forças, ângulos de escorregamento etc.) a partir de uma biblioteca de dados do *TruckSim* (Figura 6.14).

Figura 6.14 – Definição das Informações de Saída.

Os dados a serem plotados devem ser selecionados pelo usuário no comando *Plot Setup*, que apresenta de forma hierárquica as categorias de dados de saída e principais itens (Figura 6.15).

Figura 6.15 – Seleção dos Dados a Serem Plotados.

As informações de saída são normalmente apresentadas na forma de gráficos. O usuário pode definir a área de plotagem através de uma ampliação (*Zoom*) no próprio gráfico, mediante a definição da região pontilhada da Figura 6.16. Este recurso permite observar com maiores detalhes um ponto ou região do gráfico.

Figura 6.16 – Exemplo de Escolha da Área de Plotagem de Dados de Saída Gráfica.

6.6. EXECUTANDO UMA SIMULAÇÃO

Para o programa realizar uma simulação basta acionar o comando *Run Simulation* localizado no bloco *Computer Run*. Pode se acompanhar a evolução da simulação por uma simples barra que indica o percentual completado (Figura 6.17). Para realizar a simulação é necessária a definição prévia de todos os parâmetros de entrada e saída de dados.

Figura 6.17 – Barra de Indicação da Simulação.

6.7. OUTROS RECURSOS DO TRUCKSIM

O *TruckSim* possui recursos de animação gráfica (*Animator*), o qual faz parte dos dados de saída (*Outputs*) da tela *Runs*. As coordenadas e orientações dos movimentos simulados são controlados no mesmo arquivo de saída usado para a plotagem. A Figura 6.18 mostra a simulação gráfica do *Animator*.

Figura 6.18 – Simulação Gráfica do Animator

O *TruckSim* permite a realização da análise do comportamento dos mais variados fatores envolvidos na dinâmica dos pavimentos. Cada fator pode ser alterado isoladamente, verificando-se a sua influência no comportamento dos pavimentos. O usuário não tem, necessariamente, que criar vários bancos de dados, pois o programa permite que se altere, isoladamente, qualquer das propriedades dos veículos ou dos pavimentos. No entanto, quando o usuário for trabalhar com um perfil específico de pavimento, ele deverá criar um novo banco de dados na extensão “ERD”.

7. PROGRAMAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Neste Capítulo são apresentados os fatores que são efetivamente analisados nesse trabalho mediante as simulações realizadas com o *TruckSim*, incluindo-se os perfis dos pavimentos considerados nas simulações e os limites legais de cargas utilizados no Brasil.

Os dados referentes ao peso total e por eixo, obtidos através de medições em balança, são apresentados para comparações com os limites legais de carga. Através dessas observações, as características dos tipos e fabricantes de veículos também foram listadas.

7.1. FATORES CONSIDERADOS NAS SIMULAÇÕES

Neste trabalho são analisados em profundidade os seguintes fatores:

- *Tipo de veículo de carga;*
- *Carga por eixo;*
- *Tipo de eixo;*
- *Peso bruto total combinado (PBTC);*
- *Velocidade;*
- *Suspensão;*
- *Condição dos pavimentos (Irregularidade longitudinal);*

Deve-se destacar que os diferentes cargas por eixo já permitem a análise de diferentes tipos de eixos e diferentes tipos de veículos permitem a análise do peso bruto total combinado.

A pressão de enchimento dos pneus não pode ser avaliada diretamente no *TruckSim*, no entanto, considerando-se que a mesma provoca alteração na rigidez do sistema de suspensão, os esforços atuantes em suspensões ou mais ou menos rígidas correspondem a pressões de enchimento maiores ou menores, respectivamente. Os resultados não podem ser quantificados, mas podem ser avaliados em termos de comportamento das cargas dinâmicas para diferentes velocidades e níveis de irregularidade.

A Figura 7.1 apresenta o modelo da matriz fatorial da programação simulações para cada eixo do veículo simulado.

VEÍCULO:		Tipo: "Trucado"		Fabricante: Mercedes-Benz		Modelo: L-2318/51 (6x2)				Anexo:						
FATORES		Eixo		E2 - Traseiro (Tandem Duplo - Rodas Duplas)												
		Carga/Eixo (kN)		LL-20% 136			LL 170			LL+20% 204						
		Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110				
Condição do Pavimento (IRI em m/km)		Pavimento 1 1,6 m/km		Padrão										Max		
				< rigidez											Med	
		Pavimento 2 3,5 m/km		Padrão											DP	
				< rigidez												Max
		Pavimento 3 4,5 m/km		Padrão												Med
				< rigidez												

Figura 7.1 – Matriz Fatorial da Programação de Simulações, Realizadas com o *TruckSim*, para Cada Eixo do Veículo.

7.2. PAVIMENTOS – IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

Para utilização nas simulações, foram procurados dados sobre a irregularidade longitudinal de pavimentos tanto em boas como más condições. Foi encontrado na Internet, na página do UMTRI (1998), um total de 11.476 perfis longitudinais, apresentados na Tabela 7.1 já tabulados em função do local de levantamento, do número de perfis e do número de leituras realizadas.

Tabela 7.1 – Perfis de Pavimentos: Local, Quantidade e Número de Medidas dos Perfis.

Local	Nº de Perfis	Nº de Leituras	Local	Nº de Perfis	Nº de Leituras
Alabama	285	371	New Hampshire	80	80
Alaska	34	39	New Jersey	185	271
Arizona	253	404	New Mexico	164	277
Arkansas	199	309	New York	274	311
California	625	1023	North Carolina	596	885
Colorado	228	375	North Dakota	81	111
Connecticut	139	195	Ohio	122	204
DC	5	180	Oklahoma	260	410
Delaware	120	5	Oregon	236	376
Florida	304	504	Pennsylvania	520	757
Georgia	371	582	Rhode Island	35	35
Idaho	310	478	South Carolina	122	215
Illinois	279	444	South Dakota	255	375
Indiana	318	532	Tennessee	230	356
Iowa	161	293	Utah	317	417
Kansas	212	324	Vermont	116	218
Kentucky	139	186	Virginia	326	452
Louisiana	40	40	Washington	359	519
Maine	255	350	West Virginia	119	163
Maryland	177	210	Wisconsin	196	397
Massachusetts	123	126	Wyoming	299	446
Michigan	289	420	Truksim / Profiles	4*	1312 *
Minnesota	368	622	Truksim / Roadbump	1	6
Mississippi	361	624	Roadruf / Profiles / Prorut	8	528
Missouri	245	500	Roadruf / Profiles / Rpug	24	528
Montana	247	320	Roadruf / Profiles / Sines	6*	1201 *
Nebraska	248	442	Roadruf / Profiles / Tutorial	3	528
Nevada	201	255	Roadruf / Profiles / Units	2	492
* Perfis Simulados			Nº Total de Perfis	11476	

Foram determinados os valores do IRI para todos esses perfis longitudinais visando seleção dos mais indicados para as simulações. Neste trabalho, foram adotados os perfis mostrados nas Figuras 7.2 a 7.9. Os perfis

dos pavimentos mostrados nas Figuras 7.2 a 7.5 constam de 1312 medidas de elevação, espaçadas de 1,0 ft (30,48 cm). As Figuras 7.6 e 7.7 mostram os mesmos de forma conjunta.

Figura 7.2 – Perfil de Pavimento de Concreto de Cimento Portland em Más Condições (Faultpcc.erd).

Figura 7.3 – Perfil de Pavimento de Concreto de Cimento Portland em Boas Condições (Goodpcc.erd).

Figura 7.4 – Perfil de Pavimento Asfáltico com Elevada Irregularidade Longitudinal (Roughac.erd).

Figura 7.5 – Perfil de Pavimento com Tratamento Superficial Ondulado (Wavyst.erd).

Figura 7.6 – Perfis dos Pavimentos Simulados.

Figura 7.7 – Detalhe dos Perfis dos Pavimentos Simulados.

Vale ressaltar que, como o TruckSim considera apenas o perfil do pavimento, os tipos e as propriedades físicas dos materiais que o compõem não influenciam os resultados das simulações, sendo importante apenas o índice de irregularidade (IRI).

Os perfis dos pavimentos mostrados na Figura 7.8 constam de 1201 medidas de elevação, espaçadas de 0,5 ft (15,24 cm). A figura 7.9 mostra os mesmos de forma detalhada. Tratam-se de perfis hipotéticos, em forma de senóides com diferentes amplitudes e comprimentos de onda, os quais foram utilizados para verificar a influência desses fatores no comportamento das cargas dinâmicas (6 amplitudes e 6 comprimentos de onda).

Vale ressaltar que trata-se de modelos de pavimentos que não permitem alterações em suas propriedades, impossibilitando uma análise isolada do efeito de cada um dos fatores (amplitude e comprimento de onda), visto que os mesmos variam de forma conjunta.

Figura 7.8 – Perfis dos Pavimentos em Forma de Senóide.

Figura 7.9 – Detalhe dos Perfis dos Pavimentos em Forma de Senóide.

A Tabela 7.2 mostra algumas características desses perfis relacionadas ao comprimento de onda (λ) e amplitude (A) da senóide.

Tabela 7.2 – Características dos Perfis de Pavimentos Senoidais.

Arquivo (*.erd)	SINES005	SINES010	SINES020	SINES050	SINES100	SINES200
Perfis	S005	S010	S020	S050	S100	S200
Compr.onda: λ (ft)	5	10	20	50	100	200
Compr.onda: λ (m)	1,524	3,048	6,096	15,24	30,48	60,96
Amplitude: A (in)	0,025	0,050	0,100	0,250	0,500	1,000
Amplitude: A (cm)	0,06350	0,12700	0,25400	0,63500	1,27000	2,54000

Quanto ao efeito da irregularidade longitudinal (Figura 7.10), analisam-se também: depressões (“panelas”), variando-se a profundidade em três níveis; ressalto (desnível) entre pavimentos e pontes, avaliado para três níveis de altura e; redutor de velocidade (“sonorizador”).

Figura 7.10 – Irregularidades longitudinais Isoladas.

A irregularidade longitudinal dos perfis de pavimentos foi caracterizada em termos de IRI (*International Roughness Index*). Os valores de IRI obtidos para os pavimentos mostrados nas Figuras 7.2 a 7.9 são apresentados nas Tabelas 7.3 a 7.5, tendo sido determinados para intervalos diferentes para avaliar a uniformidade dos perfis.

Tabela 7.3 – IRI dos Perfis dos Pavimentos de Concreto de Cimento Portland.

Pavimento: FAULTPCC.erd				Pavimento: GOODPCC.erd			
Características: pavimento defeituoso em concreto de cimento portland				Características: pavimento bom em concreto de cimento portland			
Intervalos de análise		IRI (m/km)		Intervalos de análise		IRI (m/km)	
Início (ft)	Fim (ft)	LE	RE	Início (ft)	Fim (ft)	LE	RE
0	1312	3,40	3,46	0	1312	1,64	1,63
0	264	3,19	3,10	0	264	1,63	1,64
264	528	3,43	3,83	264	528	1,53	1,56
528	792	3,46	3,04	528	792	1,61	1,53
792	1056	3,31	3,87	792	1056	1,66	1,77
1056	1312	3,57	3,43	1056	1312	1,76	1,67
Média por trilha		3,393	3,455	Média por trilha		1,638	1,633
Desvio-padrão		0,254		Desvio-padrão		0,076	
Média geral		3,424		Média geral		1,636	

Tabela 7.4 – IRI dos Perfis dos Pavimentos Asfálticos.

Pavimento: ROUGHAC.erd				Pavimento: WAVYST.erd			
Características: perfil irregular de pavimento asfáltico				Características: pavimento com tratamento superficial ondulado			
Intervalos de análise		IRI (m/km)		Intervalos de análise		IRI (m/km)	
Início (ft)	Fim (ft)	LE	RE	Início (ft)	Fim (ft)	LE	RE
0	1312	3,38	3,56	0	1312	4,32	4,45
0	264	3,32	3,70	0	264	4,12	4,50
264	528	3,67	3,59	264	528	4,23	4,37
528	792	3,22	3,40	528	792	4,69	4,92
792	1056	3,68	3,75	792	1056	4,21	4,32
1056	1312	2,97	3,31	1056	1312	4,31	4,11
Média por trilha		3,373	3,552	Média por trilha		4,313	4,445
Desvio-padrão		0,236		Desvio-padrão		0,236	
Média geral		3,463		Média geral		4,379	

Os valores de desvio-padrão apresentados mostram que o perfil *Faultpcc* é o que apresenta menor uniformidade (maior desvio-padrão).

Tabela 7.5 – IRI dos Perfis dos Pavimentos em Forma de Senóides.

Pavimento: SINES005.erd			Pavimento: SINES010.erd		
Características:			Características:		
$\lambda = 1,524 \text{ m}$ $A = 0,0635 \text{ cm}$			$\lambda = 3,048 \text{ m}$ $A = 0,127 \text{ cm}$		
Intervalos de análise		IRI	Intervalos de análise		IRI
Início (ft)	Fim (ft)	(m/km)	Início (ft)	Fim (ft)	(m/km)
0	600	1,27	0	600	2,34
0	264	1,26	0	264	2,33
264	528	1,27	264	528	2,35
528	600	1,26	528	600	2,31
Desvio-padrão		0,006	Desvio-padrão		0,017
Média		1,265	Média		2,333
Pavimento: SINES020.erd			Pavimento: SINES050.erd		
Características:			Características:		
$\lambda = 6,096 \text{ m}$ $A = 0,254 \text{ cm}$			$\lambda = 15,24 \text{ m}$ $A = 0,635 \text{ cm}$		
Intervalos de análise		IRI	Intervalos de análise		IRI
Início (ft)	Fim (ft)	(m/km)	Início (ft)	Fim (ft)	(m/km)
0	600	1,90	0	600	2,5
0	264	1,90	0	264	2,39
264	528	1,90	264	528	2,57
528	600	1,90	528	600	2,58
Desvio-padrão		0,000	Desvio-padrão		0,088
Média		1,900	Média		2,510
Pavimento: SINES100.erd			Pavimento: SINES200.erd		
Características:			Características:		
$\lambda = 30,48 \text{ m}$ $A = 1,270 \text{ cm}$			$\lambda = 60,96 \text{ m}$ $A = 2,540 \text{ cm}$		
Intervalos de análise		IRI	Intervalos de análise		IRI
Início (ft)	Fim (ft)	(m/km)	Início (ft)	Fim (ft)	(m/km)
0	600	0,75	0	600	0,16
0	264	0,80	0	264	0,17
264	528	0,73	264	528	0,16
528	600	0,63	528	600	0,12
Desvio-padrão		0,071	Desvio-padrão		0,022
Média		0,728	Média		0,153

De um modo geral, todos os pavimentos apresentam uma boa uniformidade, sendo, portanto, adequados para as simulações.

Conforme descrito no item 4.2, o IRI é influenciado por comprimentos de onda entre 4 e 100 ft (1,22 a 30,48 m), o que pode ser observado na Figura 7.11 com os resultados obtidos para os perfis senoidais SINES005 a SINES100 (com comprimentos de onda de 5 a 100 ft, respectivamente).

A Figura 7.11 também permite uma análise do posicionamento dos pavimentos simulados com base na escala de IRI estabelecida por SAYERS & KARAMIHAS (1997). para pavimentos com características variadas, mostradas na Figura 4.4.

Figura 7.11 – Comparação do IRI dos Pavimentos Simulados com os Valores Propostos por SAYERS & KARAMIHAS (1997).

Nota-se, a partir da Figura 7.11, que os pavimentos simulados abrangem desde pavimentos de grandes rodovias em excelentes condições, até pavimentos velhos, segundo essa escala.

7.3. TIPOS DE CAMINHÕES

A seguir são listados alguns dos dados coletados por DEMARCHI & SETTI (1998) em balança rodoviária nas rodovias Anhangüera e Bandeirantes, no Estado de São Paulo, em outubro de 1997. A amostra obtida compreende dados referentes a 534 caminhões, dos quais quase a metade (49%) é

composta por caminhões de 3 eixos. A maior parte da frota (62%) é composta por caminhões dos modelos Mercedes Benz e Scania (22%).

As Figuras 7.12, 7.13 e 7.14 mostram a distribuição dos veículos pelo número de eixos, tipo de carroceria e por fabricante, respectivamente.

Figura 7.12 – Distribuição dos Veículos por Eixo.

Figura 7.13 – Distribuição dos Veículos por Tipo de Carroceria.

Figura 7.14 – Distribuição dos Veículos por Fabricante.

Devido às limitações da versão acadêmica do *TruckSim*, foram simulados apenas quatro modelos de caminhões, cujas características são apresentadas na Tabela 7.6. No entanto algumas composições de veículos puderam ser feitas a partir dos resultados dessas simulações, cujos resultados são apresentados no Capítulo 8 deste trabalho.

Tabela 7.6 – Caminhões da Mercedes-Benz Utilizados nas Simulações.

Veículo	Configuração	Modelo	POM ⁽¹⁾ (kg)	PBTC ⁽²⁾ (kg)	Lt ⁽³⁾ (kg)
Toco		L-1618/51	4990	16277	11287
Trucado		L-2318/51 (6x2)	6450	23398	16948
Semi 3E		LS-1935	7470+3559 ⁽⁴⁾	26450	15421
Semi 5E		LS-2635	9810+7845 ⁽⁴⁾	40692	23037

⁽¹⁾ Peso do veículo em ordem de marcha;
⁽²⁾ Peso bruto total combinado;
⁽³⁾ Lotação;
⁽⁴⁾ Cavalo-mecânico+Semi-reboque.

7.4. PESOS DOS CAMINHÕES

A seguir são apresentados os limites legais de peso dos veículos e os dados obtidos mediante a utilização de balança.

7.4.1. Limites Legais

No Brasil, os limites legais de peso dos veículos são regulamentados pelo Código Brasileiro de Trânsito, cujos valores são estabelecidos pelo Conselho Nacional de Transito (CONTRAN), admitindo-se uma tolerância de 5% (“Lei da Balança”). Para as simulações foram considerados os limites legais do CONTRAN e uma variação de $\pm 20 \%$ do peso. Portanto, três condições de carregamento foram analisadas.

Esses valores, bem como os limites adotados nos Estados Unidos são apresentados na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Cargas por Eixo para as Diferentes Condições de Carregamento (adaptada de FERNANDES JR, 1994).

Condição de Carregamento	Eixo Simples, Rodas Simples (kN)	Eixos Simples, Rodas Duplas (kN)	Tandem Duplo (kN)	Tandem Triplo (kN)
Limites nos EUA	45	91	154	154
“Lei da Balança”	63	105	179	268
CONTRAN	60*	100*	170*	255
CONTRAN + 20 %	72*	120*	204*	306
CONTRAN – 20 %	48*	80*	136*	204

* Condições simuladas com o *TruckSim*

A Tabela 7.8 apresenta os fatores de equivalência de carga (FEC), determinados para cargas estáticas, conforme proposto por FERNANDES JR. (1994), para os limites estabelecidos pelo CONTRAN e acrescidos de 20 %, além dos valores obtidos para os limites de carga dos Estados Unidos.

Tabela 7.8 – Características dos Veículos Rodoviários de Carga, Limites de Carga por Eixo (adaptada de FERNANDES JR, 1994).

Tipo	Veículo / Configuração	PBTC (kN)	FEC	Nº. de Pneus	Condições de Análise
Convencionais	Caminhão "Toco"	160	2,64	6	CONTRAN
	Caminhão "Trucado"	230	1,92	10	
	"Romeu e Julieta"	430	6,62	18	
	"Semi-Reboque"	415	4,59	18	
Especiais	"Treminhão"	630	11,32	26	
	"Rodotrem"	740	6,81	34	
Convencionais	Caminhão "Toco"	192	5,85	6	CONTRAN + 20 %
	Caminhão "Trucado"	276	4,13	10	
	"Romeu e Julieta"	516	14,65	18	
	"Semi-Reboque"	498	10,09	18	
Especiais	"Treminhão"	756	25,17	26	
	"Rodotrem"	888	14,75	34	
Convencionais	Caminhão "Toco"	136	1,65	6	EUA
	Caminhão "Trucado"	199	1,17	10	
	"Romeu e Julieta"	381	4,29	18	
	"Semi-Reboque"	290	1,90	18	

7.4.2. Distribuição de Pesos dos Caminhões – Medidas de Balança

Os caminhões foram classificados em função do número de eixos. Essa classificação é mais simples e representa uma forma indireta de classificação dos caminhões por peso. Os veículos mais representativos de cada categoria são mostrados na Tabela 7.9 e na Figura 7.15 (DEMARCHI & SETTI, 1998).

Tabela 7.9 – Modelos Representativos de Cada Categoria de Caminhões (Adaptado de DEMARCHI & SETTI, 1998).

Eixos	Modelo	Amostra	
2	MB 1113	6	2,4%
	MB 608D	6	2,4%
3	MB 1113	78	31,1%
	MB 2013	30	12,0%
5	MB 1935 e Scania 113	56	22,3%
	Volvo NL 10 e Scania 112	69	27,5%
6	Scania 113	6	2,4%
Total analisado		251	100%

Figura 7.15 – Distribuições do Peso Bruto Total Combinado dos Caminhões Selecionados (Adaptado de DEMARCHI & SETTI, 1998).

A Figura 7.15 mostra que há uma grande variação no peso bruto total combinado (PBTC), sendo menor para caminhões de 2 eixos. Nota-se, ainda, que os veículos que mais trafegam com sobrecarga são os veículos de 3 e 5 eixos, cujos percentuais acima dos limites legais estabelecidos pelo CONTRAN são apresentados na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 – Porcentagens dos Caminhões com Peso Bruto Total Combinado Acima dos Limites Legais de Carga Estabelecidos pelo CONTRAN.

Nº. Eixos	Configuração dos Eixos	Modelo	% Acima do Limite Legal do CONTRAN
2	o o	MB 690D	0%
2	o o	MB 1113	0%
3	o oo	MB 1113	4,2%
3	o oo	MB 2013	20,8%
5	o oo oo	MB 1935 e Scania 113	38,9%
5	o o ooo	Volvo NL 10 e Scania 112	15,3%
6	o oo ooo	Scania 113	0%

8. SIMULAÇÕES: DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As simulações realizadas com o *TruckSim* são mostradas neste Capítulo, sendo comentados os resultados, em termos de coeficientes de impacto dinâmico e fatores de equivalência de carga dinâmica (FECD's). Cada fator é avaliado separadamente, apresentando-se, também, gráficos que ressaltam as conclusões obtidas. Deve-se destacar, no entanto, que os resultados de todas as simulações realizadas são apresentados nos Anexos deste trabalho.

8.1. PAVIMENTOS

Os pavimentos rodoviários foram avaliados sob três aspectos:

- Saliência ou depressão isolada;
- Perfil longitudinal com diferentes níveis de irregularidade (IRI);
- Perfis senoidais.

8.1.1. Saliência ou Depressão Isolada

As geometrias consideradas visam simular os efeitos sobre as cargas dinâmicas dos defeitos “panela” e desnível entre pavimentos e pontes (interface) e também de um redutor de velocidade (sonorizador), conforme mostrado na Figura 7.10. Nas simulações foi considerado o veículo do tipo “toco”, modelo L-1618/51 da Mercedes Benz.

Os defeitos do tipo “panela” foram analisados variando-se a profundidade, a velocidade do veículo e a carga aplicada. Os resultados são apresentados nas matrizes fatoriais das simulações (Anexos A.1 a A.3) e gráficos (Anexos A.8 a A.10).

A Figura 8.1 mostra a carga vertical por eixo em função do tempo, para o veículo “toco” trafegando a uma velocidade de 90 km/h sobre “panela” com profundidade de 10 cm.

Figura 8.1 – Carga por Eixo em Função do Tempo e do Espaço, para Veículo “Toco” a 90 km/h sobre a “Panela” com Profundidade de 10 cm.

O comportamento típico pode ser observado na Figura 8.1: no instante em que o veículo atinge a irregularidade, a roda do veículo chega a ficar sem contato com o pavimento ($F_z = 0$) e, em seguida, ocorre o impacto da roda com o pavimento, gerando o valor máximo da carga vertical observada ($F_{z\max}$). A Figura 8.2 mostra a variação da carga vertical máxima em função da velocidade do veículo “toco”, com limite legal de carga por eixo.

Figura 8.2 – Carga Vertical Máxima em Função da Velocidade, para Veículo “Toco” com Limite Legal de Carga por Eixo, Trafegando sobre “Painéis”.

Observa-se que, para eixos simples de rodas simples (ESRS), ocorre uma redução da carga vertical máxima ($F_{z\max}$) com o aumento da velocidade, enquanto para eixos simples com rodas duplas (ESRD) ocorre um aumento de $F_{z\max}$, com um valor máximo para a velocidade de 90 km/h, seguido de uma redução de $F_{z\max}$ para velocidade de 110 km/h (Figura 8.2).

Esperava-se um crescimento da carga vertical máxima com o aumento da velocidade, o que não ocorreu em todas as situações analisadas. Apesar da necessidade de estudos complementares, pode-se afirmar que a carga vertical máxima ($F_{z\max}$) é dependente da interação entre geometria do defeito do pavimento, velocidade do veículo e outras características do sistema de suspensão e de distribuição de carga do veículo.

A Figura 8.3 mostra o efeito da profundidade das “painéis” no impacto dinâmico, que resulta na carga vertical máxima sobre o pavimento. Observa-se

que para o eixo 1 (ESRS) a profundidade da “panela” não exerce grande influência, sendo mais significativa para o caso do eixo 2 (ESRD), sobretudo para a velocidade de 90 km/h.

Figura 8.3 – Carga Vertical Máxima em Função da Profundidade da “Panela”, para Veículo “Toco” com Limite Legal de Carga por Eixo.

A Figura 8.4 mostra a carga vertical máxima por eixo em função da carga vertical estática do veículo “toco”, trafegando a uma velocidade de 90 km/h sobre “panelas”. Mostra ainda o valor do limite legal de carga, para efeito comparativo.

Figura 8.4 – Carga Vertical Máxima em Função da Carga Vertical Estática, para Veículo “Toco” a 90 km/h sobre “panelas”.

Observa-se a partir da Figura 8.4 que, para uma mesma velocidade, a carga dinâmica máxima ($F_{z_{max}}$) aumenta linearmente com o aumento da carga/eixo estática ($F_{z_{est}}$). Observa-se, ainda, que o impacto dinâmico

provocado pelo defeito do pavimento (“panela”) gera uma sobrecarga significativa no pavimento. Tal fato também pode ser observado na Tabela 8.1, que mostra os coeficientes de impacto dinâmico (f), obtidos da Equação 4.5, e os fatores de equivalência de carga dinâmica (FECD), obtidos da Equação 4.15.

Tabela 8.1 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica do Veículo “Toco” a 90 km/h, com Limite Legal de Carga, sobre “Painéis”.

Eixo	ESRS				ESRD				PBTC		
Carga Aplicada	LL = 60 kN				LL = 100 kN				LL = 160 kN		
Defeito	Fz _{máx}	Desv Padr	f	FECD	Fz _{máx}	Desv Padr	f	FECD	Fz _{máx}	Desv Padr	f
Panela 1	124,54	8,28	2,076	26,74	250,85	13,06	2,509	62,71	311,63	15,61	1,948
Panela 2	131,92	9,56	2,199	34,65	373,07	21,65	3,731	374,16	433,64	23,89	2,710
Panela 3	130,33	9,35	2,172	32,81	461,91	26,19	4,619	978,38	522,56	28,01	3,454

Como pode ser observado na Tabela 8.1, os FECD’s apresentam valores extremamente elevados. Nota-se ainda (Tabela 8.1) que a carga vertical máxima devido ao impacto dinâmico decorrente da irregularidade do pavimento, pode ser até 4,619 vezes a carga estática considerada (limite legal de carga por eixo).

Os desníveis entre os pavimentos e as pontes, tão comuns em rodovias brasileiras, foram analisados variando-se a altura do desnível, a velocidade do veículo e a carga aplicada. Os resultados são apresentados nas matrizes fatoriais das simulações (Anexos A.1 a A.3) e gráficos (Anexos A.11 a A.13).

A Figura 8.5 mostra a carga vertical por eixo em função do tempo, para o veículo “toco” trafegando a uma velocidade de 90 km/h sobre o desnível pavimento/ponte com altura de 10 cm.

Figura 8.5 – Carga por Eixo em Função do Tempo e do Espaço, para Veículo "Toco" a 90 km/h sobre o Desnível Pavimento/Ponte 2.

A ocorrência de acidentes nas áreas adjacentes às pontes pode ter por causa esse tipo de irregularidade, pois a Figura 8.5 mostra não apenas o efeito da sobrecarga no pavimento, mas também o alívio e a conseqüente perda de força de atrito entre o pneu e o pavimento, que pode gerar a perda de estabilidade do veículo.

A Figura 8.6 mostra o efeito da altura do desnível pavimento/ponte no impacto dinâmico, que resulta na carga vertical máxima sobre o pavimento.

Figura 8.6 – Carga Vertical Máxima em Função da Altura do Desnível entre Pavimento e Ponte, para Veículo "Toco" com Limite Legal de Carga por Eixo.

Observa-se na Figura 8.6, que a velocidade exerce pouca influência na carga vertical (proximidade das curvas), sendo mais significativo o efeito da altura do desnível.

A Figura 8.7 mostra a carga vertical máxima por eixo em função da carga vertical estática do veículo "toco", trafegando sobre o desnível pavimento/ponte a uma velocidade de 90 km/h. Mostra ainda o valor do limite legal de carga, para efeito comparativo.

Figura 8.7 – Carga Vertical Máxima em Função da Carga Vertical Estática, para Veículo "Toco" a 90 km/h sobre Desnível Pavimento/Ponte.

Observa-se na Figura 8.7, que o impacto dinâmico provocado pelo desnível gera uma sobrecarga significativa no pavimento. Tal fato pode ser

também observado na Tabela 8.2, que mostra os coeficientes de impacto dinâmico (f) e os fatores de equivalência de carga dinâmica (FECD).

Tabela 8.2 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica do Veículo “Toco” a 90 km/h, com Limite Legal de Carga, sobre Desnível Pavimento/Ponte.

Eixo	ESRS				ESRD				PBTC		
Carga Aplicada	LL = 60 kN				LL = 100 kN				LL = 160 kN		
Defeito	Fz _{máx}	Desv Padr	f	FECD	Fz _{máx}	Desv Padr	f	FECD	Fz _{máx}	Desv Padr	f
Pav/Ponte 1	135,46	7,68	2,258	39,04	173,64	13,43	1,736	11,98	235,46	16,06	1,472
Pav/Ponte 2	210,88	16,23	3,515	286,07	245,13	25,50	2,451	56,53	310,88	29,95	1,943
Pav/Ponte 3	286,29	24,69	4,772	1132,26	364,93	36,43	3,649	338,80	394,81	42,01	2,468

Como pode ser observado na Tabela 8.2, os fatores de equivalência de carga dinâmica, a exemplo dos valores obtidos para as “panelas”, apresentam valores extremamente elevados.

Nota-se, ainda (Tabela 8.2), que a carga vertical máxima devido ao impacto dinâmico decorrente do desnível pavimento/ponte, pode ser até 4,772 vezes a carga estática considerada (limite legal de carga por eixo). Os valores de desvio padrão são ainda maiores que aqueles obtidos para as “panelas”, indicando que o efeito da irregularidade é significativo, sobretudo para o desnível pavimento/ponte do tipo 3.

O redutor de velocidade, mais conhecido como sonorizador, foi analisado variando-se a velocidade do veículo e a carga aplicada. Os resultados são apresentados nas matrizes fatoriais das simulações (Anexos A.1 a A.3) e gráfico (Anexo A.14).

A Figura 8.8 mostra a carga vertical por eixo em função do tempo, para o veículo “toco” trafegando a uma velocidade de 90 km/h sobre o sonorizador.

Figura 8.8 – Carga por Eixo em Função do Tempo, para Veículo “Toco” a 90 km/h sobre o Sonorizador.

Conforme pode ser observado na Figura 8.8, no instante em que o veículo atinge a irregularidade, ocorre o impacto da roda com o pavimento, gerando o valor máximo da carga vertical observada ($F_{Z_{max}}$). Em seguida as rodas dianteiras do veículo chegam a ficar sem contato com o pavimento ($F_z = 0$).

A Figura 8.9 mostra a carga vertical máxima em função da velocidade do veículo “toco”, com limite legal de carga por eixo, sobre o sonorizador.

Figura 8.9 – Carga Vertical Máxima em Função da Velocidade, para Veículo “Toco” com Limite Legal de Carga por Eixo sobre Sonorizador.

As simulações realizadas mostraram que, para eixos simples de rodas simples (ESRS), ocorre um pequeno acréscimo de F_z até um valor máximo para a velocidade de 90 km/h, seguido de uma redução para velocidade de 110 km/h (Figura 8.9). Para eixos simples com rodas duplas (ESRD) ocorre um aumento da carga vertical máxima ($F_{z_{\max}}$) com o aumento da velocidade.

A Figura 8.10 mostra a carga vertical máxima por eixo em função da carga vertical estática do veículo “toco” trafegando sobre o sonorizador a uma velocidade de 90 km/h. Mostra ainda o valor do limite legal de carga, para efeito comparativo.

Figura 8.10 – Carga Vertical Máxima em Função da Carga Vertical Estática, para Veículo “Toco” a 90 km/h sobre Sonorizador.

Observa-se na Figura 8.10, que o impacto dinâmico provocado pelo sonorizador gera uma sobrecarga significativa no pavimento. Tal fato pode ser também observado na Tabela 8.3, que mostra os coeficientes de impacto dinâmico (f) e os fatores de equivalência de carga dinâmica (FECD).

Tabela 8.3 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica do Veículo “Toco” Trafegando a 90 km/h, com Limite Legal de Carga, sobre Sonorizador.

Eixo	ESRS				ESRD				PBTC		
Carga Aplicada	LL = 60 kN				LL = 100 kN				LL = 160 kN		
Irregularidade	$Fz_{\text{máx}}$	Desv Padr	f	FECD	$Fz_{\text{máx}}$	Desv Padr	f	FECD	$Fz_{\text{máx}}$	Desv Padr	f
Sonorizador	193,98	4,05	3,233	196,44	239,99	4,10	2,400	51,39	300,82	5,88	1,880

Como pode ser observado na Tabela 8.3, embora os valores dos fatores de equivalência de carga dinâmica sejam menores que aqueles obtidos para as demais irregularidades isoladas, ainda assim são elevados. Nota-se ainda que a carga vertical máxima devido ao impacto dinâmico decorrente da irregularidade do pavimento, pode ser até 3,233 vezes a carga estática considerada (limite legal de carga por eixo).

8.1.2. Perfil Longitudinal

Três perfis longitudinais de pavimentos foram avaliados em termos de irregularidade longitudinal (IRI). Os mesmos são apresentados nas Figuras 7.12 a 7.14, descritos na Tabela 8.1 para a comodidade do leitor.

Tabela 8.4 – Perfis de Pavimentos Simulados para Avaliação do Efeito da Irregularidade Longitudinal.

Pavimento (*.erd)	IRI (m/km)	Descrição
Goodpcc	1,636	Pavimento bom, em concreto de cimento Portland
Roughac	3,463	Pavimento em concreto asfáltico, com perfil irregular
Wavyst	4,379	Pavimento asfáltico com tratamento superficial ondulado

Para a análise do efeito do nível de irregularidade do pavimento, foram consideradas simulações realizadas com o veículo “trucado” – Mercedes Benz,

modelo L-2318/51, cujos resultados são apresentados nos Anexos B.1 a B.3 e B.5 a B.7.

Através das simulações sobre irregularidades isoladas, nota-se que o impacto dinâmico gera sobrecargas seguidas de alívios, que vão sendo dissipados até atingir o valor da carga estática. Nas simulações sobre perfis de pavimentos ocorre a mesma coisa, no entanto, as irregularidades sucessivas fazem com que ocorram picos de sobrecarga e alívio ao longo de todo o perfil, conforme mostrado na Figura 8.11. A média das cargas verticais observadas também aproxima-se do valor da carga estática.

Figura 8.11 – Simulação de um Veículo "Trucado" a 90 km/h sobre Pavimento Asfáltico com Tratamento Superficial Ondulado (Wavyst).

A Figura 8.12 mostra o efeito da velocidade na carga dinâmica para diferentes níveis de irregularidade.

Figura 8.12 – Carga Vertical Máxima em Função da Velocidade para um Veículo "Trucado" com Limite Legal de Carga.

A velocidade exerce pouca influência para baixos níveis de irregularidade, sendo mais significativa para maiores valores de IRI (Figura 8.12).

A Figura 8.13 mostra o efeito da irregularidade longitudinal (IRI) na carga dinâmica, para diferentes velocidades.

Figura 8.13 – Carga Vertical Máxima em Função do IRI para um Veículo "Trucado" com Limite Legal de Carga.

Observa-se um comportamento não linear para ambos os casos (Figura 8.13), sendo mais significativo o efeito para maiores velocidades e maiores valores de IRI.

A Figura 8.14 mostra o comportamento das cargas dinâmicas, para diferentes níveis de irregularidade, com o aumento da carga/eixo estática considerada.

Figura 8.14 – Carga Vertical Máxima em Função da Carga Estática para um Veículo "Trucado" a 90 km/h sobre Perfis de Pavimentos.

Observa-se na Figura 8.14 que, para uma mesma velocidade, a carga dinâmica máxima ($Fz_{\text{máx}}$) aumenta linearmente com o aumento da carga/eixo estática (Fz_{est}). O efeito, conforme esperado, é mais significativo para o pavimento com maior IRI, o que pode ser também observado na Tabela 8.5, que mostra os coeficientes de impacto dinâmico (f) e os fatores de equivalência de carga dinâmica (FECD).

Tabela 8.5 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica do Veículo "Trucado" a 90 km/h, com Limite Legal de Carga, sobre Perfis de Pavimentos.

Eixo	ESRS				TDRD				PBTC		
Carga Aplicada	LL = 60 kN				LL = 170 kN				LL = 230 kN		
Pavimento	$Fz_{\text{máx}}$	Desv Padr	f	FECD	$Fz_{\text{máx}}$	Desv Padr	f	FECD	$Fz_{\text{máx}}$	Desv Padr	f
Goodpcc	67,60	2,71	1,127	1,71	188,59	6,32	1,109	1,60	251,14	6,28	1,092
Roughac	70,67	3,92	1,178	2,09	211,20	11,72	1,242	2,66	268,08	11,55	1,166
Wavyst	78,06	5,86	1,301	3,27	227,83	20,20	1,340	3,73	292,00	20,62	1,270

Nota-se na Tabela 8.5, que os fatores de equivalência de carga dinâmica, como esperado, são menores que aqueles obtidos para as irregularidades longitudinais isoladas. Conforme mostrado anteriormente (Figura 8.14), o efeito dinâmico é mais significativo para níveis de irregularidade mais elevados.

8.1.3. Perfis Senoidais

Foram avaliados seis tipos de perfis de pavimentos em forma de senóide, com diferentes valores de amplitude (A) e comprimentos de onda (λ), apresentados na Tabela 7.2.

Para a análise do efeito do nível de irregularidade do pavimento, foram consideradas simulações realizadas com o veículo “toco” – Mercedes Benz, modelo L-1618/51, cujos resultados são apresentados nos Anexos A.5 a A.7 e A.16 a A.18.

Conforme pode ser observado nos gráficos apresentados nos Anexos A.16 a A.18, todos os fatores têm o mesmo comportamento para ambos os tipos de eixos. A Figura 8.15 mostra a carga vertical máxima obtida para o veículo “toco” com limite legal de carga por eixo, trafegando sobre os perfis senoidais.

Figura 8.15 – Carga Vertical Máxima em Função da Velocidade para um Veículo “Toco”, com Limite Legal de Carga, sobre Perfis Senoidais.

Conforme pode ser observado na Figura 8.15, a velocidade exerce pouca influência sobre perfis senoidais com baixa amplitude e comprimento de onda, apresentando um aumento da carga vertical máxima ($F_{z_{max}}$) com o aumento da velocidade para os demais perfis.

A Tabela 8.6 mostra os valores de coeficiente de impacto dinâmico e fatores de equivalência de carga dinâmica para o veículo “toco” a 90 km/h, com limite legal de carga por eixo, trafegando sobre os perfis senoidais.

Tabela 8.6 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica do Veículo “Toco” a 90 km/h, com Limite Legal de Carga por Eixo, Trafegando sobre Perfis Senoidais.

Eixo Carga Aplicada	ESRS				ESRD				PBTC		
	LL = 60 kN				LL = 100 kN				LL = 160 kN		
Pavimento (IRI:m/km)	Fz _{máx}	Desv Padr	f	FECD	Fz _{máx}	Desv Padr	f	FECD	Fz _{máx}	Desv Padr	f
S005 (1,265)	61,47	0,85	1,025	1,12	101,44	0,86	1,014	1,07	161,57	0,71	1,010
S010 (2,333)	61,61	0,87	1,027	1,13	101,49	0,87	1,015	1,07	161,83	1,03	1,011
S020 (1,900)	64,57	2,35	1,076	1,39	103,69	1,96	1,037	1,18	167,00	3,91	1,044
S050 (2,510)	65,15	2,88	1,086	1,45	116,20	7,09	1,162	1,97	177,31	7,56	1,108
S100 (0,728)	63,53	1,67	1,059	1,29	107,14	3,04	1,071	1,36	169,07	4,22	1,057
S200 (0,153)	63,56	1,22	1,059	1,30	105,76	1,84	1,058	1,29	165,46	2,58	1,034

Os valores dos coeficientes de impacto e FECD's apresentados na Tabela 8.6 mostram que o efeito da carga dinâmica para os perfis senoidais considerados não é significativo, o que se deve ao fato de os mesmos apresentarem baixos níveis de irregularidade (IRI). Conforme esperado, o perfil S050 apresentou maiores valores de desvio-padrão, f e FECD's por ser o perfil com maior nível de irregularidade, IRI = 2,51 m/km (vide Figura 8.15).

Como os valores do comprimento de onda (λ) e da amplitude (A) variam conjuntamente (Tabela 7.2), a influência de tais fatores não pode ser avaliada a partir dos resultados observados, atribuindo-se ao nível de irregularidade como fator preponderante na determinação dos valores máximos observados para o perfil S050. Vale ressaltar que os perfis senoidais simulados são modelos fechados, que não permitem alterações, impossibilitando a variação dos fatores λ e A .

8.2. PONTES

Além do problema do desnível que geralmente ocorre no encontro pavimento/ponte, analisado no item 8.1.1, as cargas dinâmicas devidas ao tráfego de veículos pesados sobre as pontes também foram avaliadas com base no coeficiente de impacto (ϕ), dado pela Equação 4.18. Para isso,

foram utilizados os resultados obtidos com o veículo “trucado” trafegando sobre dois tipos de pavimentos de concreto de cimento Portland:

- *Goodpcc*: Pavimento bom, em concreto de cimento Portland (IRI = 1,636 m/km);
- *Faultpcc*: Pavimento com defeitos, em concreto de cimento Portland (IRI = 3,424 m/km).

Os coeficientes de impacto (f), obtidos mediante simulações, são apresentados na Tabela 8.7.

Tabela 8.7 – Coeficientes de Impacto do Veículo “Trucado” Trafegando sobre os Perfis de Pavimentos *Faultpcc* e *Goodpcc*.

Carga (kN)	LL-20%			LL			LL+20%			EIXO
V (km/h)	70	90	110	70	90	110	70	90	110	LL (kN)
<i>Faultpcc</i>	1,177	1,248	1,267	1,154	1,219	1,204	1,132	1,190	1,167	ESRS
<i>Goodpcc</i>	1,104	1,141	1,157	1,094	1,127	1,139	1,079	1,111	1,122	60 kN
<i>Faultpcc</i>	1,220	1,209	1,286	1,182	1,237	1,272	1,144	1,228	1,246	TDRD
<i>Goodpcc</i>	1,097	1,116	1,135	1,086	1,109	1,152	1,078	1,099	1,146	170 kN
<i>Faultpcc</i>	1,138	1,151	1,185	1,133	1,161	1,188	1,108	1,148	1,170	PBTC
<i>Goodpcc</i>	1,077	1,095	1,113	1,077	1,092	1,121	1,070	1,084	1,110	230 kN

Para pavimentos em condições de boas a regulares, os coeficientes de impacto utilizados em projetos de pontes (ϕ) apresentam valores compatíveis com aqueles simulados (f), ou seja, os valores apresentados na Tabela 8.7 estão dentro do intervalo de coeficientes de impactos estabelecidos pela norma de pontes NRB 7187 (ABNT, 1986).

Nota-se que alguns coeficientes obtidos através das simulações atingiram valores próximos a 1,3 para o pavimento *Faultpcc*. Espera-se, portanto, maiores valores de f para pavimentos com maior IRI, visto que este apresenta condições apenas regulares (IRI = 3,424 m/km).

8.3. VEÍCULOS

Os fatores analisados a seguir referem-se às propriedades dinâmicas dos veículos.

8.3.1. Carga por Eixo

Para avaliar a carga por eixo são consideradas as simulações realizadas com todos os tipos de veículos: toco, trucado, semi-reboque/3eixos e semi-reboque/5eixos. A análise é feita considerando-se o valor médio dos fatores de equivalência de carga dinâmica obtidos para todos os tipos de eixo em diferentes veículos, a uma velocidade de 90 km/h, com diferentes carregamentos. A análise é feita para um pavimento em condições regulares a ruins (*Wavyst*: pavimento asfáltico com tratamento superficial ondulado - IRI = 4,379 m/km). Tais resultados são apresentados na Tabela 8.8.

Tabela 8.8 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica dos Eixos dos Veículos a 90 km/h, sobre o Perfil *Wavyst*.

EIXO		ESRS Eixo Simples Rodas Simples				ESRD Eixo Simples Rodas Duplas				TDRD Tandem Duplo Rodas Duplas			
Configuração													
Veículo	Carga	LL -20%	LL	LL +20%	Média	LL -20%	LL	LL +20%	Média	LL -20%	LL	LL +20%	Média
Toco		3,50	3,59	3,82	3,64	2,52	3,39	3,20	3,04	-	-	-	-
Trucado		3,67	3,27	2,96	3,30	-	-	-	-	4,00	3,73	3,39	3,71
Semi 3E	Cav ⁽¹⁾	3,92	3,35	2,78	3,35	4,01	3,74	3,28	3,68	-	-	-	-
	Reb ⁽²⁾	-	-	-	-	3,08	2,50	2,27	2,62	-	-	-	-
Semi 5E	Cav	3,99	3,64	3,29	3,64	-	-	-	-	3,38	3,27	3,23	3,29
	Reb	-	-	-	-	-	-	-	-	4,05	3,66	3,08	3,60
Média		3,77	3,46	3,21	3,48	3,21	3,21	2,92	3,11	3,81	3,56	3,23	3,53
Classific. ⁽³⁾		Segundo				Primeiro				Terceiro			

⁽¹⁾ Cavalo-mecânico

⁽²⁾ Semi-reboque

⁽³⁾ Classificação segundo o fator de equivalência de carga médio

Considerada um dos principais fatores na deterioração dos pavimentos, a carga por eixo apresentou um fator de equivalência de carga dinâmica médio de 3,37 (média de 3,48, 3,11 e 3,53). Tal fato mostra que a irregularidade longitudinal e as propriedades dinâmicas dos veículos

exercem significativa influência na carga por eixo que efetivamente atua no pavimento.

Vale ressaltar que tal análise foi feita para um pavimento em condições regulares a ruins ($IRI = 4,379$ m/km), sendo que no Brasil, conforme valores apresentados na Figura 4.6, tem-se pavimentos em condições ainda piores, o que elevaria os valores dos FECD's e, conseqüentemente, conduziria a resultados ainda mais significativos.

8.3.2. Tipo de Eixo

Se considerarmos o comportamento do mesmo tipo de eixo em diferentes veículos, a partir do fator de equivalência de carga médio (Tabela 8.8), os eixos em tandem duplo (TDRD) resultam em maiores cargas dinâmicas sobre o pavimento. Os eixos simples com rodas simples (ESRS) ocupam uma posição intermediária, enquanto os eixos simples com rodas duplas (ESRD) são os menos danosos, segundo essa análise.

No entanto, uma análise individual (para cada veículo), resultaria na classificação apresentada na Tabela 8.9, para os veículos trafegando a 90 km/h, com limite legal de carga por eixo, sobre o perfil *Wavyst*.

Tabela 8.8 – Fatores de Equivalência de Carga Dinâmica dos Eixos dos Veículos a 90 km/h, sobre o Perfil *Wavyst*.

EIXO		ESRS Eixo Simples Rodas Simples		ESRD Eixo Simples Rodas Duplas		TDRD Tandem Duplo Rodas Duplas	
Configuração							
Veículo \ Carga		LL	Classificação	LL	Classificação	LL	Classificação
Toco		3,59	Segundo	3,39	Primeiro	-	-
Trucado		3,27	Primeiro	-	-	3,73	Segundo
Semi 3E	Cav ⁽¹⁾	3,35	Segundo	3,74	Terceiro	-	-
	Reb ⁽²⁾	-	-	2,50	Primeiro	-	-
Semi 5E	Cav	3,64	Segundo	-	-	3,27	Primeiro
	Reb	-	-	-	-	3,66	Terceiro
Classific. ⁽³⁾		Segundo		Primeiro		Terceiro	

⁽¹⁾ Cavalo-mecânico

⁽²⁾ Semi-reboque

⁽³⁾ Classificação segundo o fator de equivalência de carga médio

Da Tabela 8.9, podem ser feitas, para cada veículo, as seguintes considerações:

- *Toco*: o eixo dianteiro (ESRS) resulta em maiores cargas dinâmicas;
- *Trucado*: o eixo traseiro (TDRD) resulta em maiores cargas dinâmicas;
- *Semi-reboque 3E*: o eixo traseiro do cavalo-mecânico (ESRD) resulta em maiores cargas dinâmicas;
- *Semi-reboque 5E*: o eixo do semi-reboque (TDRD) resulta em maiores cargas dinâmicas.

A inclusão de eixos em tandem triplo (TTRD) na análise não foi possível em função das limitações do *TruckSim*, visto que tal modelo de eixo não consta em sua biblioteca de dados.

8.3.3. Peso Bruto Total Combinado – Tipos de Veículos

A análise do peso bruto total combinado (PBTC), conforme descrito no item 4.4.2, pode ser feita através da classificação dos veículos segundo um fator de destruição devido às cargas dinâmicas (FD_{din}), dado pela Equação 4.17. A Tabela 8.10 mostra os fatores de destruição para o peso bruto total combinado dos veículos, a uma velocidade de 90 km/h, sobre o perfil de pavimento *Wavyst* (pavimento asfáltico com tratamento superficial ondulado).

A análise do peso bruto total combinado já permite uma análise dos tipos de caminhões, cuja classificação segundo os FD_{din} (Tabela 8.10) é do menos ao mais destrutivo. Vale ressaltar que foram efetivamente simulados apenas os quatro primeiros tipos de caminhões, os demais foram compostos a partir dos valores médios dos FECD's apresentados na Tabela 8.8. Sendo assim, os resultados apresentados nesses casos são apenas uma

aproximação, visto que não foram realizadas simulações com esses veículos.

Tabela 8.10 – Classificação dos Veículos Segundo o FD_{din} para FECD dos Veículos a 90 km/h, sobre o Perfil *Wavyst*.

<i>Veículos Convencionais Simulados</i>								
Veículo	Configuração	FECD (eixo)			Lotação Lt (t)	FD_{din} (x 100)	Classific. (FD_{din})	
		1	2	3				
<i>Toco</i>		3,64	3,04	-	11,287	59,18	Nono	
<i>Trucado</i>		3,30	3,71	-	16,948	41,36	Segundo	
<i>Semi-Reb.3</i>		3,35	3,68	2,62	15,421	62,58	Décimo	
<i>Semi-Reb.5</i>		3,64	3,29	3,60	23,037	45,71	Terceiro	
<i>Veículos Convencionais Compostos a Partir da Tabela 8.8</i>								
Veículo	Configuração	FECD (eixo)				Lotação Lt (t)*	FD_{din} (x 100)	Classific. (FD_{din})
		1	2	3	4			
<i>Romeu & Julieta-4</i>		3,64 (1)	3,04 (1)	3,11 (3)	3,11 (3)	22,500	57,33	Oitavo
<i>Romeu & Julieta-5</i>		3,30 (2)	3,71 (2)	3,11 (3)	3,11 (3)	24,500	54,00	Sétimo
<i>Semi-Reb.4</i>		3,35 (4)	3,68 (4)	3,53 (3)	-	20,000	52,80	Quinto
<i>Veículos Especiais Compostos a Partir da Tabela 8.8</i>								
Veíc.	Configuração	FECD (eixo)						Classific. (FD_{din})
		1	2	3	4	5	6	
<i>Tre-minhão</i>		3,30 (2)	3,71 (2)	3,11 (3)	3,11 (3)	3,11 (3)	3,11 (3)	Quarto
<i>Rodo-trem 5</i>		3,35 (4)	3,68 (4)	2,62 (4)	3,11 (3)	3,11 (3)	-	Sexto
<i>Rodo-trem 9</i>		3,64 (5)	3,29 (5)	3,60 (5)	3,53 (3)	3,53 (3)	-	Primeiro
(1) FECD do Veículo "toco"				(4) FECD do veículo "Semi-reboque 3"				
(2) FECD do veículo "trucado"				(5) FECD do veículo "Semi-reboque 5"				
(3) Média (Tabela 8.8)				* Fonte: FABBRI et. al. (1990).				

A classificação da Tabela 8.10 apresenta o caminhão "Semi-reboque 3" ($FD_{din} = 62,58$) como o veículo de carga mais destrutivo aos pavimentos, dentre os modelos estudados.

Tal como ocorre para a classificação apresentada por FABBRI, et. al. (1990) para cargas estáticas, os fatores de destruição calculados para as cargas dinâmicas classificam os veículos especiais em posições intermediárias, não sendo, portanto, nem menos nem mais destrutivos que os caminhões convencionais.

8.3.4. Suspensão

O *TruckSim* permite a análise comparativa do efeito da rigidez do sistema de suspensão sobre as cargas dinâmicas. Para o veículo “trucado”, foram simulados modelos de suspensões em feixe de molas com menor rigidez que a rigidez padrão, para três níveis de irregularidade (Figura 8.16).

Figura 8.16 – Carga Vertical Máxima para o Veículo “Trucado” com Suspensão em Feixe de Molas com Rigidez Padrão e com Menor Rigidez.

Como pode ser observado na Figura 8.16, menor rigidez do sistema de suspensão resulta em menor carga dinâmica máxima ($F_{Z_{max}}$) para menor índice de irregularidade e menor carga por eixo; por outro lado, menor rigidez resulta em maior carga dinâmica para maior índice de irregularidade e maior carga por eixo. Tal fato apenas não se verificou para o pavimento *Roughac*, em que a carga dinâmica máxima obtida para o sistema de suspensão padrão foi superior à obtida para o sistema de menor rigidez.

A Tabela 8.11 apresenta os fatores de equivalência de carga dinâmica calculados para o eixo dianteiro (ESRS) do veículo “trucado” com o sistema de suspensão padrão e com menor rigidez.

Tabela 8.11 – Fatores de equivalência de Carga Dinâmica para o Eixo ESRS do Veículo “Trucado” com Suspensão em Feixe de Molas com Menor Rigidez e Rigidez Padrão.

ESRS – Eixo Simples com Rodas Simples												
Carga Aplicada	LL-20% = 48 kN				LL = 60 kN				LL = 72 kN			
Pavimento	Tipo Susp.	Velocidade (km/h)			Tipo Susp.	Velocidade (km/h)			Tipo Susp.	Velocidade (km/h)		
		70	90	110		70	90	110		70	90	110
Goodpcc	padrão	1,56	1,81	1,92	padrão	1,50	1,71	1,80	padrão	1,41	1,61	1,68
	< rigidez	1,35	1,55	1,60	< rigidez	1,36	1,52	1,56	< rigidez	1,29	1,45	1,56
Roughac	padrão	2,11	2,21	2,12	padrão	1,93	2,09	2,14	padrão	1,79	2,01	2,02
	< rigidez	2,14	2,10	2,26	< rigidez	2,16	1,93	2,32	< rigidez	2,02	1,86	2,43
Wavyst	padrão	2,96	3,67	4,79	padrão	2,71	3,27	5,02	padrão	2,39	2,96	5,07
	< rigidez	2,40	3,21	4,08	< rigidez	2,96	4,64	6,11	< rigidez	2,91	4,35	6,70

Observa-se na Tabela 8.11 que, para baixos níveis de irregularidade (*Goodpcc*), o sistema de suspensão menos rígido apresenta menores FECD's. Já para maiores níveis de irregularidade (*Wavyst*), o sistema menos rígido apresenta maiores FECD's que o sistema padrão para maior carga por eixo, apresentando comportamento oposto para menor carga por eixo.

8.3.5. Pressão de Enchimento dos Pneus

A pressão de enchimento dos pneus pode ser avaliada no *TruckSim* apenas qualitativamente, mediante variação na rigidez do pneu e do sistema de suspensão.

Sabe-se que uma maior pressão de enchimento do pneu corresponde a um sistema mais rígido. Portanto, espera-se um comportamento qualitativamente análogo aos resultados apresentados para os sistemas de suspensão, embora possam apresentar diferentes fatores de equivalência de carga dinâmica.

8.3.6. Velocidade

A influência da velocidade foi analisada no item 8.1, relacionando-a aos diversos tipos de ressaltos e depressões isoladas e perfis longitudinais de pavimentos, para diferentes condições de carregamento. No entanto, vale aqui ressaltar algumas dessas considerações:

- “*Panela*”: para eixos simples de rodas simples (ESRS) ocorre uma redução da carga vertical máxima (F_z) com o aumento da velocidade, enquanto para eixos simples com rodas duplas (ESRD) ocorre um aumento de F_z , ocorrendo um valor máximo para a velocidade de 90 km/h, seguido de uma redução para velocidade de 110 km/h (Figura 8.2).
- *Desnível pavimento/ponte*: a velocidade exerce pouca influência na carga vertical sobre esse tipo de irregularidade, o que se justifica pela proximidade das curvas mostradas na Figura 8.6.
- *Sonorizadores*: para eixos simples de rodas simples (ESRS), ocorre um pequeno acréscimo de $F_{z_{max}}$ até determinado valor para a velocidade de 90 km/h, seguido de uma redução para velocidade de 110 km/h (Figura 8.9). Para para eixos simples com rodas duplas (ESRD) ocorre um

aumento da carga vertical máxima ($F_{Z_{max}}$) com o aumento da velocidade.

- *Irregularidade longitudinal (perfis de pavimentos):* a velocidade exerce pouca influência para baixos níveis de irregularidade, sendo mais significativa para maiores valores de IRI (Figura 8.12).
- *Perfis senoidais:* a velocidade exerce pouca influência sobre perfis senoidais com baixa amplitude e comprimento de onda, apresentando um aumento da carga vertical máxima ($F_{Z_{max}}$) com o aumento da velocidade para os demais perfis (Figura 8.15).

A Figura 8.17 mostra a carga vertical máxima em função da velocidade para o veículo “trucado” trafegando sobre o pavimento *Wavyst*.

Figura 8.17 – Carga Vertical Máxima em Função da Velocidade para o Veículo “Trucado” Trafegando sobre o Pavimento *Wavyst*.

Observa-se, a partir da Figura 8.17, que as curvas têm aproximadamente o mesmo comportamento, ou seja, a mesma inclinação para diferentes condições de carregamento no mesmo eixo. Isso significa que o efeito da velocidade sobre as cargas dinâmicas máximas ($F_{Z_{\max}}$), no intervalo considerado neste trabalho (70 a 110 km/h), é pequeno.

9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esse capítulo apresenta as conclusões dos estudos realizados e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros a partir dos resultados obtidos neste trabalho.

9.1. CONCLUSÕES

9.1.1. Quanto aos Objetivos Estabelecidos

Quanto aos objetivos estabelecidos neste trabalho, cabem as seguintes considerações:

- Alguns modelos de simulações de cargas dinâmicas sobre os pavimentos rodoviários foram apresentados no Capítulo 5, destacando-se os fundamentos matemáticos considerados por cada um. No capítulo 6 foi apresentado o modelo TruckSim, efetivamente utilizado neste trabalho.
- As especificações adotadas pelos organismos rodoviários brasileiros para a consideração dos efeitos das cargas móveis sobre as pontes, prescritas na norma NBR 7187 (ABNT, 1986), foram avaliadas em termos de coeficiente de impacto, mediante as simulações realizadas, cujos resultados são apresentados no item 8.2.
- Dados reais de carga foram levantados por DEMARCHI & SETTI (1998), mediante a utilização de balança, para a determinação do desempenho dos

veículos de carga em rampas. Esses dados são apresentados e analisados nos itens 7.3 e 7.4 deste trabalho, sob o ponto de vista das cargas efetivamente atuantes nos pavimentos rodoviários brasileiros.

- Os fatores intervenientes nas simulações foram considerados mediante a análise dos valores prescritos nas normas brasileiras e mediante a análise dos estudos realizados por BOTTURA et. al. (1996) e MARTINS (1996), para o caso da irregularidade longitudinal dos pavimentos.
- Os efeitos dos fatores que afetam as cargas dinâmicas dos veículos rodoviários sobre os pavimentos e pontes foram analisados mediante a realização de 450 simulações com o programa computacional *TruckSim*, 207 das quais efetivamente apresentadas neste trabalho, com as demais 243 tendo sido utilizadas para a identificação dos recursos e limitações do programa e para a realização de pré-análises do comportamento dos fatores a serem avaliados.
- Os efeitos dos fatores selecionados são apresentados e analisados no Capítulo 8 deste trabalho.
- A análise comparativa dos efeitos provocados pelos Veículos Combinados Longos (VCL's) e os caminhões convencionais foi realizada mediante a composição dos diversos tipos de veículos a partir dos quatro tipos simulados, cujos resultados são apresentados no item 8.3.3.

Com base nas considerações descritas anteriormente, pode-se afirmar que os objetivos estabelecidos neste trabalho (item 1.3) foram atingidos com êxito.

9.1.2. Quanto aos Conceitos Aplicados nos Modelos de Simulações

Os conceitos aplicados em simulações de cargas dinâmicas sobre os pavimentos são multidisciplinares. Para a modelagem matemática de um veículo, por exemplo, são utilizados os conceitos de dinâmica das estruturas,

cuja aplicação também pode ser feita na modelagem visco-elástica de pavimentos rodoviários.

Os pavimentos rodoviários são considerados, na maioria dos modelos de simulação, como uma estrutura de várias camadas, avaliando-se, principalmente, o seu comportamento em termos de tensões e deformações. Apenas recentemente o efeito da irregularidade longitudinal tem sido estudado e, sobretudo, para a análise de condições de rolamento e de estabilidade dos veículos.

As simulações realizadas neste trabalho permitiram a análise dos efeitos dessas irregularidades sob outro ponto de vista, o da variação que elas provocam nas cargas atuantes nos pavimentos, as cargas dinâmicas. Permitiram, assim, a análise comparativa em relação às cargas estáticas consideradas pelas normas brasileiras.

Por outro lado, a maioria dos modelos matemáticos que consideram as propriedades dinâmicas dos veículos rodoviários visa servir tão somente à engenharia automotiva, considerando o pavimento como um corpo rígido, ou seja, desconsiderando as propriedades reológicas dos materiais que o compõem. Apesar disso, o modelo utilizado (*TruckSim*) serviu plenamente à finalidade deste trabalho, pois o principal objetivo, avaliar os efeitos de características dos veículos rodoviários e da irregularidade dos pavimentos sobre as cargas dinâmicas, foi alcançado independentemente da consideração do estado dinâmico de tensões ou deformações dos pavimentos.

Sabe-se que as cargas dinâmicas são indiretamente consideradas no conceito de equivalência de carga, em função do número de operações do eixo padrão sobre o pavimento, que após um número elevado de operações provocou o desgaste dos pavimentos e, conseqüentemente, o aumento das cargas sobre este. No entanto, a magnitude dessas cargas dinâmicas não foi avaliada. O mesmo conceito de equivalência de carga foi aplicado neste

trabalho apenas para avaliar o efeito relativo das cargas dinâmicas com as cargas estáticas consideradas. Através dos fatores de equivalência de cargas dinâmicas (FECD's) e os coeficientes de impacto (f) procurou-se mostrar a magnitude dessas cargas dinâmicas.

9.1.3. Quanto ao Modelo Adotado: *TruckSim*

O *TruckSim* apresentou-se como uma ferramenta fundamental na realização desses estudos, cujas potencialidades extrapolam os conceitos aplicados neste trabalho. Sua aplicação é realizada, principalmente, em pesquisas na engenharia automotiva, de um modo geral.

No entanto, para a realização de estudos mais complexos, haveria a necessidade de simular todos os modelos de veículos e suas propriedades, incluindo-se os eixos em tandem triplo e os sistemas de suspensão pneumática, por exemplo. Além disso, a consideração de modelos matemáticos de pavimentos que permitam também uma análise em termos de tensões e deformações seria bastante útil na engenharia rodoviária.

9.1.4. Quanto aos Resultados Obtidos

As saliências e depressões isoladas simuladas ("panelas", desníveis pavimento/ponte e sonorizador) resultaram em valores extremamente elevados de coeficientes de impacto (f) e FECD's, mostrando que o efeito desses tipos de irregularidades sobre as cargas dinâmicas é bastante significativo. Para o desnível pavimento/ponte, por exemplo, obteve-se um coeficiente de impacto de até 4,77, resultando em um fator de equivalência de carga FECD = 1132.

Os perfis de pavimentos simulados, conforme esperado, apresentaram resultados menos significativos, mas ainda relativamente superiores aos valores de carga estática, sobretudo para maiores níveis de IRI. Tal fato é resultado pelos valores de coeficientes de impacto, que apresentaram cargas dinâmicas até 34% superiores às cargas estáticas consideradas ($f = 1,34$), resultando em FECD = 3,73 (Tabela 8.5).

Conforme apresentado por MARTINS (1996), os níveis de irregularidade dos pavimentos brasileiros estão em condições ainda piores que os valores médios simulados, o que, conforme resultados apresentados, conduz a maiores cargas dinâmicas. Portanto, pode-se admitir que os valores dos FEC's e coeficientes de impacto são ainda maiores para a média dos pavimentos brasileiros.

Os estudos realizados podem servir de base para o aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento de pavimentos brasileiros, havendo, no entanto, a necessidade de um banco de dados com as irregularidades longitudinais dos pavimentos e das características dos veículos rodoviários que trafegam por nossas rodovias.

Os resultados obtidos para os perfis senoidais mostraram que os mesmos podem ser utilizados apenas para um intervalo de amplitude (A) e comprimento de onda (λ), ou seja, para valores muito pequenos ou muito elevados de A e λ , comparados com as dimensões do veículo, não é possível avaliar o efeito da irregularidade. Os baixos valores de IRI apresentados, nesses casos, confirmam essa análise.

As simulações realizadas mostraram que as propriedades dinâmicas dos veículos, analisadas no item 8.3, exercem significativa influência nas cargas dinâmicas. Tal fato mostra que há necessidade da realização de maiores estudos para a consideração desses fatores nos projetos de pavimentos.

Para o caso dos projetos de pontes, as cargas móveis já são consideradas na forma de coeficientes de impacto (ϕ), estabelecidos pela NBR 7187 (ABNT, 1986). No entanto, para níveis de IRI maiores que aqueles simulados neste trabalho, espera-se valores de ϕ superiores aos da referida norma.

A elevada magnitude das cargas dinâmicas ressalta a importância da consideração dos efeitos dinâmicos dos veículos rodoviários no

dimensionamento estrutural e nos modelos de desempenho de pavimentos. Deve-se destacar, também, o efeito preponderante da irregularidade longitudinal sobre os outros fatores considerados, numa clara indicação de que a melhor maneira de se reduzir os efeitos deletérios das cargas dinâmicas é a manutenção dos pavimentos em boas condições de rolamento.

9.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Maioria dos fatores analisados neste trabalho foram considerados em três níveis. Trabalhos futuros poderão ser mais específicos, avaliando apenas parte desses fatores de forma mais detalhada, elaborando-se, inclusive, curvas de tendência dos mesmos para serem utilizadas em estudos de métodos de dimensionamento de pavimentos.

Neste trabalho foram realizadas simulações com apenas quatro tipos de caminhões em função das limitações da versão acadêmica do *TruckSim*, tendo sido realizadas composições dos demais veículos a partir desses resultados. No entanto, propõe-se que trabalhos futuros possam ser realizados com a versão completa do *TruckSim*, ou ainda em convênio com o UMTRI, a fim de se buscar resultados mais próximos da realidade, tanto quanto possível.

O *TruckSim* considera o pavimento como um corpo rígido, não levando em consideração as propriedades dos materiais que o compõem. Sendo assim, para uma avaliação mais precisa dos efeitos das propriedades dinâmicas dos veículos sobre os pavimentos, seria necessário a utilização conjunta de modelos matemáticos de veículos e modelos de pavimentos de várias camadas, como os modelos elástico-linear e não-linear e os visco-elásticos.

Algumas propriedades dinâmicas dos veículos, como a variação da posição do CG, a frenagem e a realização de curvas, embora citadas neste trabalho, não foram analisadas em detalhe por fugirem aos seus objetivos. No

entanto, são de grande interesse ao engenheiro de pavimentação em razão dos esforços horizontais produzidos e deveriam ser estudadas oportunamente.

As pontes foram estudadas neste trabalho em termos de coeficientes de impacto, que resultam em uma majoração das cargas estáticas dos veículos de projeto, os “trens-tipo”. No entanto, o efeito provocado pelos veículos rodoviários de carga sobre as pontes pode ainda ser avaliado sob o ponto de vista das “*Bridge Formulas*”, utilizadas por organismos rodoviários dos Estados Unidos e Canadá.

9.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos realizados neste trabalho apresentaram os efeitos, tanto das propriedades dinâmicas dos veículos, quanto da irregularidade longitudinal dos pavimentos sobre as cargas dinâmicas, servindo como referência para trabalhos futuros que busquem um aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento dos pavimentos e pontes.

Espera-se, portanto, que os conceitos e resultados aqui apresentados possam contribuir para o crescimento científico e desenvolvimento de novas tecnologias para a engenharia rodoviária.

Anexos

ANEXO A

Anexo A - Simulações realizadas com o veículo “toco” - Mercedes Benz, modelo L-1618/51.

VEÍCULO:				Tipo: "Toco"				Fabricante: Mercedes-Benz								Anexo: A.1											
				Modelo: L-1618/51																							
FATORES				Eixo		E1 - Dianteiro (Eixo Simples - Rodas Simples) - Suspensão em feixe de molas																					
				Carga/Eixo (kN)		LL-20% 48			LL 60			LL+20% 72															
				P cm	C cm	Velocidade (km/h)																					
						70	90	110	70	90	110	70	90	110													
Irregularidades				Painéis			Profund. e Comprim.			5,08	73,15	121,72	103,65	91,89	141,78	124,54	112,59	157,28	141,08	128,78	Max						
												47,96	47,92	47,87	59,97	59,93	59,86	71,95	71,97	71,87	Med						
												9,15	7,21	6,71	10,03	8,28	8,06	10,59	8,78	9,02	DP						
				Pavimento-Ponte			Ponte 1			Ponte 2			Ponte 3			10,16	73,15	126,36	105,15	88,25	157,93	131,92	111,68	188,57	158,53	134,76	Max
																		47,93	47,91	47,83	59,94	59,94	59,82	71,92	71,92	71,83	Med
																		9,92	7,55	6,45	12,54	9,56	8,20	15,14	11,70	10,06	DP
				Base e Altura (cm)			Ponte 1			Ponte 2			Ponte 3			15,24	73,15	127,68	103,53	86,06	159,57	130,33	108,57	187,90	156,62	131,21	Max
																		47,97	47,88	47,79	59,98	59,90	59,78	71,88	71,88	71,79	Med
																		10,17	7,32	6,20	12,89	9,35	7,94	15,01	11,47	9,82	DP
				Sonorizador			Ponte 1			Ponte 2			Ponte 3			15,24	5,08	115,52	123,45	118,89	127,58	135,46	130,92	139,58	147,46	142,92	Max
																		47,99	47,94	47,98	59,96	59,91	59,96	71,95	71,92	71,98	Med
																		7,17	6,94	6,64	7,89	7,68	7,42	8,50	8,42	8,16	DP
			Ponte 1			Ponte 2			Ponte 3			15,24	10,16	182,87	198,86	189,68	194,95	210,88	201,73	206,96	222,88	213,73	Max				
														47,96	47,85	47,91	59,99	59,84	59,90	71,88	71,71	71,77	Med				
														15,22	14,54	13,83	16,96	16,23	15,42	17,51	17,00	16,27	DP				
			Ponte 1			Ponte 2			Ponte 3			15,24	15,24	250,19	274,26	260,45	262,29	286,29	272,51	274,31	298,29	284,51	Max				
														48,00	47,81	47,91	60,07	59,84	59,92	72,05	71,85	71,88	Med				
														24,58	23,33	22,02	26,14	24,69	23,35	26,63	25,53	24,19	DP				
			Ponte 1			Ponte 2			Ponte 3			14,00	3,00	173,64	179,47	95,59	185,06	193,98	108,37	197,02	206,61	120,19	Max				
														48,01	48,00	47,97	60,01	60,04	59,99	71,96	72,01	71,97	Med				
														3,98	3,91	2,30	4,07	4,05	2,37	4,23	4,23	2,40	DP				

Anexo A.1. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Toco" sobre Irregularidades Isoladas – Eixo Dianteiro.

VEÍCULO:		Tipo: "Toco"		Fabricante: Mercedes-Benz		Modelo: L-1618/51				Anexo: A.2					
FATORES		Eixo		E2 - Traseiro (Tandem Duplo - Rodas Duplas) - Suspensão em feixe de molas											
		Carga/Eixo (kN)		LL-20% 80			LL 100			LL+20% 120					
		P cm	C cm	Velocidade (km/h)											
		70	90	110	70	90	110	70	90	110					
Irregularidades	Painelas	Painel 1	Profund. e Comprim.	5,08	73,15	165,19	231,24	138,47	182,16	250,85	157,79	191,17	266,10	172,23	Max
					79,97	80,25	79,81	100,01	100,22	99,75	119,99	120,23	119,77	Med	
					9,63	12,82	9,05	9,13	13,06	9,52	8,78	13,40	10,22	DP	
	Pavimento-Ponte	Painel 2		10,16	73,15	214,38	334,56	150,71	250,98	373,07	187,38	269,74	402,25	214,37	Max
					79,88	80,62	79,76	99,90	100,67	99,73	119,85	120,66	119,80	Med	
					15,58	19,23	11,10	16,93	21,65	13,66	17,20	22,96	15,35	DP	
		Painel 3		15,24	73,15	217,75	422,15	148,32	270,28	461,91	185,35	306,15	495,28	215,92	Max
					79,82	81,00	79,72	99,76	101,10	99,69	119,75	121,00	119,76	Med	
					16,31	23,66	10,87	19,91	26,19	13,45	21,62	27,79	15,83	DP	
		Ponte 1	Base e Altura (cm)	15,24	5,08	154,83	150,92	151,84	175,56	173,64	175,03	196,25	196,53	198,37	Max
					80,02	80,08	80,09	99,92	99,97	99,99	119,95	120,07	120,13	Med	
					8,47	9,48	9,94	11,50	13,43	14,23	11,88	13,28	13,65	DP	
	Ponte 2		15,24	10,16	227,27	217,91	220,08	247,90	245,13	250,76	269,63	274,92	280,98	Max	
				79,91	80,09	80,07	100,09	100,11	100,03	120,00	119,99	119,99	Med		
				18,80	21,65	22,71	21,89	25,50	26,67	21,89	25,09	26,00	DP		
	Ponte 3		15,24	15,24	292,53	327,92	326,38	313,22	364,93	367,98	336,30	396,60	400,15	Max	
				80,30	80,43	80,35	100,47	100,51	100,38	120,44	120,41	120,30	Med		
				28,45	33,47	35,16	30,90	36,43	38,00	31,62	37,10	38,25	DP		
Sonorizador				14,00	3,00	164,63	224,07	249,89	186,29	239,99	264,96	206,23	258,68	283,67	Max
						79,93	79,99	79,95	100,01	100,07	100,03	119,94	119,99	119,94	Med
						3,87	3,97	4,66	4,06	4,10	4,86	4,37	4,44	5,31	DP

Anexo A.2. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Toco" sobre Irregularidades Isoladas – Eixo Traseiro.

VEÍCULO:		Tipo: "Toco"		Fabricante: Mercedes-Benz		Modelo: L-1618/51				Anexo: A.3						
FATORES		Eixo		Peso Bruto Total Combinado (PBTC=E1+E2)												
		Carga/Eixo (kN)		LL-20% 128			LL 160			LL+20% 192						
		P	C	Velocidade (km/h)												
		cm	cm	70	90	110	70	90	110	70	90	110				
Irregularidades	Painéis	Painel 1	Profund. e Comprim.	5,08	73,15	209,64	279,62	186,08	241,12	311,63	217,25	276,18	339,36	247,94	Max	
						127,92	128,17	127,69	159,98	160,16	159,60	191,94	192,20	191,64	Med	
						13,16	14,84	11,03	13,42	15,61	12,20	13,67	16,31	13,42	DP	
		Painel 2	Profund. e Comprim.	10,16	73,15	258,69	382,87	198,37	306,03	433,64	246,61	335,50	475,24	284,37	Max	
						127,82	128,53	127,59	159,84	160,60	159,55	191,77	192,58	191,63	Med	
						18,30	20,80	12,69	20,85	23,89	15,73	22,52	26,15	18,15	DP	
	Painel 3	Profund. e Comprim.	15,24	73,15	262,10	470,54	196,15	325,34	522,56	244,94	371,92	568,37	286,11	Max		
					127,79	128,87	127,51	159,74	161,00	159,47	191,62	192,89	191,54	Med		
					19,04	24,90	12,41	23,50	28,01	15,48	25,95	30,43	18,49	DP		
	Pavimento-Ponte	Ponte 1	Base e Altura (cm)	15,24	5,08	195,52	203,45	198,89	227,59	235,46	230,93	259,59	267,46	262,93	Max	
						128,01	128,03	128,08	159,88	159,88	159,95	191,90	191,98	192,10	Med	
						10,13	11,00	11,07	13,72	16,06	16,92	13,82	16,23	16,88	DP	
		Ponte 2	Base e Altura (cm)	15,24	10,16	262,87	278,86	269,68	294,96	310,88	301,73	326,97	342,88	333,73	Max	
						127,87	127,94	127,98	160,08	159,95	159,93	191,88	191,71	191,76	Med	
						22,00	24,46	24,91	25,50	29,95	31,15	24,64	29,27	30,79	DP	
	Sonorizador	Ponte 3	Base e Altura (cm)	15,24	15,24	330,20	354,26	340,45	362,31	394,81	374,62	394,32	435,31	423,12	Max	
						128,29	128,25	128,26	160,53	160,35	160,31	192,49	192,27	192,17	Med	
						33,14	36,67	37,38	35,92	42,01	43,26	36,78	43,40	44,67	DP	
Sonorizador				14,00	3,00	254,02	272,15	297,93	284,45	300,82	324,11	316,32	330,75	353,83	Max	
						127,94	127,99	127,92	160,01	160,11	160,02	191,90	192,00	191,91	Med	
						5,58	5,59	5,20	5,89	5,88	5,47	6,43	6,46	6,11	DP	

Anexo A.3. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Toco" sobre Irregularidades Isoladas – PBTC.

VEÍCULO:				Tipo: "Toco"				Fabricante: Mercedes-Benz				Modelo: L-1618/51								Anexo: A.4			
FATORES				Eixo		E1 - Dianteiro (Eixo Simples - Rodas Simples) - Suspensão em feixe de molas																	
				Carga/Eixo (kN)		LL-20% 48				LL 60				LL+20% 72									
				Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110									
Pavimento (°.erd)	Wavyst	IRI (m/km)	4,379	Susp.	Padrão	59,89	63,42	63,30	74,11	79,71	80,25	85,85	96,96	100,49	Max								
						48,01	48,38	48,08	60,05	60,50	60,15	72,11	72,63	72,20	Med								
						4,01	4,79	5,82	4,65	5,56	7,15	5,50	6,99	9,31	DP								
				Eixo		E2 - Traseiro (Tandem Duplo - Rodas Duplas)																	
				Carga/Eixo (kN)		LL-20% 80				LL 100				LL+20% 120									
				Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110									
				Susp.	Padrão	95,17	98,27	100,78	122,65	131,16	134,90	147,83	155,38	163,63	Max								
						79,33	79,85	79,59	99,16	99,85	99,57	118,99	119,81	119,50	Med								
						5,40	7,05	9,86	7,16	10,08	14,69	9,25	13,77	19,03	DP								
				Eixo		Peso Bruto Total Combinado (PBTC=E1+E2)																	
				Carga/Eixo (kN)		LL-20% 128				LL 160				LL+20% 192									
				Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110									
Susp.	Padrão	143,61	153,12	157,14	187,82	195,12	204,90	221,18	236,48	238,66	Max												
		127,34	128,23	127,67	159,20	160,35	159,71	191,11	192,44	191,70	Med												
		6,12	7,59	11,15	8,49	11,32	17,87	10,68	15,75	23,58	DP												

Anexo A.4. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Toco" sobre o Pavimento Wavyst.

VEÍCULO:		Tipo: "Toco"												Anexo: A.5			
		Fabricante: Mercedes-Benz															
		Modelo: L-1618/51															
FATORES				E1 - Dianteiro (Eixo Simples - Rodas Simples) - Suspensão em feixe de molas													
				Eixo		LL-20%									LL+20%		
				Carga/Eixo (kN)		48			60			72					
				λ	A	Velocidade (km/h)											
		m	cm	70	90	110	70	90	110	70	90	110					
Pavimento Senoidal - IRI (m/km)	S005	0,1265	1,524	0,0635	49,34	49,49	49,34	61,07	61,47	61,36	73,08	73,48	73,35	Max			
	S010				48,00	48,00	48,00	60,00	60,00	60,00	72,00	72,00	72,00	Med			
	S020				0,87	0,85	0,68	0,69	0,85	0,69	0,70	0,86	0,69	DP			
	S050	2,333	3,048	0,1270	49,64	49,48	49,72	61,86	61,61	61,54	73,87	73,59	73,54	Max			
	S100				48,00	48,00	48,00	60,00	60,00	60,00	72,00	72,00	72,00	Med			
	S200				1,04	0,81	0,90	1,13	0,87	0,77	1,11	0,85	0,77	DP			
	S005	1,265	6,096	0,2540	52,10	52,06	51,55	64,67	64,57	64,11	76,57	76,45	76,03	Max			
	S010				48,01	48,00	48,00	60,01	60,00	60,00	72,02	72,00	72,00	Med			
	S020				2,58	2,11	1,72	2,94	2,35	1,91	2,84	2,25	1,85	DP			
	S050	2,333	15,240	0,6350	50,89	52,63	55,64	64,56	65,15	69,38	75,22	80,99	84,00	Max			
	S100				47,98	48,00	48,00	59,98	60,02	60,00	71,96	71,99	72,00	Med			
	S200				1,15	2,36	3,92	1,60	2,88	4,63	2,13	4,35	5,92	DP			
	S005	1,265	30,480	1,2700	50,56	50,95	51,42	62,89	63,53	64,59	74,99	77,19	79,67	Max			
	S010				47,99	48,00	48,00	59,98	60,00	60,00	71,98	72,01	71,99	Med			
	S020				0,95	1,33	1,73	1,16	1,67	2,38	1,35	2,07	3,24	DP			
	S050	1,265	60,960	2,5400	50,64	51,12	51,50	62,98	63,56	64,03	75,07	75,69	76,13	Max			
	S100				47,99	48,00	48,00	59,98	60,00	60,00	71,98	72,00	71,99	Med			
	S200				0,74	0,97	1,10	0,90	1,22	1,39	1,02	1,47	1,76	DP			

Anexo A.5. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Toco" sobre o Pavimento Senoidal – Eixo Dianteiro.

VEÍCULO:		Tipo: "Toco"												Anexo: A.6		
		Fabricante: Mercedes-Benz														
		Modelo: L-1618/51		E2 - Traseiro (Tandem Duplo - Rodas Duplas) - Suspensão em feixe de molas												
FATORES		Eixo														
		Carga/Eixo (kN)		LL-20% 80			LL 100			LL+20% 120						
		λ A		Velocidade (km/h)												
		m	cm	70	90	110	70	90	110	70	90	110				
Pavimento Senoidal - IRI (m/km)	Comprimento de Onda e Amplitude	S005	1,265	1,524	0,0635	81,03	81,51	81,36	100,80	101,44	101,39	120,80	120,89	121,42	Max	
						80,00	80,00	80,00	100,00	100,00	100,00	120,00	120,00	120,00	120,00	Med
						0,68	0,88	0,70	0,44	0,86	0,71	0,45	0,51	0,74	DP	
		S010	2,333	3,048	0,1270	81,65	81,42	81,53	101,74	101,49	101,54	122,00	121,89	121,77	Max	
						80,00	80,00	80,00	100,00	100,00	100,00	120,00	120,00	120,00	120,00	Med
						0,99	0,79	0,76	1,08	0,87	0,73	1,23	1,02	0,88	DP	
		S020	1,900	6,096	0,2540	83,76	83,38	83,25	104,42	103,69	103,48	125,52	125,01	124,08	Max	
						80,00	80,00	80,00	100,00	100,00	100,00	120,00	120,00	120,00	120,00	Med
						2,27	1,87	1,62	2,38	1,96	1,72	2,80	2,29	1,97	DP	
	S050	2,510	15,240	0,6350	86,77	88,93	89,26	113,41	116,20	114,65	131,74	144,78	144,28	Max		
					79,97	80,00	80,01	99,94	100,01	99,99	119,96	120,01	120,01	120,01	Med	
					4,57	4,88	4,36	7,47	7,09	6,31	6,33	12,07	11,77	DP		
	S100	0,728	30,480	1,2700	83,24	84,20	89,23	103,87	107,14	115,91	124,68	127,10	136,06	Max		
					79,99	80,00	80,00	99,99	99,99	99,99	119,99	119,99	119,98	119,98	Med	
					1,48	2,33	4,16	1,83	3,04	5,72	2,21	3,79	6,43	DP		
	S200	0,153	60,960	2,5400	83,12	84,40	85,34	103,45	105,76	107,45	124,10	127,16	129,32	Max		
					79,99	80,00	80,00	99,99	99,99	100,00	119,99	120,00	119,99	119,99	Med	
					0,98	1,44	1,83	1,20	1,84	2,45	1,44	2,44	3,15	DP		

Anexo A.6. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Toco" sobre o Pavimento Senoidal – Eixo Traseiro.

VEÍCULO:				Tipo: "Toco"		Fabricante: Mercedes-Benz				Anexo: A.7									
				Modelo: L-1618/51															
FATORES				Eixo		Peso Bruto Total Combinado (PBTC=E1+E2)													
				Carga/Eixo (kN)		LL-20% 128			LL 160			LL+20% 192							
				λ A		Velocidade (km/h)													
				m cm		70			90			110				70			90
Pavimento Senoidal - IRI (m/km)	Comprimento de Onda e Amplitude	S005	1,265	1,524	0,0635	129,29	129,67	129,28	161,02	161,57	161,27	192,99	193,39	193,42	Max				
						128,00	128,00	128,00	160,00	160,00	160,00	192,00	192,00	192,00	Med				
		S010	2,333	3,048	0,1270	0,66	0,66	0,49	0,44	0,71	0,51	0,28	0,78	0,62	DP				
						129,97	129,70	130,24	162,18	161,83	161,86	194,41	194,28	194,40	Max				
		S020	1,900	6,096	0,2540	128,01	128,00	128,00	160,00	160,00	160,00	192,00	192,00	192,00	Med				
						1,20	1,00	1,07	1,26	1,03	0,97	1,38	1,20	1,20	DP				
		S050	2,510	15,240	0,6350	134,99	134,17	133,63	168,19	167,00	166,38	201,17	200,03	199,29	Max				
						128,01	128,00	128,00	160,01	160,01	160,00	192,01	192,00	192,00	Med				
		S100	0,728	30,480	1,2700	4,58	3,62	3,00	5,01	3,91	3,22	5,22	4,12	3,43	DP				
						135,99	136,87	131,72	174,40	177,31	168,43	206,66	220,06	209,48	Max				
		S200	0,153	60,960	2,5400	127,95	128,00	128,01	159,91	160,02	159,99	191,92	192,00	192,01	Med				
						4,15	4,13	1,31	8,06	7,56	2,87	7,67	13,16	7,27	DP				
						131,69	134,13	139,51	165,12	169,07	180,03	197,90	204,18	215,72	Max				
						127,98	128,00	128,01	159,97	159,99	159,99	191,96	192,00	191,97	Med				
						2,06	3,14	5,16	2,61	4,22	7,59	3,21	5,40	9,28	DP				
						131,58	132,34	132,72	163,85	165,46	167,08	196,17	199,75	201,06	Max				
						127,98	128,00	128,00	159,97	159,99	160,00	191,96	191,99	191,98	Med				
						1,42	1,97	2,46	1,76	2,58	3,36	2,11	3,41	4,41	DP				

Anexo A.7. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Toco" sobre o Pavimento Senoidal – PBTC.

Anexo A.8. Carga Vertical Máxima no Eixo Dianteiro do Veículo "Toco" sobre Defeito do Tipo "Painel".

Anexo A.9. Carga Vertical Máxima no Eixo Traseiro do Veículo "Toco" sobre Defeito do Tipo "Painela".

Anexo A.10. Carga Vertical Máxima para Peso Bruto Total Combinado do Veículo "Toco" sobre Defeito do Tipo "Panela".

Anexo A.11. Carga Vertical Máxima no Eixo Dianteiro do Veículo "Toco" sobre Encontro Pavimento/Ponte.

Anexo A.12. Carga Vertical Máxima no Eixo Traseiro do Veículo "Toco" sobre Encontro Pavimento/Ponte.

Anexo A.13. Carga Vertical Máxima para Peso Bruto Total Combinado do Veículo "Toco" sobre Encontro Pavimento/Ponte.

Anexo A.14. Carga Vertical Máxima do Veículo "Toco" sobre Sonorizador.

Anexo A.15. Carga Vertical Máxima do Veículo "Toco" sobre Pavimento tipo Wavyst.

Anexo A.16. Carga Vertical Máxima do Veículo "Toco" no Eixo Dianteiro, sobre Pavimentos Senoidais.

Anexo A.17. Carga Vertical Máxima do Veículo "Toco" no Eixo Traseiro, sobre Pavimentos Senoidais.

Anexo A.18. Carga Vertical Máxima do Veículo "Toco" para o Peso Bruto Total Combinado, sobre Pavimentos Senoidais.

ANEXO B

Anexo B - Simulações realizadas com o veículo “trucado”
- Mercedes Benz, modelo L-2318/51 (6x2).

VEÍCULO:			Tipo: "Trucado"		Fabricante: Mercedes-Benz		Modelo: L-2318/51 (6x2)				Anexo: B.1				
FATORES			E1 - Dianteiro (Eixo Simples - Rodas Simples)												
			Eixo		LL-20%			LL			LL+20%				
			Carga/Eixo (kN)		48		60			72					
			Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90		110	
Tipo e Condição do Pavimento (IRI em m/km)	Faulipcc	3,424	Rigidez do Sistema de Suspensão (Feixe de Molas)	Padrão	12K*	56,51	59,91	60,81	69,26	73,12	72,22	81,51	85,70	84,01	Max
						47,90	47,90	47,88	59,90	59,90	59,87	71,91	71,90	71,86	Med
	Goodpcc	1,636		Padrão	12K	2,80	3,35	3,73	3,07	3,86	4,23	3,20	4,12	4,55	DP
						53,00	54,78	55,52	65,63	67,60	68,36	77,70	80,02	80,76	Max
	Roughac	3,463		Padrão	12K	47,85	47,86	47,84	59,85	59,85	59,82	71,83	71,84	71,80	Med
						1,71	2,28	2,38	2,03	2,71	2,88	2,19	2,89	3,11	DP
	Wavyst	4,379		< rigidez	6K**	51,35	52,95	53,26	64,23	65,89	66,23	76,24	78,16	79,50	Max
						47,84	47,85	47,83	59,82	59,84	59,81	71,80	71,84	71,79	Med
				Padrão	12K	1,28	1,56	1,71	1,64	1,99	2,16	1,70	2,13	2,41	DP
						56,69	57,23	56,70	69,47	70,67	71,08	81,93	84,10	84,20	Max
				< rigidez	6K	47,86	47,85	47,88	59,85	59,84	59,89	71,85	71,83	71,89	Med
						2,87	3,49	3,79	3,20	3,92	4,33	3,33	4,23	4,80	DP
		Padrão	12K	56,85	56,62	57,53	71,18	69,45	72,34	84,17	82,61	87,68	Max		
				47,86	47,85	47,86	59,86	59,86	59,85	71,86	71,85	71,82	Med		
		< rigidez	6K	2,66	3,32	3,68	3,25	3,98	4,46	3,47	4,32	5,41	DP		
				61,10	64,07	67,97	74,88	78,06	85,89	87,38	91,64	103,26	Max		
		Padrão	12K	48,01	48,41	48,05	60,07	60,58	60,14	72,14	72,78	72,23	Med		
				4,15	4,85	6,25	4,72	5,86	7,82	5,14	6,84	9,33	DP		
		< rigidez	6K	58,32	62,18	65,60	76,36	84,38	89,69	91,29	99,82	109,87	Max		
				48,03	48,36	48,07	60,12	60,53	60,13	72,21	72,76	72,40	Med		
		Padrão	12K	3,46	4,60	6,13	5,23	6,80	9,54	6,32	8,07	12,82	DP		

* Suspensão padrão: 12K rated flat leaf

** Suspensão de menor rigidez: 6K rated flat leaf

* Suspensão padrão: 12K rated flat leaf

** Suspensão de menor rigidez: 6K rated flat leaf

Anexo B.1. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Trucado" sobre Pavimentos – Eixo Dianteiro.

VEÍCULO:			Tipo: "Trucado"		Fabricante: Mercedes-Benz				Anexo: B.2						
FATORES			Eixo		E2 - Traseiro (Tandem Duplo - Rodas Duplas)										
			Carga/Eixo (kN)		LL-20% 136			LL 170			LL+20% 204				
			Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110		
Tipo e Condição do Pavimento (IRI em m/km)	Faulipcc	3,424	Rigidez do Sistema de Suspensão (Feixe de Molas)	Padrão	23K*	165,93	164,41	174,85	200,91	210,28	216,26	233,29	250,43	254,14	Max
						136,03	136,21	136,03	170,02	170,21	169,99	204,01	204,22	203,96	Med
	Goodpcc	1,636		Padrão	23K	8,47	9,51	10,92	8,95	11,70	13,86	9,08	13,29	15,68	DP
						149,13	151,79	154,36	184,62	188,59	195,83	219,86	224,21	233,85	Max
	Roughac	3,463		Padrão	23K	136,26	136,27	136,22	170,27	170,29	170,23	204,29	204,33	204,25	Med
						4,64	5,51	7,10	4,94	6,32	8,86	5,03	7,28	10,32	DP
	Wavyst	4,379		< rigidez	12K**	148,17	148,25	149,26	181,13	182,65	184,52	215,96	220,37	224,00	Max
						136,23	136,30	136,21	170,23	170,34	170,23	204,25	204,40	204,25	Med
				< rigidez	12K	3,99	4,34	5,15	3,88	4,46	5,35	4,12	5,03	6,14	DP
						166,77	169,51	177,75	198,18	211,20	218,37	234,17	249,94	254,86	Max
				Padrão	23K	136,04	135,97	136,26	170,01	169,95	170,31	203,97	203,91	204,32	Med
						8,41	9,55	11,79	9,16	11,72	14,81	9,58	13,57	17,16	DP
		< rigidez	12K	164,92	165,24	169,80	198,85	199,61	209,63	237,15	237,01	259,19	Max		
				136,03	135,97	136,06	170,00	169,94	169,99	203,98	203,88	203,93	Med		
		< rigidez	23K	7,68	8,05	10,70	7,66	8,49	12,68	8,35	9,82	15,62	DP		
				174,68	185,03	211,26	216,22	227,83	254,51	252,37	267,51	284,27	Max		
		Padrão	23K	135,07	135,79	135,33	168,82	169,67	169,17	202,56	203,62	203,05	Med		
				11,36	16,13	24,33	13,29	20,20	28,57	14,71	23,42	31,93	DP		
		< rigidez	12K	167,90	175,39	191,92	206,21	210,54	250,94	249,87	259,10	300,77	Max		
				135,09	135,96	135,74	168,74	169,75	169,42	202,47	203,68	203,39	Med		
		< rigidez	12K	10,38	14,33	20,62	11,70	14,48	26,54	14,40	18,25	33,60	DP		

* Suspensão padrão 23K rated full leaf

** Suspensão de menor rigidez 12K rated full leaf

* Suspensão padrão: 23K rated flat leaf

** Suspensão de menor rigidez: 12K rated flat leaf

Anexo B.2. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Trucado" sobre Pavimentos – Eixo Traseiro.

VEÍCULO:			Tipo: "Trucado"		Fabricante: Mercedes-Benz		Modelo: L-2318/51 (6x2)				Anexo: B.3			
FATORES			Peso Bruto Total Combinado (PBTC=E1+E2)											
			Eixo											
			Carga/Eixo (kN)	LL-20% 184			LL 230			LL+20% 276				
			Veloc(km/h)	70	90	110	70	90	110	70	90	110		
Tipo e Condição do Pavimento (IRI em m/km)	Faulibcc	3,424	Rigidez do Sistema de Suspensão (Feixe de Molas)	Padrão	209,34	211,74	218,02	260,65	267,03	273,16	305,78	316,80	323,01	Max
					183,93	184,11	183,91	229,92	230,11	229,86	275,92	276,12	275,82	Med
	Goodpec	1,636		Padrão	8,75	9,41	10,62	9,38	11,55	13,46	9,47	12,84	15,03	DP
					198,14	201,43	204,78	247,66	251,14	257,72	295,39	299,16	306,45	Max
	Roughac	3,463		Padrão	184,11	184,12	184,05	230,12	230,14	230,05	276,12	276,17	276,05	Med
					5,16	5,42	6,67	5,75	6,28	8,53	5,89	7,05	10,01	DP
	Wavyst	4,379		< rigidez	194,89	199,08	198,98	240,73	246,00	245,82	287,81	294,33	297,22	Max
					184,07	184,15	184,04	230,05	230,18	230,04	276,06	276,23	276,04	Med
				< rigidez	3,97	4,34	5,08	3,95	4,24	5,05	4,20	4,91	5,95	DP
					212,89	213,91	226,72	257,96	268,08	279,16	306,83	319,41	327,74	Max
				Padrão	183,89	183,83	184,14	229,86	229,79	230,20	275,82	275,75	276,21	Med
					8,74	9,41	11,75	9,65	11,55	14,71	10,02	13,21	16,99	DP
		< rigidez	212,92	210,40	215,81	256,58	254,04	268,75	306,92	306,85	335,70	Max		
			183,88	183,82	183,93	229,86	229,80	229,84	275,84	275,73	275,75	Med		
		< rigidez	7,89	8,61	11,39	8,04	8,95	13,80	8,78	10,42	17,87	DP		
			222,14	234,78	261,41	274,00	292,00	321,19	319,14	343,85	363,86	Max		
		Padrão	183,08	184,21	183,39	228,88	230,25	229,31	274,70	276,40	275,28	Med		
			11,65	16,34	24,92	13,68	20,62	29,76	15,03	24,13	33,86	DP		
		< rigidez	213,25	230,04	240,56	264,59	279,97	307,27	326,13	339,08	373,22	Max		
			183,12	184,32	183,81	228,86	230,28	229,54	274,68	276,44	275,79	Med		
		< rigidez	10,78	14,67	22,41	12,78	15,85	30,20	16,28	20,29	39,18	DP		

Anexo B.3. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Trucado" sobre Pavimentos – PBTC.

Anexo B.4. Carga Vertical Máxima do Veículo "Trucado" sobre Pavimento tipo Faultpcc.

Anexo B.5. Carga Vertical Máxima do Veículo "Trucado" sobre Pavimento tipo Goodpcc.

Anexo B.6. Carga Vertical Máxima do Veículo "Trucado" sobre Pavimento tipo Roughac.

Anexo B.7. Carga Vertical Máxima do Veículo "Trucado" sobre Pavimento tipo Wavyst.

Anexo B.8. Carga Vertical Máxima do Veículo "Trucado", com Suspensão em Feixe de Molas com Rigidez, sobre Pavimento tipo Goodpcc.

Anexo B.9. Carga Vertical Máxima do Veículo "Trucado", com Suspensão em Feixe de Molas com Rigidez, sobre Pavimento tipo Roughac.

Anexo B.10. Carga Vertical Máxima do Veículo "Trucado", com Suspensão em Feixe de Molas com Rigidez, sobre Pavimento tipo Wavyst.

ANEXO C

Anexo C - Simulações realizadas com o veículo “Semi-reboque 3E” - Mercedes Benz, modelo LS-1935.

VEÍCULO:		Tipo:		"Semi-reboque 3 Eixos"									Anexo: C.1										
		Fabricante:		Mercedes-Benz																			
		Modelo:		LS-1935																			
FATORES		Eixo		E1 - Dianteiro - Cavalo Mecânico (Eixo Simples - Rodas Simples) - Suspensão em feixe de molas																			
		Carga/Eixo (kN)		LL-20% 48			LL 60			LL+20% 72													
		Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110											
		Susp.		Padrão		62,36	65,01	63,16	74,50	78,47	79,62	86,99	90,36			94,64	Max Med DP						
						47,86	48,23	48,01	59,88	60,31	60,06	71,88	72,39			72,12							
						3,89	4,73	5,75	4,49	5,07	6,30	4,71	5,37			7,32							
		Eixo		E2 - Traseiro - Cavalo Mecânico (Tandem Duplo - Rodas Duplas) - Suspensão em feixe de molas																			
		Carga/Eixo (kN)		LL-20% 80			LL 100			LL+20% 120													
		Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110											
		Susp.		Padrão		105,21	108,92	116,68	128,43	134,09	142,91	145,92	156,21					164,84	Max Med DP				
						79,77	80,18	79,79	99,70	100,25	99,73	119,62	120,31					119,74					
						7,22	9,71	12,39	8,07	10,65	14,52	8,14	11,30					15,98					
		Eixo		E3 - Reboque (Tandem Duplo - Rodas Duplas) - Suspensão em feixe de molas																			
		Carga/Eixo (kN)		LL-20% 80			LL 100			LL+20% 120													
		Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110											
		Susp.		Padrão		103,01	102,74	114,67	126,16	122,55	137,19	146,44	144,04							161,44	Max Med DP		
						79,53	79,84	79,64	99,30	99,78	99,54	119,08	119,72							119,45			
						7,18	7,00	12,06	7,69	7,40	13,58	7,52	8,44							15,61			
		Eixo		Peso Bruto Total Combinado (PBTC=E1+E2+E3)																			
		Carga/Eixo (kN)		LL-20% 208			LL 260			LL+20% 312													
		Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110											
		Susp.		Padrão		247,91	246,86	265,37	295,69	303,24	329,93	348,44	355,62									388,48	Max Med DP
						207,15	208,25	207,44	258,87	260,33	259,33	310,58	312,43									311,30	
						11,28	12,59	17,16	11,68	14,12	20,85	11,36	15,70									25,16	

Anexo C.1. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Semi-reboque-3E" sobre o Pavimento Wavyst.

Anexo C.2. Carga Vertical Máxima do Veículo "Semi-reboque / 3E" sobre Pavimento tipo Wavyst.

ANEXO D

Anexo D - Simulações realizadas com o veículo “Semi-reboque 5E” - Mercedes Benz, modelo LS-2635.

VEÍCULO:		Tipo: "Semi-reboque 5 Eixos"								Anexo: D.1					
		Fabricante: Mercedes-Benz													
		Modelo: LS-2635													
FATORES		Eixo		E1 - Dianteiro - Cavalo Mecânico (Eixo Simples - Rodas Simples) - Suspensão em feixe de molas											
		Carga/Eixo (kN)		LL-20% 48			LL 60			LL+20% 72					
		Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110			
		Susp.	Padrão	64,05	65,28	70,30	78,52	79,93	88,42	92,01	93,84	102,19	Max		
				47,82	48,13	47,90	59,80	60,16	59,89	71,77	72,23	71,87	Med		
				4,20	5,56	6,79	5,19	7,17	8,20	5,88	8,14	8,85	DP		
		Eixo		E2 - Traseiro - Cavalo Mecânico (Tandem Duplo - Rodas Duplas) - Suspensão em feixe de molas											
		Carga/Eixo (kN)		LL-20% 136			LL 170			LL+20% 204					
		Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110			
		Susp.	Padrão	163,18	178,23	191,10	201,23	221,20	236,11	233,62	264,69	268,26	Max		
135,40	136,12			135,61	169,23	170,15	169,51	203,07	204,24	203,44	Med				
10,40	14,34			17,50	12,03	17,66	21,72	13,28	19,66	23,95	DP				
Eixo		E3 - Reboque (Tandem Duplo - Rodas Duplas) - Suspensão em feixe de molas													
Carga/Eixo (kN)		LL-20% 136			LL 170			LL+20% 204							
Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110					
Susp.	Padrão	177,21	185,57	181,61	212,66	226,84	228,15	248,82	262,01	259,63	Max				
		135,05	135,54	135,57	168,84	169,44	169,47	202,62	203,39	203,35	Med				
		12,45	15,73	15,58	14,80	19,73	20,01	15,82	21,34	21,83	DP				
Eixo		Peso Bruto Total Combinado (PBTC=E1+E2)													
Carga/Eixo (kN)		LL-20% 320			LL 400			LL+20% 480							
Veloc(km/h)		70	90	110	70	90	110	70	90	110					
Susp.	Padrão	372,41	402,32	412,88	457,68	494,92	496,08	540,39	578,47	573,98	Max				
		318,27	319,79	319,08	397,87	399,75	398,88	477,46	479,86	478,66	Med				
		19,40	25,70	27,62	23,80	32,36	33,63	26,26	35,55	35,85	DP				

Anexo D.1. Matriz Fatorial das Simulações Realizadas com o Veículo "Semi-reboque-5E" sobre o Pavimento Wavyst.

Anexo D.2. Carga Vertical Máxima do Veículo "Semi-reboque / 5E" sobre Pavimento tipo Wavyst.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials - *Interim Guide for Design of Flexible Pavement Structures*; 1972.
- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials - *Dynamic Allowance for Traffic Loadings*, Article 3.8; 1980.
- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials - *Guide for Design of Pavement Structures*; 1986.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; *NBR 7187 - Projeto e Execução de Pontes de Concreto Armado e Protendido*; Rio de Janeiro/RJ, 1986.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; *NBR 7188 - Carga Móvel em Ponte Rodoviária*; Rio de Janeiro/RJ, 1984.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; *NBR 7189 - Cargas Móveis para Projeto Estrutural de Obras Ferroviárias*; Rio de Janeiro/RJ, 1985.
- ASCE - American Society of Civil Engineers; *Comitee on Loads and Forces on Bridges*; 1981.
- BARON, M. L.; BLEICH, H. H.; WRIGHT, J. P.; *Ground Shock due to Rayleigh Waves from Sonic Booms*; J. Engrg. Mech.; ASCE, 93(5); 1967.

- BERNARDO, G.; *Pontes*; Grêmio Politécnico; DLP – Departamento de Livros e Publicações; Associação dos Alunos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; São Paulo/SP, 1980.
- BOTTURA, E. J.; DOMINGUES, F. A. A.; PRIETO, V.; *Comentários Sobre a Norma Rodoviária DNER-ES 173/86 “Método de Nível e Mira para a Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Rodoviária Tipo Resposta”*; 30ª Reunião Anual de Pavimentação; Salvador / BA, 1996.
- CANALE, A. C.; *Automobilística – Dinâmica e Desempenho*; Livros Érica Editora Ltda.; São Paulo / SP, 1989.
- CEBON, D.; *Interaction Between Heavy Vehicles and Roads- The Thirty-Ninth L. Ray Buckendale Lecture*; UMTRI – The University of Michigan Transportation Research Institute; Society of Automotive Engineers, Inc.; Warrendale/PA, 1993.
- COLE, J. D.; RUTH, J. H.; *Stresses Produced in a Half Plane by Moving Loads*; J. Appl. Mech., 25(4); 1958.
- CHATTI, K.; MAHONEY, J. P.; MONISMITH, C. L.; MORAN, T.; *Field Response And Dynamic Modeling Of An Asphalt Concrete Pavement Section Under Moving Heavy Trucks*; Road Transport Technology-4; University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor/MI, 1995.
- DEBS, M. K. E.; TAKEYA, T.; *Pontes de Concreto: Notas de Aula – Fascículo 2: Ações nas Pontes*; Publicação 056/95; EESC - Escola de Engenharia de São Carlos; USP – Universidade de São Paulo; São Carlos/SP, 1995.

DEMARCHI, S. H.; SETTI, J. R. A.; *Desempenho de Caminhões em Rampas Ascendentes*; XII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes; Fortaleza / CE, 1998.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem; *Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos*; DNER-PRO 159-85

FABBRI, G. T. P.; FERNANDES JR., J.L.; SÓRIA, M. H. A.; WIDMER, J. A.; *Análise de Composições Rodoviárias Quanto a “Fatores de Destruição” de Pavimentos*; 24ª Reunião Anual de Pavimentação – ABPv; Belém/Pa, 1990.

FERNANDES JR., J. L.; *Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego Sobre o Desempenho de Pavimentos*; Tese de Doutorado; EESC/USP - Escola de Engenharia de São Carlos / Universidade de São Paulo; São Carlos/SP, 1994.

FERNANDES JR., J.L.; SÓRIA, M. H. A.; e WIDMER, J.A.; *Estudo Comparativo dos Efeitos do Tipo de Rodagem e do Tipo de Suspensão sobre o Desempenho dos Pavimentos*; 28ª Reunião Anual de Pavimentação; Associação Brasileira de Pavimentação - ABPv; Belo Horizonte/MG, 1994.

GILLESPIE, T. D.; *Fundamentals of Vehicle Dynamics*; Society of Automotive Engineers, Inc.; Warrendale / PA, 1992.

GILLESPIE, T. D.; KARAMIHAS, S. M.; CEBON, D.; SAYERS, M. W.; NASIM, M. A.; HANSEN, W.; EHSAN, N.; *Effects of Heavy Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance*; Final Report 1-25; National Cooperative Highway Research Program – TRB – UMTRI; 1992.

- HARTOG, J. P. D.; *Vibrações nos Sistemas Mecânicos*; Tradução de Mauro O. C. Amorelli, Editora da Universidade de São Paulo; São Paulo/SP, 1972.
- HSU, K. M.; STREIT, D. A.; KULAKOWSKI, B. T.; *Analytical and Experimental Comparison of Heavy Vehicle Loads on Pavements*; Transportation Research Record 1473; Transportation Research Board; Washington/DC, 1995.
- HUHTALA, M.; PIHLAJAMÄKI, J.; *New Concepts on Load Equivalency Measurements*; Proc. 7th International Conference on Asphalt Pavements; University of Nottingham; Nottingham / UK, 1992.
- JACOB, B.; *Spatial Repeability of the Impact Forces on a Pavement and Multiple Sensor WIN – Research Element 5 of the OECD IR6 DIVINE Project*; Road Transport Technology-4; University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor/MI, 1995.
- KULAKOWSKI, B. T.; *Vehicle-Road Interaction*; ASTM (American Society for Testing and Materials); STP 1225; Philadelphia / PA, 1994.
- LAIER, J. E.; *Notas de Aula – Dinâmica das Estruturas*; EESC - Escola de Engenharia de São Carlos; USP - Universidade de São Paulo; SET – Departamento de Estruturas; São Carlos / SP, 1998.
- MARTINS, M. C.; *Desempenho de Pavimentos em Faixas de Tráfego Distintas de Rodovias*; Dissertação de Mestrado; Escola de Engenharia de São Carlos; Universidade de São Paulo; São Carlos / SP, 1996.
- MILES, J. W.; *On the Response of an Elastic Half-Space to Moving Blast Wave*; J. Appl. Mech., 27(4); 1960.
- PACEJKA, H. B.; BAKKER, E.; NYBORG, L.; *Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies*; SAE Technical Paper Series; International Congress and Exposition; Detroit/Michigan, 1987.

- PAYTON, R. G.; *Na Application of the Dynamic Betti-Rayleigh Reciprocal Theorem of Moving Point Loads in Elastic Media*; J. Appl. Mech., 21(1); 1964.
- PFEIL, W.; *Pontes em Concreto Armado - Vol. 1 e 2 - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.*; Rio de Janeiro/RJ, 1983.
- PIDWERBESKY, B. D.; *Accelerated Dynamic Loading of Flexible Pavements at the Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility*; Transportation Research Record 1482; Transportation Research Board; Washington/DC, 1995.
- QUEIRÓZ, C. A. V.; *Technical and Economic Issues in Road Deterioration and Maintenance*; World Bank – Infrastructure, Energy and Environment Division; Washington / DC, 1993;
- ROMERO, R.; RUIZ, A.; RODIL, R. e LECHUGA, M. A; *Variation of Deflection with Measuring Equipment and Load Speed on Test Track*; Transportation Research Record 1448; Transportation Research Board; Washington/DC, 1994
- SAYERS, M. W.; *On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile*; Transportation Research Record 1501; Transportation Research Board; Washington/DC, 1995.
- SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M.; *The Little Book of Profiling – Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*; UMTRI – The University of Michigan Transportation Research Institute; Ann Arbor/MI, 1997.
- SEBAALY, P. E.; TABATABAEE, N.; *Influence of Vehicle Speed on Dynamic Loads and Pavement Response*; Transportation Research Record 1410; Transportation Research Board; Washington/DC, 1993.

- SNEDDON, I. N.; *Fourier Transforms*; McGraw-Hill; New York / NY, 1951; apud ZAFIR, Z.; SIDDHARTHAN, R.; SEBAALY, P. E.; *Dynamic Pavement-Strain Histories from Moving Traffic Load*; Journal of Transportation Engineering, vol. 120, No. 5; Reno/NV, 1994.
- SHORE, S.; RABIZADEH, R.; Static and Dynamic Analysis of Horizontally Curved Box Girder Bridges; CURT Report nº T0174, Research Project HR-2(111); University of Pennsylvania; 1974.
- SÓRIA, M. H. A.; *As Bases Racionais dos Métodos Empíricos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis*; Tese de Livre-Docência; EESC – Escola de Engenharia de São Carlos; USP – Universidade de São Paulo; São Carlos/SP, 1996.
- SOUZA, J. B.; LYSMER, J.; CHEN, S. S.; MONISMITH, C. L.; *Effects of Dynamic Loads on Performance of Asphalt Concrete Pavements*; Transportation Research Record 1207; Transportation Research Board; Washington/DC, 1988.
- SOUZA, J. B.; MONISMITH, C. L.; *Dynamic Response of Paving Materials*; Transportation Research Record 1136; Transportation Research Board; Washington/DC, 1987.
- SOUZA, M. L.; *método de Projeto de Pavimentos Flexíveis*; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem-DNER; 1981.
- THOMSON, W. T.; *Teoria da Vibração com Aplicações*; Tradução de Cássio Sigaud; Editora Interciência; Rio de Janeiro / RJ, 1978.
- ULLIDTZ, P.; *Mathematical Model of Pavement Performance Under Moving Wheel Load*; Transportation Research Record 1384, Transportation Research Board; Washington/DC, 1994.

UMTRI – The University of Michigan Transportation Research Institute;
TruckSim Tutorial; Ann Arbor/MI, 1995.

UMTRI – The University of Michigan Transportation Research Institute;
Long Term Pavement Performance Study – LTTP Road Profile Data;
http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/ltp_erd.html, Ann Arbor /
MI, 1998.

ZAFIR, Z.; SIDDHARTHAN, R.; SEBAALY, P. E.; *Dynamic Pavement-
Strain Histories from Moving Traffic Load*; Journal of Transportation
Engineering, vol. 120, No. 5; Reno/NV, 1994.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BAY, J. A.; STOKOE II, K. H.; JACKSON, J. D.; *Development and Preliminary Investigation of Rolling Dynamic Deflectometer*; Transportation Research Record N° 1473; TRB – Transportation Research Board; Washington / DC, 1994.
- BONSE, R.P.H. e KUHN, S.H. - *Dynamic Forces Exerted by Moving Vehicles on a Road Surface* - HRB Bull. 233; 1959.
- BRANDON, J. A.; *Dynamic Testing of Bridges: Current Practice and Future Prospects*; Bridge Assessment Management and Design / Developments in Civil Engineering, Vol. 45, B. I. G. Barr, H. R. Evans, J. E. Harding (Editors) - Elsevier Science B. V. - Amsterdam, Netherlands – 1994.
- CARR, A. J.; *A Refined Element Analysis of Thin Shell Structures Including dynamic Loadings*; Department of Civil Engineering; University of California, Berkeley. Rep. 67-9; 1967.
- CLOUGH, E. W.; PENZIEN, J.; *Dynamics of Structures*; McGraw-Hill, Inc.; New York; 1987.
- D'AMATO, P.A. e WITCZAK, M.W.; *Analysis of In-Situ Granular-Layer Modulus from Dynamic Road-Rater Deflection*; TRR-Transportation Research Record - 755; Transportation Research Board; Washington, D.C.; 1980.

- DUNCAN, J. M.; MONISMITH, C. L. e WILSON, E. L.; *Finite Element Analysis of Pavements*; Highway Research Board - HRR 228; 1968.
- ERVIN, R.D.; *Influence of Truck Size and Weight Variables on the Stability and Control Properties of Heavy Trucks*; Volume II; The University of Michigan Transportation Research Institute – UMTRI; 83-10/2 - FHWA-RD-83-030; 1983.
- FHWA – Federal Highway Administration; *Impact of Truck Characteristics on Pavements: Truck Load Equivalency Factors*; Office of Engineering and Highway Operations Research and Development; Virginia / USA, 1992.
- GILLESPIE, T. D.; KARAMIHAS, S. M.; *Characterizing the Road Damaging Dynamics of Truck Tandem Suspensions*; Annual Meeting of the Transportation Research Board – Preprint; Washington, D.C., 1993.
- HEUKELOM, W.; KLOMP, A.J.G.; *Road Design and Dynamic Loading*; Proc. AAPT - Vol. 33; 1964.
- HU, G.; *Truck-Tire Interactions and Factors Affeting Dynamic Wheel Loads: PACCAR Study*; Proc. Symposium/Workshop on High Pressure Truck Tires; The University of Texas; Austin, TX, 1987.
- HUANG, T.; VELETOS, A. S.; *Dynamic Response of Three-Span Continuous Highway Bridges*; Tenth Progress Report on Highway Bridges Impact Investigation; University of Illinois, Urbana, 1960.
- HUANG, T.; VELETOS, A. S.; *Analysis of Dynamic Response of Highway Bridges*; J. Eng. Mechanics Div.; vol. 96, n° EM5, 1970.
- HVEEM, F.N.; SHERMAN, G.B.; *California Method for the Structural Desugn of Flexible Pavements*; International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements; Ann Arbor / MI, 1962.

- KENT, P.M.; ROBEY, M. T.; 1975 - 1979 *National Truck Characteristics Report* – FHWA; 1981.
- MITCHELL, C. G. B.; *The Effect of the Design of Goods Vehicle Suspensions on Loads on Roads and Bridges*; Transport and Road Research Laboratory - RR 115; 1987.
- MITCHELL, C. G. B.; GYENES, L.; *Dynamic Pavements Loads Measured for a Variety of Truck Suspensions*; International Conf. On Heavy Vehicle Weights and Dimensions; Kelowna, British Columbia – 1989.
- MOTTA, L.; MEDINA, J.; *Um Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis Desenvolvido no Brasil*; 25ª Reunião Anual de Pavimentação – ABPv; São Paulo/SP, 1991.
- NASSIF, H. H.; NOWAK, A. S.; *Dynamic Load Spectra for Girder Bridges*; Transportation Research Record N° 1476- TRB; 1994.
- PAPAGIANNAKIS, T.; HAAS, R.C.G.; WOODROOFFE, J.H.F. e LE BLANC, P.A. *Effects of dynamic Loads on Flexible Pavements* - TRR 1207 – Washington / DC; 1988.
- PAZ, M; *Structural Dynamics Theory and Computation*; Second Edition; Van Nostrand Reinhold Company; New York; 1982.
- PEREIRA, A. M.; PEREIRA, D. R. M.; *Um Estudo sobre alguns Fatores de Equivalência de Cargas de Eixo Empíricos e Mecanísticos*; Estudo Técnico para a Humberto Santana Engenheiros Consultores; 1989.
- PEREIRA, D. R. A. M.; *Contribuição ao Estudo dos Fatores de Equivalência de Cargas*; Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da USP; São Paulo / SP, 1992.
- QUEIRÓZ, C.A.V.; *Modelos de Desempenho de Pavimentos: Desenvolvimento e Aplicação*; DNER 692/50 – IPR; Rio de Janeiro, 1982.

- RAITHBY, K. D.; STERLING, A. B.; *Some Effects of Loading History on The Performance of Rolled Asphalt*; TRRL - LR 496 – Crowthorne / England, 1972.
- ROSCHKE, P. N.; *Dynamic vehicle loading on a Slab Bridge Using Multiple Actuators*; Transportation Research Record Nº 1476 – TRB; Washington / DC; 1994.
- RÖSLER, M.; *Dynamic Interaction Between Bridge and Vehicle* Transportation Research Record Nº 1460 – TRB; Washington / DC; 1994.
- SWEATMAN, P.F.; *Dynamic Road Loading: Instrumented Vehicles - FHWA Load Equivalence Workshop*; Washington, D.C., 1988.
- WELSCH, P.E.; *The Texas Mobile Load Simulator*; Progress Report; Center for Transportation Research; The University of Texas at Austin, 1992.
- WHITEMORE, A.P.; WILEY, J.R.; SCHULTZ, P.C.; POLLOCK, D.E.; *Dynamic Pavement Loads of Heavy Highway Vehicles - NCHRP 105 - HRB* – 1970.
- WILLIAMS, C.; SALAWU, O. S.; *Concept of Condition Assessment of Bridges Using Vibration Testing and Analysis*; Bridge Assessment Management and Design / Developments in Civil Engineering, Vol. 45, Pág. 67 a 72 - B. I. G. Barr, H. R. Evans, J. E. Harding (Editors) Elsevier Science B. V.; Amsterdam / Netherlands, 1994.
- WOODROOFFE, J.H.F. e LE BLANC, P.A. - *Heavy Vehicle Suspension Variations Affecting Road Life*; Proc. ARRB / FORS Symposium on Heavy Vehicle Suspension Characteristics; Canberra / Austrália, 1987.

WU, C.P.; SHEN, P.A.; *Dynamic Analysis of Concrete Pavements
Subjected to Moving Loads*; ASCE - Journal of Transportation
Engineering - Vol. 122 N° 5; New York / N.Y., 1996.

Rone Evaldo Barbosa
Universidade Estadual de Goiás
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil
Av. JK, 146 – Anápolis / GO
CEP: 75110-390 Fone: 0xx62-328-1111
E-mail: rone@genetic.com.br

José Leomar Fernandes Júnior
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Transportes
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 – São Carlos / SP
CEP: 13560-250 Fone: 0xx16-273-9601
E-mail: leomar@sc.usp.br