

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS EFEITOS DE CARGAS  
DINÂMICAS NA VIDA DE FADIGA DE PAVIMENTOS**

**MARCOS AIRES ALBUQUERQUE SANTOS, M.Sc.**

**ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D.**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.T.D. 073/11**

**BRASÍLIA / DF: JANEIRO / 2012**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS EFEITOS DE CARGAS  
DINÂMICAS NA VIDA DE FADIGA DE PAVIMENTOS**

**MARCOS AIRES ALBUQUERQUE SANTOS**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

**APROVADA POR:**

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D (UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**MONOEL PORFÍRIO C. NETO, DSc. (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**HERNAN E. M. CAVARJAL, DSc. (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc. (UnB)**  
**(EXAMINADOR SUPLENTE)**

---

**JOÃO VIRGÍLIO MERIGHI, DSc. (UPM)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 13 de JANEIRO de 2012.**

# FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, MARCOS AIRES ALBUQUERQUE

Simulação Numérica dos Efeitos de Cargas Dinâmicas na Vida de Fadiga de Pavimentos.  
[Distrito Federal] 2012 xvi, 134 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2012).

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil

1. Mecânica dos Pavimentos      2. Cargas Dinâmicas

3. Análise Numérica              4. Fadiga

I. ENC/FT/UnB                      II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, M.A.A. (2012). Simulação Numérica dos Efeitos de Cargas Dinâmicas na Vida de Fadiga de Pavimentos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-073/2012, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 134 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marcos Aires Albuquerque Santos.

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Simulação Numérica dos Efeitos de Cargas Dinâmicas na Vida de Fadiga de Pavimentos.

GRAU / ANO: Doutor / 2012

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Marcos Aires Albuquerque Santos

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Prédio SG-12, Universidade de Brasília.

CEP 70910-900 - Brasília, DF - Brasil  
marcosairess@gmail.com

## DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha esposa,

Kátia, e aos meus pais,

Alexandre e Izabel.

## AGRADECIMENTOS

Registro aqui meus sinceros e imensuráveis agradecimentos às pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para realização desta tese.

Agradeço a Deus, aos meus pais Alexandre e Izabel que me deram grandes oportunidades e muito amor. Aos meus irmãos, Taís, Juninho e Dudu pelo companheirismo e amizade incondicional, e também à querida dona Lurdes Barreto pelo carinho de todas as horas. Todos me ensinaram muito sobre como ser melhor.

À minha esposa, que sempre foi paciente e extremamente amorosa, me incentivando rigorosamente todos os dias na conclusão desta pesquisa. Ela é sem dúvida a amiga de todas as horas e uma grande mulher que admiro muito.

Ao professor Dorival Pedroso, por facilitar a minha ida para a Austrália, pelos auxílios com as dúvidas diárias e por contribuir largamente com a implementação da ferramenta numérica e com dicas de uso do programa Mechsys. Aos professores David Willians da Universidade de Queensland, Professor Houssein, Universidade de New South Wales, e ao professor David Airey, Universidade de Sidney pelos ensinamentos. Aos colegas da IPC Global pelos ensinamentos com testes em laboratórios. Ao professor Raul, do departamento de estruturas da UnB, pela ajuda com algumas alterações e adaptações necessárias no programa Mechsys e pela sua amizade e gentileza de sempre. Ao professor do departamento de Engenharia Elétrica, Adolfo, pela ajuda com a utilização do programa Simulink.

Ao Professor Márcio Muniz de Farias, o professor mais habilidoso, de melhor didática e mais capaz que já conheci, pelos seus valiosos ensinamentos como ser humano e como professor. Pela sua orientação intensa e paciente, que me ajudou a começar e finalizar o trabalho de forma altamente engrandecedora e alegre.

Ao professor e amigo Guga Valente pelo auxílio com as correções gramaticais desta tese. Aos amigos Giovanni, Edson Rogério, Rodrigo, Ary, Lorena, Petrônio, Josileide, Paulo Falcão, Alexandre Gil e Luiz Guilherme pelas valiosas discussões e por momentos agradáveis e ao CNPq pelo aporte financeiro.

## RESUMO

Este trabalho buscou avaliar, comparativamente, o comportamento estrutural do pavimento, considerando os carregamentos atuantes como estático ou dinâmico. O resultado dessa análise se deu pelo cálculo de vida de fadiga do pavimento, produzida pelos carregamentos dinâmico e estático. Trabalhos de outros pesquisadores motivaram e auxiliaram esta pesquisa, fornecendo instrumentos para que se avaliassem criticamente as principais metodologias de dimensionamento de pavimento existentes. Destarte foi sugerida nova metodologia para o dimensionamento de pavimentos considerando o carregamento dinâmico e imperfeições nos pavimentos. Admitiu-se, como base para a criação do novo método de dimensionamento, o uso do modelo mecanicista-empírico, o modelo à fadiga, os conceitos que envolvem o estudo da irregularidade de pavimentos e o estudo do cálculo das forças dinâmicas atuantes sobre o pavimento, por meio dos modelos de um quarto de carro e um quarto de caminhão. Para o desenvolvimento e testes do novo método, utilizaram-se as ferramentas numéricas Simulink, para o cálculo das forças dinâmicas pneu-pavimento, e o programa Mechsys, que usa o método dos elementos finitos para calcular o estado de tensão-deformação nas camadas do pavimento estudado. A nova metodologia aplicada se mostrou altamente relevante diante dos resultados dos testes comparativos realizados, entre carregamento estático e dinâmico. Nos testes admitiram-se várias configurações de perfil, velocidade e defeitos. Os defeitos testados foram concentrados e desconcentrados ao longo dos perfis estudados, representados por “buracos”, “elevações” e “senos” por onde trafegavam as diferentes velocidades de caminhão de eixo padrão, 8,2 kN. Os resultados mostram que para defeitos concentrados, ao se considerar o carregamento dinâmico, o número máximo de passadas de um veículo do tipo padrão é de 10 a 100.000 vezes menor que o número de passadas calculadas para o carregamento estático. Diferenças menores, porém igualmente relevantes, são apresentados para as camadas onde o defeito é desconcentrado. Para os testes realizados restringiu-se a uma única disposição e dimensões das camadas do pavimento.

## ABSTRACT

This study aimed to comparatively evaluate the structural behavior of the pavement, considering both, static and dynamic loads acting. The result of this analysis is given by the calculation of fatigue life of the pavement, produced by the dynamic and static loads. The literature review helped and motivated this research by providing arguments in order to evaluate critically the main methods of pavement design. Then it was suggested new methodology or the design of pavements considering the dynamic loading and highway defects. Then, were assumed as the basis for the creation of the new method of design the mechanistic-empirical fatigue model, the concepts of IRI, dynamic forces concepts and the quarter car and the quarter truck models. For the development and testing of the new methodology were used two numerical tools. The first one was Simulink, it was used to calculate the dynamic forces acting on the pavement. The other one was Mechsys program, which uses the finite element method to calculate the stress-strain state in the pavement layers. The new methodology applied in this research presented highly relevant results. The results show that when was considering dynamic loading instead of the static loading and admitted different profiles settings, speeds and defects the fatigue life can change abruptly. The simulation consider the pavement defects as concentrated or distributed over the profiles, it was represented by "holes", "elevation" and "sine wave" under vehicle traffic represented by a standard axle, 8.2kN , at different speeds. The results presented for the concentrated defect, when was considering the dynamic loading show the maximum number of passes of a standard axle got a range between 10 to 100,000 times smaller than the number calculated for static loading. The sine profile had minor differences at the number of passes between the static and the dynamic loads, however the difference was expressive as well. Finally, the testes were limited to a single layout and dimensions of the pavement layers.

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. OBJETIVO.....	1
1.2. RELEVÂNCIA.....	2
1.3. HIPÓTESE .....	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	3
CAPÍTULO 2.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO .....	5
2.1.1. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANICISTA-EMPÍRICO .....	7
2.1.2. ESTUDO DA RESISTÊNCIA À FADIGA .....	13
2.2. IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	15
2.3. ESTUDO DE CARREGAMENTO DINÂMICO EM PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	18
CAPÍTULO 3.....	22
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	22
3.1. FORMULAÇÃO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANICISTA .....	22
3.2. FUNDAMENTOS DA DINÂMICA.....	28
3.2.1. AMORTECIMENTO.....	30
3.3. SISTEMA DINÂMICO QUARTER CAR.....	31
3.4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	33
3.4.1. CONCEITOS GERAIS .....	34
3.5. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA PROBLEMAS DINÂMICOS .....	38
3.5.1. O AMORTECIMENTO LINEAR E A MATRIZ DE MASSA .....	39
3.6. ESQUEMA DE SOLUÇÃO .....	42
3.7. ESQUEMA DE INTEGRAÇÃO NO TEMPO.....	44
3.8. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO .....	47
3.9. CARACTERÍSTICAS INICIAIS PARA O DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS.....	51
3.10. PROJETOS DE DIMENSIONAMENTO PRÉVIO DO PAVIMENTO .....	54
3.11. CÁLCULO DE RESPOSTA E VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO.....	55
CAPÍTULO 4.....	57
4. AS FERRAMENTAS NUMÉRICAS E SUAS VALIDAÇÕES .....	57
4.1. A FERRAMENTA NUMÉRICA MECHSYS .....	57
4.1.2. VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA NUMÉRICA MECHSYS.....	62
4.2. A FERRAMENTA NUMÉRICA MATLAB/SIMULINK.....	66
4.2.1. SOLUÇÃO DO QUARTER CAR USANDO O SIMULINK.....	70
CAPÍTULO 5.....	79

5.	AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DINÂMICOS .....	79
5.1.	PARÂMETROS DOS VEÍCULOS UTILIZADOS .....	79
5.1.2.	VELOCIDADE UTILIZADA NAS ANÁLISES .....	80
5.1.3.	PERFIS LONGITUDINAIS ESTUDADOS .....	80
5.2.	SIMULAÇÃO PARA VEÍCULO DO TIPO GOLDEN CAR.....	81
5.3.	SIMULAÇÃO PARA O EIXO SIMPLES PADRÃO (ESP).....	88
CAPÍTULO 6.	.....	98
6.	ANÁLISES NUMÉRICAS .....	98
6.1.	CARREGAMENTO DINÂMICO .....	99
6.2.	ANÁLISE NUMÉRICA DE CARGAS MÓVEIS .....	102
6.3.	ANÁLISE NUMÉRICA DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO SOB CARGAS DINÂMICAS .....	104
CAPÍTULO 7.	.....	127
CONCLUSÕES	.....	127
7.1.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	130
CAPÍTULO 8.	.....	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	131

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Variação do Índice de Serventia (DNIT, 2011).....	11
Figura 2.2 – Esforços do tráfego sobre o pavimento (BALBO, 2007) .....	14
Figura 2.3 – Simulação tipo quarto de carro (Loizos e Plati, 2008).....	17
Figura 2.4 – Distribuição da carga sobre os pneus do eixo padrão.....	20
Figura 2.5 – Carga por eixo em função do tempo, buraco (Barbosa, 1999) .....	20
Figura 2.6 – Carga por eixo em função do tempo para sobressalto (Barbosa, 1999) .....	20
Figura 3.1 – Camadas e esforços atuantes no pavimento flexível sob tráfego de veículos.....	23
Figura 3.2 – Trincas tipo couro de jacaré advindas dos esforços de flexão .....	24
Figura 3.3 – Trilha de roda devido às deformações verticais permanentes do pavimento.....	24
Figura 3.4 – (a) Módulo de resiliência (b) Módulo de elasticidade.....	25
Figura 3.5 – Sistema massa-mola e diagrama de corpo livre (Inman, 2007) .....	29
Figura 3.6 – Relação tempo deslocamento para o sistema massa mola sem amortecimento.....	29
Figura 3.7 – Representação do amortecimento no tempo.....	30
Figura 3.8 – Representação do sistema oscilatório com amortecimento (Inman, 2007) .....	31
Figura 3.9 – Forças atuantes nos sistema quarto de carro .....	32
Figura 3.10 – Relação entre taxa de amortecimento e frequência (Chopra, 2000).....	40
Figura 3.11 – Relação não-linear entre força, $F$ , versus deslocamento, $u$ .....	43
Figura 3.12 – Procedimento incremental básico de integração .....	44
Figura 3.13 – Modelo mecanicista de dimensionamento de pavimento asfáltico .....	48
Figura 3.14 – Variação de IRI em função do tipo de pavimento e velocidade do veículo .....	49
Figura 3.15 – Modelo mecanicista modificado de dimensionamento de pavimento asfáltico .....	50
Figura 3.16 – Agentes atuantes sobre o pavimento asfáltico .....	51
Figura 4.1 – Representação dos elementos de uma treliça e das condições de contorno.....	62
Figura 4.2 – Deslocamento versus tempo do nó 3 quando submetido ao carregamento cíclico.....	63
Figura 4.3 – Representação de um problema dinâmico, elementos quadrangulares de 8 nós.....	64
Figura 4.4 – Deslocamento versus tempo do nó 17 quando submetido ao carregamento cíclico.....	64
Figura 4.5 – Viga biapoiada e as respectivas condições de contorno aplicadas .....	65
Figura 4.6 – Resultado do deslocamento vertical no tempo para diferentes algoritmos.....	66
Figura 4.7 – Bibliotecas de blocos Simulink .....	66
Figura 4.8 – Esquema massa-mola-amortecedor.....	67
Figura 4.9 – Diagrama de blocos apresentados no ambiente SIMULINK.....	69
Figura 4.10 – Deslocamento horizontal da massa ao longo do tempo.....	69
Figura 4.11 – Modelo Simulink, primeiro passo.....	71
Figura 4.12 – Modelo Simulink, segundo passo .....	71
Figura 4.13 – Modelo Simulink, terceiro passo .....	72
Figura 4.14 – Modelo Simulink, cálculo da força .....	73
Figura 4.15 – Modelo Simulink, cálculo do IRI .....	74
Figura 4.16 – IRI para diferentes perfis de pavimento (Sayers e Karamihas 1998) .....	75

Figura 4.17 – Área de trabalho do programa Adams/View e modelo de um quarto de carro .....	77
Figura 4.18 – Validação do modelo Simulink para cálculo de forças pelo programa Adams .....	78
Figura 5.1 – Perfis longitudinais do tipo buraco, elevação e senoidal. ....	80
Figura 5.2 – Relação entre RI e profundidades das depressões (ou alturas das elevações).....	83
Figura 5.3 – Relação força versus RI para perfis buraco e elevação, para veículo Golden Car.....	83
Figura 5.4 -Resultado da relação força versus RI para perfis seno para Golden Car. ....	86
Figura 5.5 –Composição do perfil por duas senoidais.....	87
Figura 5.6 -Resultado da relação força versus RI para perfis seno composto para Golden Car .....	88
Figura 5.7 – Relação força versus RI* para perfis em buraco e elevação para caminhão ESP.....	90
Figura 5.8 – Resultado da relação força versus RI* para perfis seno para ESP.....	91
Figura 5.9 – Resultado da relação força versus IRI para perfis seno para ESRD .....	92
Figura 5.10 - Força versus IRI para perfis “Buraco” e “Elevação” . ....	93
Figura 5.11 - Força versus RI para perfis “Buraco” e “Elevação” .....	95
Figura 5.12 - Força versus RI para perfis “Seno2” .....	96
Figura 6.1 – Função haversine para simulação do carregamento dinâmico (Huang, 2004).....	103
Figura 6.2 – Camadas do pavimento asfáltico flexível .....	104
Figura 6.3 – Descrição da geometria e condições de contornos do problema.....	107
Figura 6.4 – Discretização do domínio via método dos elementos finitos .....	108
Figura 6.5 – Deformações na direção x, tração representada por valores positivos.....	109
Figura 6.6 – Tensão normal horizontal, direção x ,tração representada por valores positivos.....	110
Figura 6.7 – Deformações verticais, compressão representada por valores negativos.....	110
Figura 6.8 – Tensão vertical, compressão representada por valores negativos .....	111
Figura 6.9 – Deformação horizontal nos pontos “A” e “B” ao longo do tempo.....	112
Figura 6.10 – Tensão horizontal nos pontos “A” e “B” ao longo do tempo.....	112
Figura 6.11 – Deformação vertical nos pontos B e D ao longo do tempo.....	113
Figura 6.12 – Tensão vertical nos pontos B e D ao longo do tempo .....	114
Figura 6.13 – Condicionantes para avaliação da vida de fadiga das camadas do pavimento.....	115

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Programas computacionais desenvolvidos para dimensionamento de pavimento.....	9
Tabela 2.2 – Parâmetros usados no veículo tipo <i>Golden Car</i> (Rio, 1999) .....	18
Tabela 3.1 – Coeficientes de trincas por fadiga (Huang, 2004).....	26
Tabela 3.2 – Coeficientes laboratório de deformação plástica do subleito (Huang, 2004).....	27
Tabela 4.1–Resultados de IRI (Sayers e Karamihas versus o modelo Simulink) para os perfis representados por senoidais.....	76
Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados na simulação comparativa entre Simulink e Adams.....	78
Tabela 4.3–Velocidade do veículo e características do perfil senoidal.....	78
Tabela 5.1 – Parâmetros dos veículos Golden Car ESP .....	79
Tabela 5.2 – Resumo dos parâmetros usados na análise.....	81
Tabela 5.3 – Parâmetros dos perfis em “Elevação” .....	82
Tabela 5.4 – Parâmetros dos perfis “Buraco” .....	82
Tabela 5.5 – Resultados para os perfis senoidais simples.....	85
Tabela 5.6 – Parâmetros dos perfis senoidais.....	87
Tabela 5.7 – Resultados para o ESP e perfis do tipo “ buraco” .....	89
Tabela 5.8 – Resultados para o ESP e perfis do tipo “elevação” .....	90
Tabela 5.9 – Resultados para o ESP e perfis senoidais simples.....	91
Tabela 5.10 – Resultados para o ESP e perfis senoidais compostos .....	92
Tabela 5.11 – Coeficientes calculados para expressão dada pela regressão linear múltipla.....	94
Tabela 5.12 – Correlação entre variáveis .....	94
Tabela 5.13 – Determinação de grau de confiabilidade da expressão dada pela Equação(5.9).....	95
Tabela 5.14 – Correlação entre variáveis .....	96
Tabela 5.15 – Determinação de grau de confiabilidade da expressão acima.....	96
Tabela 6.1- Forças dinâmicas máximas para os perfis Buraco e Elevação .....	99
Tabela 6.2 - Forças dinâmicas máximas para os perfis Seno 1.....	100
Tabela 6.3 - Forças dinâmicas máximas para os perfis Seno 2.....	101
Tabela 6.4 - Parâmetros utilizados nas análises de elementos finitos.....	106
Tabela 6.5- Parâmetros utilizados nas análises via MEF, perfis “Buraco” e “Elevação” .....	116
Tabela 6.6 - Parâmetros utilizados nas análises via MEF, perfis Seno1 ondas longas .....	117
Tabela 6.7- Parâmetros utilizados nas análises via MEF, perfis “Seno 2” .....	118
Tabela 6.8- Número máximo de passadas sobre perfis Buraco e Elevação .....	120
Tabela 6.9 - Número máximo de passadas para carregamentos sobre perfis Seno 1 .....	121
Tabela 6.10 - Número máximo de passadas para carregamentos sobre perfis Seno 2 .....	122
Tabela 6.11- Número máximo de passadas para carregamentos sobre perfis Buraco e Elevação ....	123
Tabela 6.12 - Número máximo de passadas para carregamentos sobre perfis Seno 1 .....	124
Tabela 6.13 - Número máximo de passadas para carregamentos sobre perfis Seno 2 .....	125

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\nu$  coeficiente de Poisson

$\xi_n, \xi_m$  taxas de amortecimento

$\dot{z}_s$  velocidade da massa amortecida

$\dot{z}_u$  velocidade da massa não amortecida

$\bar{\mathbf{F}}_0$  vetor carregamento

$\ddot{\mathbf{u}}_n$  aceleração no tempo presente

$\dot{\mathbf{u}}_n$  velocidade no tempo presente

$\ddot{\mathbf{u}}_{n+1}$  aceleração no tempo futuro

$\dot{\mathbf{u}}_{n+1}$  velocidade no tempo futuro

$b_x$  força de massa na direção x

$b_y$  força de massa na direção y

$b_z$  força de massa na direção z

$c_s$  amortecimento

$f_1$  e  $f_2$  constantes aplicadas para determinação de  $N_d$

$F_{dm}$  força dinâmica vertical máxima

$F_e$  força vertical estática

$k_1, k_2, k_3$  constantes de fadiga

$k_s$  rigidez das molas da suspensão

$k_u$  rigidez do pneu

$m_s$  massa amortecida

$m_u$  massa não amortecida

$N_d$  número de passadas máximo de veículo padrão para deformação limite do subleito

$N_{d\_da}$  deformação limite do subleito sob carregamento dinâmico amortecido

$N_{d\_dn}$  deformação limite do subleito sob carregamento dinâmico não amortecido

$N_{d\_est}$  deformação limite do subleito para carregamento estático  
 $N_f$  número máximo de passadas de um veículo padrão sobre o revestimento  
 $N_{f\_da}$  vida de fadiga do revestimento para carregamento dinâmico amortecido  
 $N_{f\_est}$  vida de fadiga do revestimento para carregamento estático  
 $N_{f\_dn}$  vida de fadiga do revestimento para carregamento dinâmico não amortecido  
 $n_{pi}$  número de passadas prevista para carga padrão  
 $s_s$  declividade da massa amortecida  
 $s_u$  declividade da massa não amortecida  
 $w_n, w_m$  frequências dos corpos  
 $z_r$  deformidades verticais da superfície do pavimento  
 $z_s$  deslocamento da massa amortecida  
 $z_u$  deslocamento da massa não amortecida  
 $\alpha_m, \alpha_k$  constantes de amortecimento aplicados às matrizes **M** e **C**  
 $\beta_1, \beta_2$  coeficientes de Newmark  
 $\Gamma_d$  condição de contorno deslocamentos impostos  
 $\Gamma_t$  condição de contorno forças impostas  
 $\epsilon_c$  deformação vertical de compressão sobre o pavimento  
 $\epsilon_t$  deformação de tração  
 $\epsilon_x$  deformação horizontal na base do revestimento para carregamento dinâmico  
 $\epsilon_{xd}$  deformação horizontal no revestimento para camada de revestimento amortecida  
 $\epsilon_{xest.}$  deformação horizontal na base do revestimento para carregamento estático  
 $\epsilon_y$  deformação vertical do subleito para o carregamento dinâmico  
 $\epsilon_{yd}$  deformação vertical do subleito para camada de revestimento amortecida  
 $\epsilon_{yest.}$  deformação vertical do subleito para carregamento estático  
 $N_u$  matriz de interpolação  
 $N_w$  matriz com os valores das funções de ponderação  
 $\ddot{\mathbf{a}}$  vetor de aceleração no ponto  
 $\dot{\mathbf{a}}$  vetor velocidade no ponto  
 $\bar{\mathbf{d}}$  deslocamentos prescritos

$\mathbf{f}_a$  forças de inércia  
 $\mathbf{f}_c$  força resistiva ou de arraste  
 $\mathbf{u}_n$  deslocamento no tempo presente  
 $\mathbf{u}_{n+1}$  deslocamento no tempo futuro  
 $\sigma_x$  tensões do tensor de tensões que atuem na direção x  
 $\sigma_y$  tensões do tensor de tensões que atuem na direção y  
 $\sigma_z$  tensões do tensor de tensões que atuem na direção z  
[F] unidade de força  
[L] grandeza comprimento  
[M] unidade de massa  
[T] unidade de tempo  
 $\mathcal{E}$  operador divergente  
A amplitude  
a raio da área de contato pneu-pavimento  
c amortecimento da massa  
C,  $\lambda$  comprimento de onda  
 $\mathbf{d}$  vetor de deslocamentos  
E módulo de elasticidade  
 $\mathbf{F}$  vetor de forças externas obtido da soma dos vetores de forças nodais  
h espessura constante  
IRI Índice internacional de irregularidade  
 $\mathbf{K}$  matriz de rigidez do esqueleto sólido  
k rigidez da mola  
L comprimento do perfil longitudinal  
m massa do corpo  
Mr módulo de resiliência  
 $\mathbf{n}$  vetor normal ao contorno  
q pressão interna do pneu  
 $q_{\max}$  valor da pressão máxima

**RI** índice de irregularidade

**RI\*** índice de irregularidade para velocidades diferentes de 80km/h

**u** vetor de deslocamentos nodais do elemento

**V** velocidade de tráfego de veículo

**x** deslocamento da massa

**r** condições de contorno

**$\Delta t$**  incremento de tempo

**$\rho$**  peso específico

**$\sigma_y$**  tensão vertical em y

**B** matrix de formação deslocamento

**C** matriz de amortecimento

**D** matriz 6x6 de módulos de rigidez

**M** matriz de massa

**b** vetor de forças de massa

**t** vetor de forças de superfície

**w** vetor de funções peso

**$\nabla$**  operador gradiente

**$\epsilon$**  vetor de deformações

**$\mu$**  matriz de coeficientes de viscosidades

**$\sigma$**  tensor de tensões na notação de Voigt

**$\sigma_x$**  tensão atuante na fibra inferior do revestimento

# Capítulo 1

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas dinâmicos são aqueles em que uma estrutura é submetida à excitação de diferentes formas e magnitudes em um curto intervalo de tempo. Nesse caso, o carregamento pode assumir diferentes formas, como exemplo, tem-se o carregamento repetitivo, de mesma intensidade e frequência, denominada como cíclico. Outro exemplo é a carga instantânea, pontual, denominada de carga de impacto. Quando comparado à sollicitação estática, aquela que não tem alteração de magnitude ao longo de um intervalo de tempo curto ou instantâneo, a dinâmica possui peculiaridades, como as variações de intensidade da carga, que podem gerar alterações no comportamento da estrutura, ocasionando possíveis efeitos destrutivos.

São vários os exemplos de sollicitações dinâmicas, das quais algumas são consideradas destrutivas e outras não. O movimento de cordas de uma guitarra, o movimento das asas de um avião durante um voo, a vibração das camadas de um pavimento sob tráfego de veículos, a vibração de um edifício sob ação da carga de vento e a vibração de uma estrutura "offshore" sob o efeito das ondas do mar são alguns exemplos dessas sollicitações.

Observa-se, portanto, a importância do estudo de sistemas dinâmicos para diversas ciências, como a física, matemática e engenharias. Este trabalho foi realizado com vistas ao estudo dos efeitos das cargas dinâmicas sobre estrutura de pavimento asfáltico, portanto, no âmbito da Engenharia Geotécnica.

### 1.1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar, comparativamente, o comportamento estrutural do pavimento, diante do carregamento estático e dinâmico, com o intuito de computar o estado de tensão-deformação do pavimento quando submetido a cada um dos dois tipos de carregamento. Assim, a partir dos resultados alcançados, é possível avaliar a longevidade do pavimento sob os dois tipos de carregamento.

## 1.2. RELEVÂNCIA

A malha rodoviária brasileira onde se constroem diariamente novas rodovias e executam-se manutenções utiliza-se de metodologia de dimensionamento de pavimentos que a carga atuante é considerada estática ou dinâmica por meio de um fator. Nesse contexto, este estudo tem uma proposta inovadora, pois aqui se avalia a resistência do pavimento submetido à solicitação verdadeiramente dinâmica, admitindo também no cálculo da força dinâmica os defeitos do revestimento asfáltico ao longo do perfil longitudinal.

Diante disso, esta pesquisa torna-se relevante com a proposição de nova metodologia que admita o carregamento dinâmico e os defeitos inerentes ao processo de fabricação ou ao desgaste precoce no dimensionamento do pavimento como sendo o objetivo específico desta pesquisa.

## 1.3. HIPÓTESE

Esta tese foi concebida sobre a hipótese de que ao simular o pavimento asfáltico sob o carregamento dinâmico, admitindo-se que ele possua irregularidades longitudinais, os resultados apontariam para a sua deterioração mais precoce que quando comparada à simulação em que o carregamento é estático. Para isso, foi necessário considerar a atuação das irregularidades longitudinais do pavimento como condição inicial do problema, pois por meio delas os efeitos causados pela ação da carga móvel são magnificados.

Para o teste dessa hipótese necessita-se que seja elaborada uma nova metodologia para dimensionamento de pavimentos, considerando inicialmente o carregamento sobre o pavimento dinâmico, irregularidades no pavimento e diferentes velocidades de tráfego dos veículos sobre a pista.

A partir da nova metodologia desenvolvida, utiliza-se de todo arcabouço teórico que envolve o problema, das equações que regem o fenômeno, de métodos numéricos capazes de resolvê-las e das condições de contorno admitidas para o problema. Assim, têm-se os valores da força de contato pneu-pavimento. Logo, é possível calcular para as camadas do pavimento o estado de tensão-deformação e assim avaliar a hipótese apresentada.

A hipótese elencada para esta tese avalia apenas a metodologia de dimensionamento do pavimento como condição de sua longevidade. Entretanto, destaca-se que o dimensionamento é apenas um dos fatores que acelera danos precoces ao pavimento. Problemas no processo

executivo, falta de obras complementares, como obra de drenagem, baixa qualidade nas ações de gerenciamento dos pavimentos, fiscalização precária dos carregamentos dos veículos comerciais sobre a pista, também tem grande peso na deterioração dos pavimentos, portanto, devem ser estudados em outras pesquisas.

#### **1.4. ORGANIZAÇÃO DA TESE**

Esta tese foi organizada em oito capítulos com o intuito de concatenar ideias de forma ordenada, possibilitando ao leitor entender a relevância do tema, assim como os conceitos e ferramentas utilizados para obtenção dos resultados dos danos ao pavimento mediante ao uso do carregamento dinâmico.

No capítulo 1 introduz-se o tema pesquisado e sua relevância, a hipótese que deu início à pesquisa e a forma com que a tese é organizada.

O capítulo 2 mostra os principais autores e os trabalhos que nortearam esta pesquisa. São apresentados as linhas de pesquisa e alguns resultados de trabalhos correlatos, os quais foram imprescindíveis para o desenvolvimento deste estudo. Apresentam-se os principais métodos utilizados para o dimensionamento de pavimento asfáltico, o conceito de fadiga, de irregularidade longitudinal dos pavimentos e por fim são descritos alguns conceitos e pesquisas sobre carregamento dinâmico atuante sobre o pavimento.

Fundamentos teóricos são apresentados no capítulo 3. Destaca-se nesse capítulo a apresentação do novo método de dimensionamento de pavimento asfáltico, os fundamentos da dinâmica, a definição do sistema quarter-car, a apresentação do método dos elementos finitos, com vistas ao problema do tipo equilíbrio dinâmico. Apresentaram-se também os esquemas de solução das equações diferenciais da dinâmica usados nesta pesquisa e alguns resultados apresentados por outros pesquisadores.

O capítulo 4 se dedicou a apresentar as ferramentas numéricas utilizadas nesta pesquisa e suas respectivas validações. Trata-se do programa comercial em que foi simulado o sistema quarter-car e quarter-truck, Simulink. O sistema desenvolvido no Simulink foi validado por modelo de outros autores e pelo programa comercial Adams/View. Outro programa utilizado nesta tese foi o Mechsys, que faz uso de métodos numérico para solução de problemas de engenharia, dentre eles o método dos elementos finitos, capaz de resolver as equações que regem diversos problemas como o de equilíbrio dinâmico. Ele foi validado, por meio de resultados amplamente divulgados na bibliografia.

No capítulo 5 são realizadas as simulações utilizando o Simulink. Para isso, foram apresentados os parâmetros utilizados, o sistema de blocos montado passo a passo e por fim os resultados para diversas combinações de velocidade, tipo de perfil e diferentes defeitos. Os resultados são as cargas pneu-pavimento geradas devido à passagem do carregamento móvel sobre os defeitos.

A análise numérica dos pavimentos e seus resultados, realizados pelo método dos elementos finitos, são apresentados no capítulo 6. São usados os resultados obtidos no capítulo 5 como dados de entrada do problema. O problema é montado para um pavimento típico, composto de revestimento asfáltico, base e subleito. São realizadas as análises, nas quais se aplicam as condições de contorno, incluindo o carregamento dinâmico calculado no capítulo 5. Das análises são apresentados os resultados de deformação e tensão nos pontos de interesse e a partir desses valores são calculadas as vidas de fadiga para cada caso. Esses valores são comparados aos resultados quando se admite o carregamento estático.

O capítulo 7 apresenta as conclusões desta pesquisa e as sugestões para pesquisas futuras que podem abranger o método criado para outros problemas de engenharia. O último capítulo, 8, apresenta as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

# Capítulo 2

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os trabalhos que nortearam esta pesquisa no que tange aos critérios necessários para o dimensionamento das espessuras das camadas de um pavimento asfáltico seja mais realista, portanto, considerar os defeitos inerentes do processo construtivo dos pavimentos, e os efeitos produzidos pelo carregamento dinâmico. A ideia é esclarecer que, fazendo-se uso dos conceitos de dinâmica, é possível avaliar melhor os efeitos dos esforços que ocorrem em decorrência do movimento de veículos sobre um pavimento irregular. Assim, diante das teorias apresentadas, é possível avaliar criticamente as principais metodologias de dimensionamento de pavimento. A partir das críticas aos procedimentos para dimensionamento admitidos atualmente, é possível sugerir tópicos que podem melhorar as técnicas atuais.

Os trabalhos aqui apresentados trazem conceitos de modelos de dimensionamento de pavimento asfáltico aplicados atualmente no Brasil. Esse tema é abordado de forma sucinta devido à vasta bibliografia existente sobre o tema. Em seguida, os conceitos relativos ao método de dimensionamento mecanicista-empírico, à fadiga, à irregularidade de pavimentos serão descritos de forma que se esclareça a sua importância no dimensionamento de pavimentos rodoviários.

Por fim são descritas nesse capítulo as pesquisas que envolvem o cálculo das forças dinâmicas atuantes sobre o pavimento.

### 2.1. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO

Os métodos de dimensionamento de pavimento flexível podem ser classificados, segundo Huang (2004), em cinco categorias descritas a seguir: método empírico, método de resistência ao cisalhamento, método das deflexões, método de regressão baseado no desempenho do

pavimento e o quinto método, mecanicista-empírico, que será apresentado no tópico 2.1.1, dada a sua maior relevância a esta pesquisa.

**1. Método Empírico:** é oriundo da observação da evolução da condição dos pavimentos, sendo os parâmetros medidos em campo tabulados e associados a grandezas como a repetição de cargas e a resistência dos materiais. Suas expressões mais conhecidas são os métodos relacionados com o Índice de Suporte Califórnia-ISC (ou *California Bearing Ratio-CBR*, em inglês), em que a espessura das camadas é dada a partir do valor de CBR, sendo ele empregado por agências federais, estaduais e municipais no Brasil. Outro critério é o utilizado pela American Association of State Highway and Transportation Officials de 1993, oriundo da AASHO Road Test. Os critérios empíricos têm campo de aplicação limitado, uma vez que sua reprodutibilidade é restrita a áreas que apresentam condições naturais e materiais relativamente semelhantes às condições da área a qual foi alvo de experimentação observacional (Balbo, 2007).

**2. Método de resistência ao cisalhamento:** é dado pelo ensaio de resistência ao cisalhamento e é usado para determinar a espessura do pavimento suficiente para que ele não sofra ruptura ao cisalhamento em virtude da solicitação do tráfego. Assim, as principais características das camadas do pavimento a serem avaliadas são a coesão e o ângulo do atrito do material. Esse modelo, em virtude das novas preocupações no dimensionamento de pavimento, foi posto de lado, já que o mesmo não privilegia outras características, como conforto do usuário (Huang, 2004).

**3. Método das deflexões:** usado para determinar a espessura do pavimento de forma que os deslocamentos verticais não ultrapassem os valores descritos em norma. Kansas State Highway (1947) utilizou as equações de Boussinesque e limitou a deflexão máxima do subleito em 2,54mm. A U.S. Navy (1953) aplicou a formulação Burmister e limitou as deflexões do topo do pavimento em 6.35mm. O uso de deflexões como critério de dimensionamento tem aparente vantagem, pois pode ser medido em campo. Porém as causas da ruptura são diretamente relacionadas com altos valores de tensão ou deformações excessivas, não por deflexões (Huang, 2004).

**4. Método de regressão:** baseado no desempenho do pavimento que tem como principal exemplo o modelo AASHTO (1993), o qual se baseia em resultados do tráfego em pistas experimentais. Esse método possui a desvantagem de que as equações advindas dos bancos de dados disponíveis só podem ser usadas em pista cujas condições são similares às das pistas de

origem, portanto, esse modelo possui limitações devido às várias incertezas quanto às características do pavimento (Huang, 2004). A seguir apresentam-se os conceitos do método descrito como mecanicista-empírico, que é utilizado nessa tese.

### 2.1.1. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANICISTA-EMPÍRICO

No item anterior foram descritos alguns métodos de dimensionamento históricos, destacando seus principais conceitos, aplicações e as suas limitações. Aqui apresenta-se com destaque um método de dimensionamento mais abrangente que os demais, o qual é denominado mecanicista-empírico. Desse partem as diretrizes para a criação de método desenvolvido ao longo desta pesquisa.

Os critérios de dimensionamento fundamentados no método CBR, de natureza empírica, e na perda de serventia, de natureza empírica, não consideram, de maneira explícita, o fato de camadas de revestimento asfáltico, base e sub-base trabalharem sob tensão que geram esforços, predominantes de tração, em algumas regiões, como na fibra inferior da camada de revestimento coesivo e tensões predominantemente de compressão no topo do subleito sob a linha de centro do carregamento. Portanto, é necessário que um método baseado em conceitos mecânicos considere diferentes possibilidades de ruptura, como incluindo a fadiga do revestimento e o acúmulo de deformações permanentes no subleito do pavimento. O conceito de fadiga é detalhado adiante. A seguir apresenta-se a definição do método mecanicista-empírico.

**5. Método mecanicista-empírico:** é um método baseado na mecânica dos materiais, que estuda o comportamento do material quanto à resistência mecânica, deformação e quanto à estabilidade. Ressalta-se que o termo empírico utilizado para denominar o método mecanicista-empírico representa muito mais o caráter evolutivo do método, que surgiu posteriormente aos métodos predominantes empíricos, do que de fato o empirismo do método, uma vez que o método em questão é baseado na mecânica dos materiais e não em empirismo. Portanto, dado o carregamento atuante sobre o pavimento, são calculados os esforços internos e as deformações geradas nas camadas do pavimento. Assim, conhecendo-se o estado de tensão e deformação, é possível prever as deformações máximas atuantes e o colapso do pavimento, caso sejam previamente definidos os limites dos materiais, dados pelos ensaios de laboratório e de campo. Outra etapa necessária a qualquer método ou modelo idealizado é sua validação empírica por meio de observações em campo do desempenho do pavimento, pois a teoria por si só não é capaz de validar o modelo (Huang, 2004).

O método mecanicista-empírico pode ser entendido como a evolução dos métodos apresentados no tópico anterior. Um dos trabalhos pioneiros nesse sentido foi a pesquisa de Kekhoven e Dormon (1953) que sugeriram pela primeira vez o uso da deformação vertical na superfície do subleito como critério de ruptura. Outro exemplo é a pesquisa de Saal e Pell (1960) que, para reduzir a deformação permanente no pavimento, recomendavam o uso da tensão e deformação horizontal na base da camada asfáltica para minimizar a ruptura por fadiga. Essas pesquisas formam a base histórica do método mecanicista-empírico (Huang, 2004).

O uso de tensão de compressão vertical para controlar a deformação permanente é baseado no fato de que deformações plásticas são proporcionais ao nível de tensão desvio cíclica ( $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ ) em materiais de pavimentação. Logo, quanto mais próximo da ruptura for a ciclagem, maior é o acúmulo de deformação permanente ou plástica (Huang, 2004).

Assim, ao limitar as tensões verticais, de compressão, sobre o subleito a uma faixa onde este material se comporte de modo aproximadamente elástico, as tensões em outros componentes acima do subleito também são controladas. Se as tensões forem suficientemente abaixo do nível de ruptura estático, em torno de 50%, os materiais tendem a se acomodar e a exibir um comportamento basicamente elástico ou resiliente, após acumular deformações plásticas sob certo número de ciclos de carregamento, o que caracteriza o fenômeno conhecido como “shakedown”, em inglês. Portanto, a magnitude da deformação permanente na superfície do pavimento será controlada indiretamente, já que cada camada é responsável por uma parcela do deslocamento total no topo do pavimento. Entretanto, é preponderante limitar os valores de tensão sobre o subleito, pois dessa camada decorre a maior deformação, uma vez que o subleito é uma camada muito espessa em relação às demais.

Estes dois critérios (fadiga do revestimento e deformações plásticas do subleito), que são a base do método mecanicista, foram apresentados pelo Shell International Petroleum (Claussen *et al.*, 1977) e pelo Asphalt Institute (Shook *et al.*, 1982) em seus métodos de dimensionamento mecanicistas-empíricos. A vantagem dos métodos mecanicistas são a melhoria na confiabilidade do projeto e a capacidade de prever os tipos de solicitações e deformações (Huang, 2004).

Assim, o aperfeiçoamento de modelos de dimensionamento de pavimento flexível tem avançado em técnica, pelo desenvolvimento de novas teorias que melhor se aplicam às condições locais dos materiais e por meio do desenvolvimento de ferramentas computacionais

de dimensionamento. As ferramentas computacionais auxiliam o projetista a dimensionar o pavimento considerando diversos fatores relevantes para a previsão de manutenção e segurança do pavimento, introduzindo inclusive os efeitos do carregamento dinâmico atuante sobre o pavimento. Breves evoluções do estudo desses itens, incluindo algumas ferramentas computacionais, são descritas a seguir.

Vários programas computacionais vêm sendo desenvolvidos com base nos modelos descritos anteriormente considerando diferentes configurações de pavimento. A Tabela 2.1 mostra alguns dos programas desenvolvidos citados na literatura específica de pavimentação rodoviária.

Tabela 2.1 – Programas computacionais desenvolvidos para dimensionamento de pavimento

PROGRAMA	DESENVOLVEDOR	APLICAÇÃO
CHEV	Warren e Diekmann, 1963	Materiais lineares elásticos.
DAMA	Hwang e Witczak, 1979	Materiais granulares de comportamento não-linear.
ELSYM5	Kopperman <i>et al.</i> , 1986	Materiais elásticos com até 5 camadas e carregamentos múltiplos.
PDMAP	Finn <i>et al.</i> , 1986	Prevê a ruptura por fadiga e afundamento no pavimento asfáltico.
MEPDG	National Cooperative Highway Research Program, 1998	O dimensionamento é baseado no acúmulo de dano em função do tempo e do tráfego de caminhões sobre a pista.

Os métodos baseados na abordagem empírico-mecanicista servem para dimensionar pavimentos do ponto de vista estrutural, ou seja, de modo a suportar as cargas do tráfego e as influências ambientais ao longo da vida útil de projeto. Entretanto, há outros aspectos relevantes para manutenção e segurança de um pavimento que não podem ser previstos por meio de análises mecânicas ou tensionais. Esses aspectos dizem respeito à evolução de patologias ou defeitos que se manifestam na superfície do pavimento e que afetam o conforto ao rolamento dos usuários, além de acelerar a degradação da estrutura. O comportamento do

pavimento em serviço está relacionado ao conceito de desempenho que se traduz na evolução temporal de um índice de qualidade, chamado genericamente de “serventia”, cuja determinação é objeto do que se chama de “avaliação funcional” do pavimento.

A avaliação funcional pode ser subjetiva ou objetiva, dependendo das necessidades de planejamento em nível de rede ou de projeto. A avaliação subjetiva procura definir uma escala arbitrária qualitativa para a situação atual da superfície do pavimento. Dentro dessa linha de ideias foi que surgiu, durante a realização dos experimentos históricos da AASHO na década 1960, o conceito de serventia materializado em um valor numérico chamado de *Present Serviceability Ratio* (PSR, em inglês) e traduzido no Brasil como Valor de Serventia Atual (VSA). O Valor de Serventia Atual é baseado em uma escala qualitativa e obtido com base na opinião de usuários treinados para este fim. Sobre essa escala de opiniões foi associada uma escala numérica variando de 0 a 5, em que 0 indica um pavimento totalmente destruído ou inaceitável e 5 seria o valor correspondente a um pavimento perfeito. Definida a escala, foram desenvolvidos ensaios para a medida de certas características julgadas associadas ao comportamento do pavimento e que, combinadas adequadamente por meio de uma Equação experimental, fornecessem o índice numérico correspondente à escala de opinião.

Carey e Irick (1960) desenvolveram o conceito de desempenho de manutenção do pavimento e indicaram que a espessura do pavimento deve depender também do índice de serventia exigido. Lemer e Moavenzadeh (1971) apresentaram o conceito de confiabilidade como um fator de projeto do pavimento com bases probabilísticas e também um programa de computador chamado VESYS foi desenvolvido para analisar sistemas de até três camadas do pavimento viscoelástico (Moavenzadeh *et al.*, 1974). Esse programa, que incorporou os conceitos de manutenção e segurança, foi modificado pela Federal Highway Administration (FHWA, 1978; Kenis, 1977) e várias versões do programa VESYS foram desenvolvidas (Lai, 1977; Rauhut e Jordahl, 1979; Von Quintus *et al.*, 1980; Jordahl e Rauhut, 1983; Brademeyer, 1988). O conceito de confiabilidade foi também incorporado no Texas Flexible Pavement Design System (Darter *et al.*, 1973b) e na AASHTO Design Guide (AASHTO, 1986), (Huang, 2004).

A Figura 2.1 apresenta uma idealização de defeito do Índice de Serventia, em que se supõe uma queda de 40% no índice de qualidade do pavimento, após consumir 75% de sua vida útil planejada (IPR-745, DNIT, 2011). O Índice de Serventia cairia mais 40% decorrido mais 17% de vida útil do pavimento, totalizando 80% da perda de qualidade do pavimento após ter

transcorrido 92% do tempo de vida estimada do pavimento. A Figura 2.1 explica que, ao se deixar de aplicar um dado valor na época certa, com Índice de Serventia de aproximadamente 3, é necessário um investimento até quatro vezes maior para recuperar a qualidade do pavimento após uma grande perda de serventia (Índice de Serventia menor do que 1). Essa abordagem, dada pela AASHO (1993), é utilizada por vários autores que estudam o gerenciamento de pavimentos e pode ser encontrada no manual de gerenciamento de pavimentos do DNIT, descrito como IPR-745 (DNIT, 2011). Segundo Fresar (2009), estudo do Banco Mundial indica que cada dólar investido na manutenção de uma rodovia até os primeiros 40% de queda no índice de serventia resulta na economia de 3 a 4 dólares, em comparação do investimento necessário para a recuperação do pavimento em que ocorreu queda do índice de serventia entre 40% e 80%.

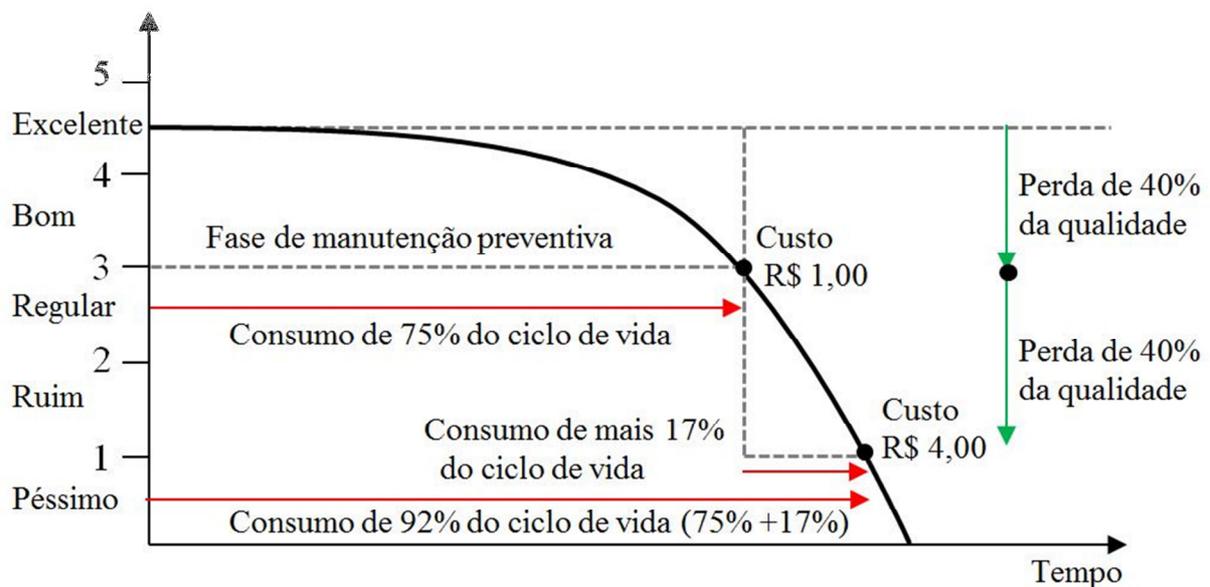


Figura 2.1 – Variação do Índice de Serventia (DNIT, 2011)

Os métodos subjetivos são rápidos e baratos e se aplicam para avaliações em larga escala, em nível de rede ou malha rodoviária, tendo como principal objetivo fornecer subsídios para gestores tomarem decisões sobre o planejamento da manutenção. Entretanto, métodos subjetivos não permitem decisões de projeto de recuperação. Nestes casos, a serventia do pavimento pode ser mais claramente definida com a adoção de métodos e índices objetivos, baseados em variáveis diretamente mensuráveis no campo. Esta é a abordagem mais adequada quando se deseja definir soluções de engenharia, como o cálculo de reforço de revestimentos, isto é, para análises em nível de projeto. Atualmente há vários métodos objetivos que caracterizam o estado atual ou qualidade da superfície do pavimento do ponto de vista

funcional com base em uma série de levantamentos de defeitos e ensaios de campo. Os ensaios utilizados ou as medidas efetuadas dizem respeito principalmente à irregularidade longitudinal, intensidade de trincamento e a profundidade média das trilhas observada nas trilhas de rodas. Dependendo do tipo de recuperação a ser feita, a avaliação funcional deve ser complementada por avaliações estruturais, as quais geralmente são feitas com base nas deflexões medidas as quais podem ser geradas por carregamentos estáticos e medidas por Viga Benkelman, ou para carregamentos dinâmicos, aferidas por equipamentos do tipo FWD.

Todos os métodos discutidos até agora são baseados em carregamento estático. Assim, os efeitos de carregamentos dinâmicos sobre o pavimento não são considerados. Ao se considerar a carga de impacto decorrente da passagem de veículos leves e pesados sobre superfícies irregulares, tem-se efeito de magnificação das solicitações por forças de inércia, fato que deve ser considerado ao se dimensionar um pavimento. Atualmente estes efeitos têm sido considerados indiretamente, ainda utilizando análises estáticas, mas aplicando-se fatores de impacto pré-estabelecidos em normas para majorar as cargas externas. 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 (Barbosa, 1999).

Já a American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO, 1980) fornece em suas especificações valores Tab.dos para coeficientes de impacto, os quais resultaram de uma análise por elementos finitos, desenvolvida por Shore e Rabizadeh (1974). No Brasil têm sido utilizadas as especificações da AASHTO, com um pequeno número de pesquisas voltadas para a análise das consequências desse procedimento.

Barbosa (1999) explica em seu trabalho que as modificações introduzidas por Chen (1987) apud Zafir *et al.* (1994) 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 ( Chatti et al, 1995; Ullidtz, 1988).

A pesquisa de Barbosa (1999) buscou avaliar os efeitos do carregamento dinâmico sobre o pavimento por meio de análise numérica, pois considerou o fato de que as pesquisas anteriores basearam-se em métodos teóricos e experimentais para determinação das cargas atuantes no pavimento devido a solicitações dinâmicas. Nessa pesquisa utilizou-se da versão inicial de um grupo integrado de ferramentas computacionais para a simulação e análise de ações provocadas por veículos de carga, denominado de TruckSim.

Os resultados dessa pesquisa apresentaram várias relações entre cargas estática e dinâmica considerando diferentes irregularidades longitudinais, como buracos na pista ou desníveis no encabeçamento de pontes, concluindo-se que os fatores aplicados em normas técnicas nem sempre representam a realidade.

### **2.1.2. ESTUDO DA RESISTÊNCIA À FADIGA**

O estudo da fadiga, comentada no tópico anterior, é de fundamental importância nesta tese e será abordado em maiores detalhes no capítulo 3. Por esta razão introduz-se aqui apenas os conceitos básicos. Wöhler, engenheiro alemão, no século XIX, foi o primeiro a pesquisar o tema envolvendo fadiga do pavimento.

Em pavimentação, os revestimentos asfálticos sofrem tensões de tração resultantes das solicitações dos veículos sobre o pavimento. Embora esses esforços sejam menores que a tensão última de ruptura, o processo repetitivo causa degradações irreversíveis ao longo do tempo. Esse fenômeno é conhecido como fadiga. Segundo Tayebali *et al.* (1994), a resistência à fadiga das misturas asfálticas é a habilidade de suportar carregamentos repetidos à flexão sem que trincas se desenvolvam.

A fadiga de misturas asfálticas fica mais bem definida como sendo o processo no qual a repetição da deformação principal de tração resulta na redução da rigidez total causada pelas trincas que se desenvolvem no interior da mistura.

Basicamente existem dois tipos de trincas por fadiga em revestimento asfáltico: trincas iniciadas na base do revestimento e aquelas iniciadas no topo. Ambas derivam do estado de tensões aplicadas no pavimento, conforme apresentado pela Figura 2.2 e descrito a seguir.

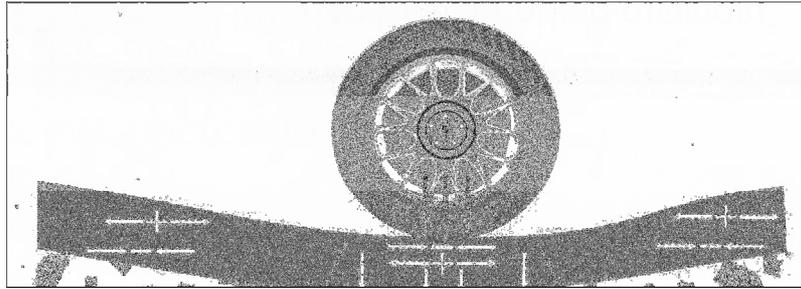


Figura 2.2 – Esforços do tráfego sobre o pavimento (BALBO, 2007)

As primeiras são conhecidas classicamente, no seu estado avançado, como trincas “couro de jacaré”. Com a repetição das solicitações advindas do tráfego e a contínua flexão do revestimento em condições acima de um determinado limite, a tensão/deformação de tração na base da camada irá causar a fadiga do material. As trincas se propagam através da camada asfáltica até atingir a superfície do pavimento, permitindo a entrada de água com o conseqüente colapso da estrutura como um todo. Esse tipo de trinca é e foi tratado por muito tempo como um dos principais defeitos nos pavimentos flexíveis (Mello, 2008).

Já as trincas conhecidas como “*top-downcracking*” nascem no topo do pavimento e se propagam para baixo através da camada, até atingir um limite. Pouco ainda se sabe sobre esse tipo de trinca, mas algumas questões podem ser consideradas de senso comum pela comunidade técnica. Nos pavimentos com revestimentos asfálticos espessos, onde pneus com pressões muito altas são comuns, pode-se observar altas concentrações de tensão no bordo do contato pneu-pavimento, possibilitando o aparecimento de trincas longitudinais que se propagam para baixo. O enrijecimento do ligante asfáltico pela oxidação também pode contribuir para a aceleração do processo (Mello, 2008).

Existem ainda estudos que mostram que, ao invés de as trincas iniciarem na base ou no topo da camada asfáltica, elas podem ter início no meio da camada, sendo conhecidas como “*middle-up cracks*” (Al-Qadi 2007). Essa região experimenta altos esforços de tensão cisalhante, podendo ultrapassar os limites críticos de resistência da mistura asfáltica e iniciar uma trinca que se propagará até a superfície.

Molenaar (2007) apresenta um estudo interessante sobre o desenvolvimento de trincas em pavimentos flexíveis. O trabalho baseou-se em dados obtidos em uma pista experimental onde foram feitos estudos com um simulador de tráfego. O autor observou que parte das trincas visíveis na superfície do pavimento estava presente apenas na parte superior do revestimento, enquanto outras iniciavam na base do mesmo. Mais ainda, amostras obtidas na pista

mostravam que a base do revestimento estava desintegrada ao redor dos pontos abaixo da trilha de roda. Essas observações levaram o autor a refletir sobre as reais suposições usualmente feitas em relação à propagação das trincas nos pavimentos flexíveis. Molenaar (2007) observou que, para uma rigidez retro calculada igual a 50% da inicial, 20% da área da superfície apresentava trincas. É importante ressaltar, todavia, que grande parte dessas trincas era superficial, necessitando, assim, reformular a hipótese de que as trincas iniciadas na base são predominantes nos revestimentos asfálticos. Nesse estudo o autor relata que em casos onde o revestimento apresenta-se relativamente com alta rigidez à flexão, trincas iniciadas no topo são predominantes sobre aquelas iniciadas na base. O autor também concluiu que trincas de fadiga na base da camada asfáltica existem, porém mostram-se provavelmente em um formato diferente daquele caracterizado como uma trinca discreta.

## **2.2. IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

A irregularidade longitudinal é a diferença entre cotas teóricas e cotas reais do greide. Elas ocorrem durante o processo construtivo ou pelo uso da rodovia, e em alguns casos por uma combinação de ambos os fatores mencionados (Rio, 1999). A importância da avaliação da irregularidade superficial longitudinal quanto ao uso das vias vem sendo considerado desde 1960. A AASHO (American Association of State Highway Officials) realizou testes em rodovias quando se observou que 95% da manutenção em pavimento foram relativas exclusivamente à irregularidade superficial (Haas *et al.*, 1994). A irregularidade longitudinal tem o formato de ondas cujo comprimento varia de acordo com as deformações permanentes das camadas do pavimento quando submetido ao carregamento repetitivo, em virtude do tráfego de veículos. Elas são as principais fontes de excitação dinâmica sobre o pavimento e são responsáveis pela sensação de desconforto do usuário do veículo.

De acordo com DNER 164/94, a irregularidade longitudinal de um pavimento é o desvio da superfície rodoviária, em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade do rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via. AASTM E 867-82 acrescenta também os efeitos sobre a drenagem.

Diante das definições apresentadas fica claro que a irregularidade de pavimentos nada mais é que defeito na superfície do pavimento. Esse defeito pode ser decorrente de diversos fatores, como afundamento do subleito que gera trilhas de roda na superfície do pavimento ou problemas executivos que provocam desníveis na superfície do pavimento. O fato é que diante das irregularidades têm-se consequências quanto ao conforto do usuário ao trafegar

sobre a pista, quanto à magnificação das cargas atuantes sobre o pavimento e problemas de drenagem das águas superficiais sobre o pavimento.

Os conceitos descritos acima estão diretamente relacionados com esta pesquisa, pois a partir do estudo das irregularidades de pavimentos, com vistas ao dimensionamento, novas condições de aplicação de carregamento sobre a pista de rolamento devem ser consideradas.

Os estudos das irregularidades do pavimento foram desenvolvidos em meados da década de 80. Estudos de campo que utilizam aparelhos chamados de inclinômetros foram desenvolvidos. Por meio destes é possível reproduzir as irregularidades percebidas no pavimento. Sayers *et al.*, (1986a) relatam que a irregularidade de pavimentos estava ganhando importância crescente como um indicador da condição da rodovia, tanto em termos de desempenho do pavimento, quanto como determinante dos custos operacionais e conforto do usuário.

Observou-se que os sistemas de medição das irregularidades desenvolvidos tinham capacidade de gerar resultado, tidos como suficientemente exatos e reprodutíveis para avaliação comparativa. Dessa maneira, faltaria apenas que tais medidas fossem correlacionadas com uma escala padrão para garantir comparabilidade e consistência das medições ao longo do tempo. Essa medida foi designada como IRI, ou índice internacional de irregularidade (*International Roughness Index*), que pode ser entendido como índice estatístico que resume os desvios de superfície para a pista.

Diante do perfil longitudinal é possível simular os efeitos da passagem de um veículo sobre ele. Diferentes simuladores foram desenvolvidos ao longo dos anos; o mais utilizado nas simulações é tipo quarto de carro. A Figura 2.3 mostra o sistema composto de duas partes: uma massa suspensa representando o corpo do veículo e uma massa sem amortecimento representa o conjunto de roda/pneu e meio eixo/suspensão. As variáveis são  $m_s$ , massa amortecida, que equivale à massa acima do chassi, já  $m_u$  ou massa não amortecida, é a massa equivalente ao eixo e pneus de um quarto de carro. Têm-se também as variáveis que representam os deslocamentos das massas amortecidas e não amortecidas,  $z_s$  e  $z_u$ , respectivamente, a rigidez das molas da suspensão,  $k_s$ , e do pneu,  $k_u$ , e o amortecimento  $c_s$ . Nesse modelo não se considera o amortecimento do pneu, pois admite-se que o valor utilizado seja desprezível diante do amortecimento  $c_s$ .

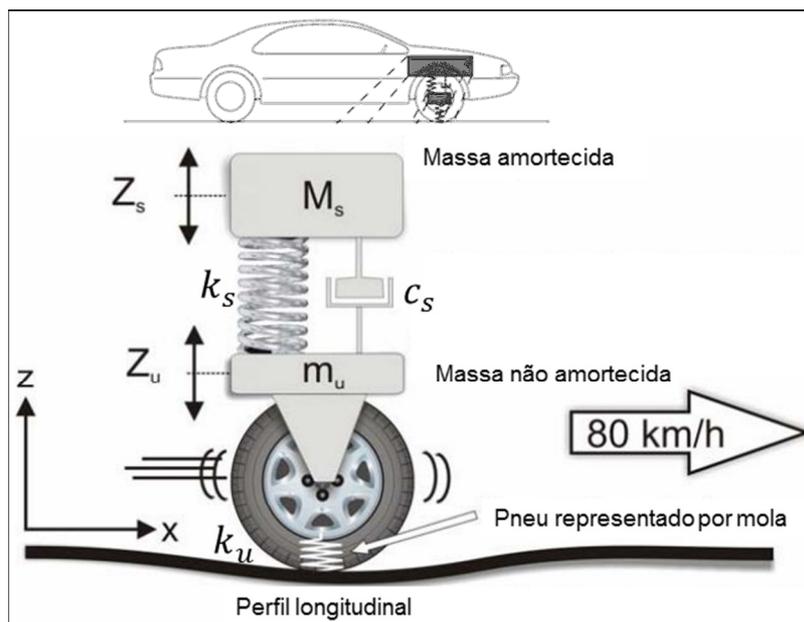


Figura 2.3 – Simulação tipo quarto de carro (Loizos e Plati, 2008)

Na simulação, o sistema quarto de carro trafega sobre um perfil longitudinal imaginário ou medido em campo à velocidade constante de 80 km/h. As irregularidades da superfície do pavimento geram sobre ele uma excitação dinâmica. Tem-se a partir daí velocidades verticais atuando sobre o veículo, ( $\dot{z}_s$ ,  $\dot{z}_u$ ) equivalentes às massas com e sem amortecimento, respectivamente. As velocidades são produzidas devido ao movimento relativo entre o chassi e o eixo do veículo imaginário.

Uma rodovia perfeitamente suave tem um *IRI* igual a zero, enquanto que em rodovias onde há severas irregularidades, o *IRI* tem valor aproximado de 6m/km, e em casos extremos de irregularidades, como uma estrada sem pavimento, o *IRI* tem valores acima de 20m/km. O valor de interferência para a manutenção dos pavimentos varia de acordo com os critérios de cada país. Por exemplo, os EUA admitem esse valor como 2,7 m/km, no Brasil, Chile, Uruguai e Espanha, 4,0 m/km e em Honduras, 6,0 m/km (Souza, 2002).

Tomando  $z_s$  e  $z_u$  no tempo, têm-se velocidades,  $\dot{z}_s$  e  $\dot{z}_u$ , de onde se calcula o valor do *IRI*, de acordo com a seguinte expressão:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |\dot{z}_s - \dot{z}_u| dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |s_{si} - s_{u,i}| \quad (2.1)$$

A integral na Equação (2.1) fornece o somatório dos valores absolutos dos deslocamentos verticais relativos entre a massa amortecida e a massa não amortecida durante um intervalo de

tempo ( $\Delta t=L/V$ ), necessário para que o quarto de carro percorra um segmento de teste de comprimento ( $L$ ) a uma velocidade constante ( $V=80$  km/m). O deslocamento relativo acumulado é então dividido pela distância percorrida ( $L$ ) e o IRI pode ser interpretado geometricamente como uma média retificada de uma declividade (imaginária), expressa geralmente em m/km. A expressão no lado direito da Equação(2.1) fornece uma forma alternativa de cálculo a partir das declividades ( $s_s$  e  $s_u$ ) das massas amortecida e não amortecida, calculadas para  $n$  pontos discretos ao longo do perfil. As velocidades, declividades e posições relativas das massas do quarto de carro são calculadas a partir das equações dinâmicas de movimento do sistema, tendo como entrada ou excitação o perfil real de irregularidades da superfície do pavimento. Ou seja, o sistema quarto-de-carro é apenas um filtro matemático que gera um novo perfil (imaginário) de posições, velocidades e declividades das massas do sistema a partir do perfil ou onda de irregularidade real da superfície.

Para aplicação da Equação (2.1) utilizam-se os parâmetros estudados por Gillespie *et al.*, (1980), os quais determinaram um veículo padrão, conhecido como Golden Car. Os estudos incluíram testes com 10 diferentes conjuntos de parâmetros e selecionaram aquele que produziu a melhor correlação com duas mais importantes frequências de ressonância de um veículo.

Os parâmetros determinados no veículo tipo *Golden Car* são apresentados na Tabela 2.2, em que se têm as massas,  $m_s$  e  $m_u$ , rigidez das molas,  $k_s$  e  $k_u$ , e amortecimento,  $c_s$ . Além desses parâmetros, o IRI é calculado considerando a velocidade do veículo de 80km/h.

Tabela 2.2 – Parâmetros usados no veículo tipo *Golden Car* (Rio, 1999)

Veículo	$m_s$ (kg)	$m_u$ (kg)	$k_s$ (N/m)	$k_u$ (N/m)	$c_s$ (N.s/m)
<i>Golden Car</i>	250,0	37,5	15.825,0	163.250,0	1.500,0

O valor de IRI pode ser usado na avaliação de pavimento quanto ao momento da sua recuperação, elaboração de projeto e para a liberação de uso da pista recém-executada.

### 2.3. ESTUDO DE CARREGAMENTO DINÂMICO EM PAVIMENTO ASFÁLTICO

Todos os carregamentos reais aplicados a um corpo variam de alguma forma ao longo do tempo. Em muitos casos, como na construção de aterros, estes carregamentos crescem

monotonicamente até atingir um valor máximo e constante, porém as cargas são aplicadas muito lentamente em relação à frequência de vibração natural do corpo, de modo que não são geradas acelerações significativas e o problema pode ser tratado de forma estática.

Entretanto, diversos carregamentos, como um objeto caindo sobre uma superfície, uma explosão ou um terremoto, são aplicados de forma rápida, gerando acelerações apreciáveis que só podem ser consideradas com base em uma análise dinâmica. Em outros casos, como veículos passando sucessivamente sobre um ponto de um pavimento sem muitas irregularidades, o carregamento é cíclico, mas as acelerações geradas no meio podem ser desprezadas e o problema é tratado como quasi-estático.

Estudos que contemplam problemas que admitem os carregamentos dos tipos estático, quasi-estático e dinâmico são frequentemente estudados em diversas ciências. Entretanto, aquelas que trabalham com carregamento quasi-estático e dinâmico são voltadas, em grande maioria, às demandas da engenharia mecânica e aeronáutica, tais como as pesquisas de Kim (1999), que estudou os efeitos da estrutura de suspensão na determinação de parâmetros; Andrade (2001) pesquisou o controle das suspensões a partir de redes neurais; Ferreira (2003) pesquisou os valores de frequências naturais e modos de vibração da suspensão de veículo para veículo de dois eixos; Antônio (2005) pesquisou o estudo da sobrecarga dinâmica em caminhões por meio de medições diretamente no veículo.

Em menor número têm-se pesquisas voltadas para o estudo dos efeitos do carregamento do tráfego de veículos sobre o pavimento. Gillespie (1992) pesquisou os fundamentos da dinâmica dos veículos. Göktan (1995) pesquisou os defeitos produzidos no pavimento devido à passagem de veículos pesados. Sayers (1997) apresentou em seu livro as informações básicas sobre a mensuração e interpretação de um perfil longitudinal dos pavimentos. Albano (1998) pesquisou os efeitos da variação da carga por eixo, pressão e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento.

Barbosa (1999) estudou os efeitos em um pavimento asfáltico submetido a carregamentos dinâmicos, com foco nos efeitos produzidos nas “cabeceiras” das pontes. Para o desenvolvimento dessa pesquisa foi utilizado o programa TruckSim e foram estudadas as irregularidades no pavimento submetidas ao carregamento de caminhão de eixo padrão simples, EPS, do tipo “toco”. Esse caminhão possui a seguinte configuração: dois eixos simples, sendo o traseiro de roda dupla e o dianteiro de roda simples. Sobre o eixo traseiro

admite-se carga estática de 82kN, distribuídos em quatro pneus calibrados a 560kPa, conforme Fig. 2.4.

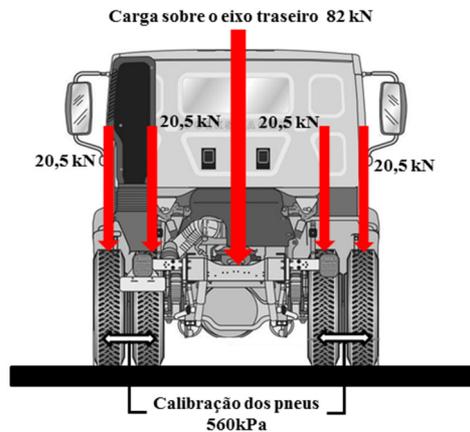


Figura 2.4 – Distribuição da carga sobre os pneus do eixo padrão

As Figura 2.5 e Figura 2.6 mostram os resultados das cargas verticais geradas por eixo em função do tempo, para o veículo de eixo padrão trafegando a uma velocidade de 90 km/h sobre um buraco ou “panela” com profundidade de 10 cm e sobre um desnível pavimento/ponte com altura de 10 cm. Os resultados foram comparados aos limites legais adotados.

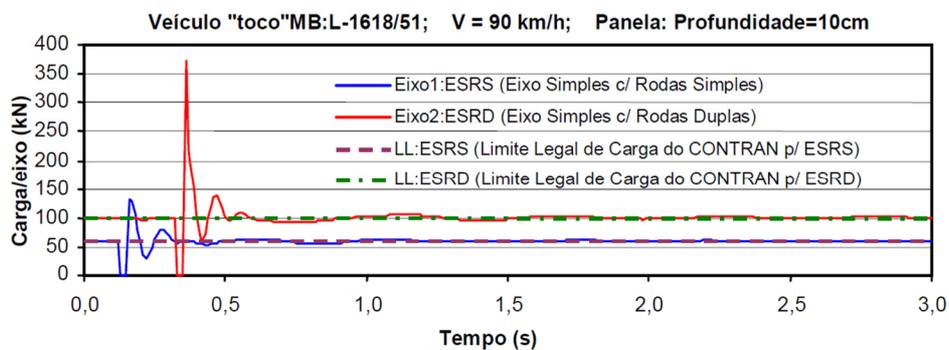


Figura 2.5 – Carga por eixo em função do tempo, buraco (Barbosa, 1999)

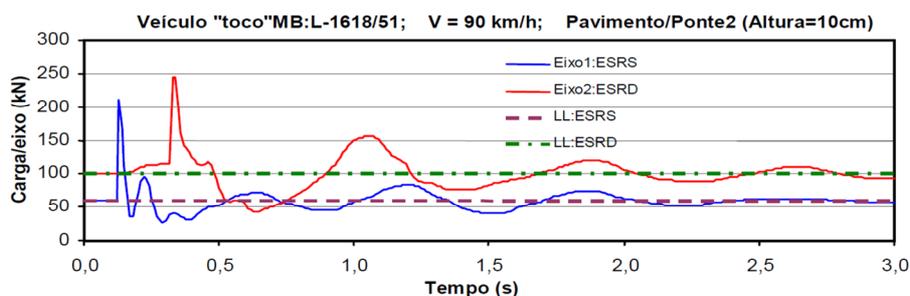


Figura 2.6 – Carga por eixo em função do tempo para sobressalto (Barbosa, 1999)

Para os dois casos são observados picos de força sobre o pavimento quando da passagem do eixo dianteiro e traseiro sobre o obstáculo transposto. Concomitantemente, percebe-se como essa carga de impacto gera vibrações além do momento de impacto sobre o ponto analisado. Para comparar esses valores com valores de referência são apresentados ainda os limites legais permitidos. Observa-se que a carga de pico transmitida pelo eixo traseiro (eixo simples de roda dupla) excedeu o limite legal em cerca de 3,5 vezes ao passar por uma “panela” de 10cm de profundidade.

Infere-se que a partir dos resultados apresentados por Barbosa, 1999, os efeitos dinâmicos decorrentes das irregularidades nas pistas produzem sobre o pavimento onda de esforços dinâmicos que tem duração além do instante do impacto ocorrido. Com isso, tem-se aplicado no pavimento esforços equivalentes a um processo vibratório que pode ser capaz de induzir o rearranjo das partículas contidas em camadas granulares, fazendo com que o material fino que preenche os poros dos materiais granulares, de maior dimensão, desçam, o que pode representar a ineficácia do pavimento, como exemplo o fato pode ocorrer para pavimentos que se utiliza de macadame hidráulico, fato que exige pesquisas para a utilização de materiais granulares diante da consideração de uso de carregamentos dinâmicos.

# Capítulo 3

## 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo é apresentado o arcabouço teórico que foi utilizado nessa pesquisa. Foram apresentadas as bases para o desenvolvimento dessa pesquisa, neste capítulo têm-se as descrições detalhadas da sequência de passos, métodos e ferramentas utilizadas na pesquisa.

Dentre os principais conceitos e ferramentas utilizados na pesquisa destacam-se as metodologias de dimensionamento de pavimento existentes, definição do sistema de um quarto de carro e de caminhão, o método dos elementos finitos para problemas de equilíbrio dinâmico e seus respectivos esquemas de solução no tempo e o fenômeno da fadiga. Esses conceitos são importantes para a aplicação da nova metodologia de dimensionamento apresentada nesse capítulo e que será aplicada nos capítulos posteriores.

A metodologia de dimensionamento de pavimento sugerida por essa pesquisa é dividida em cinco etapas, sendo elas Entrada de dados, Carregamento dinâmico, Projeto, Cálculo de resposta e Verificação de desempenho. A forma como as cinco etapas são preenchidas é descrita nos tópicos deste capítulo, obedecendo, contudo, o principal objetivo desta pesquisa, o estudo da influência das cargas dinâmicas diante das irregularidades do pavimento com vista ao dimensionamento de pavimento.

### 3.1. FORMULAÇÃO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANICISTA

O pavimento é uma estrutura com múltiplas camadas, assente sobre uma fundação chamada de subleito. No caso mais simples, um pavimento flexível teria duas camadas: o revestimento de concreto asfáltico e a camada de base, geralmente granular. Do ponto de vista estrutural, o pavimento deve resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego, sendo que tanto a base quanto o revestimento contribuem para esta função. Eventualmente

outras camadas estruturais intermediárias, tais como sub-base e reforço de subleito, também podem ser adotadas por motivos econômicos.

Além de aspectos estruturais, o pavimento deve também satisfazer critérios funcionais e de segurança. Para tanto, a camada superficial de revestimento deve ser livre de irregularidades excessivas, proporcionando ao usuário um passeio confortável, o que é quantificado por um baixo valor de IRI. Adicionalmente, a textura superficial do revestimento deve apresentar macro e microrrugosidades que favoreçam uma boa aderência (resistência à derrapagem) entre o pneu e o pavimento, especialmente em dias de chuva, assegurando ao usuário segurança contra o fenômeno de aquaplanagem.

O revestimento deve ainda resistir aos esforços horizontais provocados pelo atrito entre os pneus do veículo e a superfície do pavimento. Desta forma, de modo a atender às exigências estruturais, funcionais e de segurança, o revestimento deve ser produzido com um material coesivo, com valores de rigidez e resistência compatíveis com as solicitações externas.

Devido à alta rigidez da camada de revestimento em concreto asfáltico em relação à rigidez da camada de base e do solo do subleito, o revestimento geralmente fica sujeito a esforços de tração na flexão, como ilustrado na Figura 3.1. Assim, os esforços de tração na flexão,  $\sigma_t$ , e a deformação de tração horizontal,  $\epsilon_t$ , são preponderantes na avaliação de resistência da camada de revestimento, pois devido à alta frequência dessas solicitações em decorrência do tráfego de veículos são geradas trincas de fadiga no revestimento.

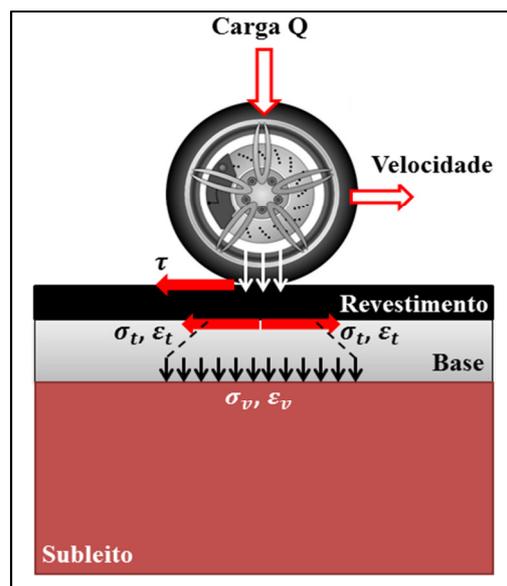


Figura 3.1 – Camadas e esforços atuantes no pavimento flexível sob tráfego de veículos.

As trincas geralmente surgem na linha de passagem dos pneus, chamadas de trilhas de roda, tanto na direção longitudinal quanto transversal ao sentido do tráfego. Quando interconectadas, as trincas de fadiga ficam com o aspecto de “couro de jacaré”, conforme apresentado na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Trincas tipo couro de jacaré advindas dos esforços de flexão

A camada de subleito recebe os esforços gerados na superfície do pavimento, em especial os esforços de compressão, conforme apresentado na Figura 3.1. Para certo nível de tensão vertical, ou para solicitações repetitivas sobre o pavimento, ocorrem deformações plásticas no subleito. Essas deformações são perceptíveis no topo do pavimento, já que após o subleito sofrer deformação, as camadas suportadas por ele também se deformam e provocam o afundamento superficial da camada de revestimento, chamado de afundamento de trilha de roda. Ressalta-se que todas as camadas sobre o subleito sofrem deformação plástica, contudo a magnitude delas é muito menor que no subleito, e dessa forma o afundamento percebido no revestimento é atribuído majoritariamente à deformação no subleito. A deformação do tipo “afundamento de trilhas de roda” é apresentada pela Figura 3.3.



Figura 3.3 – Trilha de roda devido às deformações verticais permanentes do pavimento.

A partir dos efeitos vislumbrados em decorrência do tráfego, e com o objetivo de se determinar quais as espessuras das camadas do pavimento de tal sorte que o pavimento suporte as solicitações sofridas para o período de projeto, o pavimento deve ser dimensionado quanto à fadiga do revestimento asfáltico e ao fundamento plástico do subleito.

Os métodos mecanicistas ou numéricos são utilizados para calcular alguns dos elementos necessários ao modelo de fadiga, como os esforços de tração na fibra inferior do revestimento e dos esforços verticais de compressão sobre o subleito.

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{1}{M_r}\right)^{k_3} \quad (3.1)$$

Em que  $N_f$  é o número máximo de passadas de um veículo padrão sobre o revestimento, dado em função de  $\varepsilon_t$ , deformação de tração na fibra inferior do revestimento.  $M_r$ , módulo de resiliência da camada de revestimento que deve ser dado em psi para que se utilizem os coeficientes fornecidos pela Tabela 3.1. As constantes  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  são determinadas experimentalmente pelo ensaio de fadiga, conforme explicado por Mello, 2008, a partir das componentes apresentadas e do modelo de fadiga é possível prever a longevidade do pavimento.

Na Figura 3.4 observa-se a diferença entre os módulos resilientes ( $M_r$ ) e de elasticidade ( $E$ ). O primeiro reflete a aplicação de inúmeros ciclos de carregamento e descarregamento sobre o material até que o comportamento dele passe a ser elástico, onde ocorra apenas um módulo, usando a mesma trajetória para o carregamento e descarregamento do material. O segundo representa o comportamento de um material em sua fase elástica decorrente de ensaios em que o material é submetido a acréscimo de força aumenta gradualmente gerando no material deformações sucessivas de igual proporção.

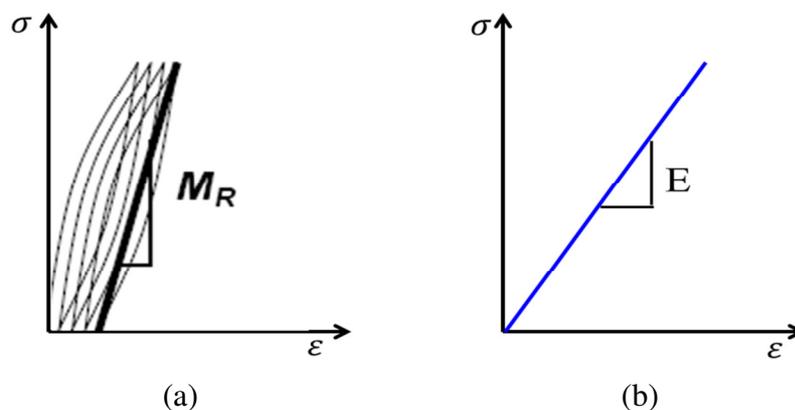


Figura 3.4 – (a) Módulo de resiliência (b) Módulo de elasticidade

Alguns valores de  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ , derivados de pesquisas experimentais, são apresentados sendo adequados aos materiais estudados em diferentes pesquisas. Aqui se restringem aos valores descritos por Huang (2004), apresentados na Tabela 3.1, por questão de conveniência, já que não faz parte do escopo deste trabalho determinar os valores das constantes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ , assim julgou-se apropriado o uso dos parâmetros utilizados pelo Asphalt Institute e Shell Oil Research. Alerta-se, contudo, que para projeto específico devem ser utilizados coeficientes que representem as características dos materiais locais a fim de se obter melhores resultados.

Tabela 3.1 – Coeficientes de trincas por fadiga (Huang, 2004)

Fonte	$k_1$	$k_2$	$k_3$
ASPHALT INSTITUTE	0,0796	3.291	0,854
SHELL OIL RESEARCH	0,0685	5.671	2,363

Após a determinação do número real máximo de passadas para dado tipo de carregamento,  $N_{fi}$ , e comparando-o ao número de passadas previstas para este tipo de carga,  $n_{pi}$ , durante determinado tempo de projeto é possível calcular o dano cumulativo ao do revestimento. Essa relação é conhecida como a teoria do dano cumulativo ou lei de Palmgreen-Miner, representada por:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_{pi}}{N_{fi}} \leq 1 \quad (3.2)$$

A Equação (3.2), portanto, afirma que quando o somatório dos consumos para todos os níveis de tensão atinge 1 (ou 100%), tem-se simultaneamente a exaustão à fadiga do material.

Assim, para uma dada estrutura (caracterizada pelos módulos e espessuras das diversas camadas do pavimento), e para um tráfego de projeto (caracterizado por diferentes tipos de carregamento cada qual com um número previsto de passadas  $n_{pi}$  no período de projeto), a lei de Palmgreen-Miner fornece o critério mínimo de dimensionamento em termos de consumo de fadiga acumulado. Para usá-la, é necessário determinar o número máximo de passadas de uma frota de veículos que levaria à ruptura do revestimento por fadiga ( $N_{fi}$ ).

Este valor depende do modelo de fadiga adotado, como na Equação (3.1), a qual tem como principais entradas as propriedades do material do revestimento ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $E$ ) e a tensão atuante na fibra inferior do revestimento ( $\sigma_{ii}$ ). Esta deve ser calculada para cada tipo ( $i$ ) de carregamento e será função basicamente da carga externa e da rigidez relativa das diversas

camadas que compõem a estrutura do pavimento. Para o cálculo de  $(\sigma_{ii})$  deve-se lançar de um esquema de solução analítico ou numérico que satisfaça às condições de equilíbrio (estático ou dinâmico) dos pontos no interior do pavimento.

Para o topo do subleito, considera-se a relação entre o número de repetições com a deformação de compressão vertical. A partir dos esforços calculados e das constantes determinadas em laboratório ou em campo é possível calcular o número máximo de passadas de um veículo sobre o pavimento, conforme um modelo geral de deformação plástica para a camada de subleito, do tipo:

$$N_d = f_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_c}\right)^{f_2} \quad (3.3)$$

Onde  $N_d$  é o número máximo de passadas de um veículo sobre o pavimento que provoca uma deformação limite,  $f_1$  e  $f_2$  são constantes determinadas experimentalmente por meio de ensaios de campo e laboratoriais, valores desses coeficientes adotados pelo ASPHALT INSTITUTE e SHELL OIL RESEARCH são apresentados na Tab. 3.2. Destaca-se que o problema envolvendo deformação permanente para as camadas do pavimento segue também a lei de Palmgreen-Miner.

Tabela 3.2 – Coeficientes laboratório de deformação plástica do subleito (Huang, 2004)

Fonte	$f_1$	$f_2$
ASPHALT INSTITUTE	$1,365 \cdot 10^{-9}$	4.477
SHELL OIL RESEARCH	$6,15 \cdot 10^{-7}$	4.000

O método mecanicista de dimensionamento, que se utiliza dos modelos de fadiga para determinar a espessura das camadas do pavimento de forma a atender a certo número de passadas de veículo padrão, foi apresentado nesse tópico. O modelo de dimensionamento utiliza-se de coeficientes apresentados nas Equações (3.1) e (3.3), além dos valores de deformação horizontal na base do revestimento,  $\varepsilon_t$ , e de deformação vertical no topo de subleito,  $\varepsilon_c$ .

Convencionalmente  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_c$  são dados a partir de formulação analítica ou por meio de método numérico em que o carregamento admitido é estático. Esta pesquisa utiliza-se dos conceitos de dinâmica e de método numérico de elementos finitos para resolução de problemas de

equilíbrio dinâmico, qual seja a análise da passagem de veículo sobre pavimento com irregularidade longitudinal, em que os resultados de interesse são  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_c$ .

Para isso, são apresentados nos tópicos a seguir os conceitos de dinâmica e os fundamentos necessários para aplicação do método dos elementos finitos para problemas de equilíbrio dinâmico. Posteriormente, nos Capítulos 5 e 6, esses conceitos são vistos na aplicação da análise do problema desenvolvido nesta pesquisa.

### 3.2. FUNDAMENTOS DA DINÂMICA

Os conceitos da dinâmica são utilizados nesta pesquisa em três momentos. Primeiramente, no desenvolvimento da Equação de equilíbrio dinâmico do sistema massa mola, Equação que forma a base do problema dinâmico. No segundo momento aparece na aplicação da formulação do problema de equilíbrio dinâmico para o sistema de quarto de carro em movimento sobre o pavimento irregular. Nesse caso foi incorporado o amortecimento no sistema de equações, termo que será detalhado a seguir. Por fim, no terceiro momento, busca-se representar os efeitos dinâmicos no comportamento tensão deformação nas camadas do pavimento diante da passagem de veículos com diversas composições de eixos e diferentes cargas. Trata-se, portanto, da aplicação das equações da dinâmica e de método numérico que as resolva. Nesta pesquisa utiliza-se o método dos elementos finitos, admitindo que se trate apenas de um problema de equilíbrio dinâmico.

Apresenta-se a seguir o diagrama de corpo livre do tipo sistema massa-mola, a partir do qual se tem simplificada as componentes da Equação da dinâmica, conforme apresentado pela Figura 3.5. Tem-se que o sistema é composto por mola de massa nula e rigidez,  $k$ , e corpo de massa,  $m$ . A rigidez tem grandeza de  $[F]/[L]$ (ou  $[M][L]^0[T]^{-2}$ ) e é expressa em N/m, ou algum de seus múltiplos, no sistema internacional (S.I.).

Em que  $[F]$  representa a grandeza força,  $[L]$  a grandeza comprimento,  $[M]$  massa e  $[T]$  tempo.

Abaixo, a partir do diagrama massa mola, conforme Figura 3.5 tem-se que o sistema está inicialmente em repouso no tempo zero, e no instante posterior o sistema sofre excitação por meio de força horizontal.

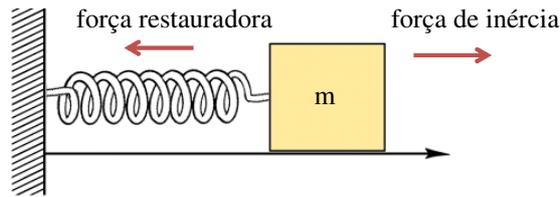


Figura 3.5 – Sistema massa-mola e diagrama de corpo livre (Inman, 2007)

No esquema representado na Figura 3.5, observa-se a atuação de duas forças, sendo elas a força de inércia,  $m\ddot{x}$ , capaz de transportar energia cinética, e força restauradora,  $-kx$ , capaz de armazenar energia potencial de deformação, para um sistema sem dissipação de energia. Aqui  $\ddot{x}$  é aceleração, representada pela derivada segunda do deslocamento em relação ao tempo,  $k$  é rigidez e  $x$  é o deslocamento.

O corpo excitado se movimenta horizontalmente de um lado a outro permanecendo em movimento infinitamente sem que seja dissipada energia do sistema, já que se considera não haver restrição de movimento tampouco qualquer atrito, conforme pode ser observado na Figura 3.6. Nessa Fig. apresentam-se os deslocamentos horizontais positivos e negativos ao longo do tempo, de mesma magnitude. Entretanto, percebem-se valores positivos e negativos dados tomando a posição inicial como referência na avaliação do sinal do deslocamento.

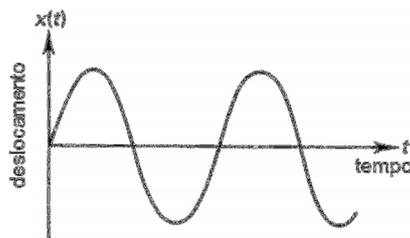


Figura 3.6 – Relação tempo deslocamento para o sistema massa mola sem amortecimento

No sistema massa mola, dado pela Figura 3.5, percebe-se a atuação da força de inércia, dada pela segunda lei de Newton, o produto massa aceleração,  $m\ddot{x}$ . Contrapondo-se à força de inércia, tem-se a segunda força dada pela mola. Ela tenta restaurar a posição inicial da mola por meio de força restauradora dada pelo produto rigidez deslocamento  $-kx$ , conforme observado pela Equações (3.4a) e (3.4a).

$$-kx = m\ddot{x} \quad (3.4a)$$

$$kx + m\ddot{x} = 0 \quad (3.5b)$$

Assim tem-se descrito a partir de um sistema massa-mola a Equação diferencial para o movimento do sistema.

### 3.2.1. AMORTECIMENTO

No tópico anterior foi analisado o sistema ideal do tipo massa-mola, em que a resposta prevê que o mesmo irá oscilar indefinidamente. Todavia, observando os sistemas reais submetidos ao carregamento dinâmico nota-se que eles reduzem sua oscilação gradativamente até que as vibrações cessem, conforme Figura 3.7. A esse efeito dá-se o nome de amortecimento.

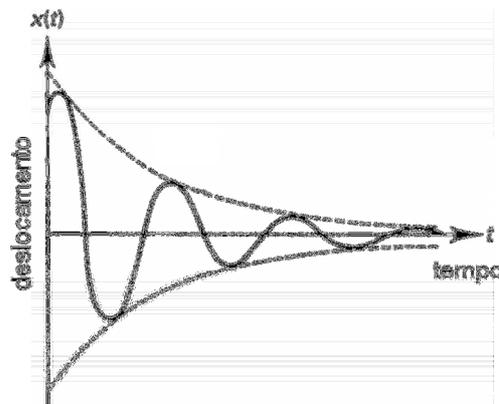


Figura 3.7 – Representação do amortecimento no tempo.

Admitindo-se que o amortecimento deve-se à força de arraste e que esta seja diretamente proporcional à velocidade, é possível adicionar à Eq (3.4a) um termo sob a forma de  $c\dot{x}$ , em que  $c$  é uma constante de amortecimento dada pela viscosidade do material enquanto  $\dot{x}$  é a velocidade, ou a derivada do deslocamento no tempo. Essa força resultará na redução gradual do movimento oscilatório até que o mesmo cesse.

Na Figura 3.8 é apresentado o sistema massa-mola-amortecedor. O ponto ou partícula concentra uma massa ( $m$ ) que interage com o meio (parede) através de um modelo de contato caracterizado pela mola com rigidez ( $k$ ) e o amortecedor com viscosidade ( $c$ ). A constante de amortecimento tem grandeza de  $[F].[T]/[L]$  (ou  $[M].[L]^0.[T]^{-1}$ ) e é expressa em kg/s, ou algum de seus múltiplos, no sistema internacional (S.I.). Adicionando o termo  $-c\dot{x}$  às Equações (3.4a) e (3.4a) passa a ser generalizada, conforme as Equações (3.6a) e (3.6a).

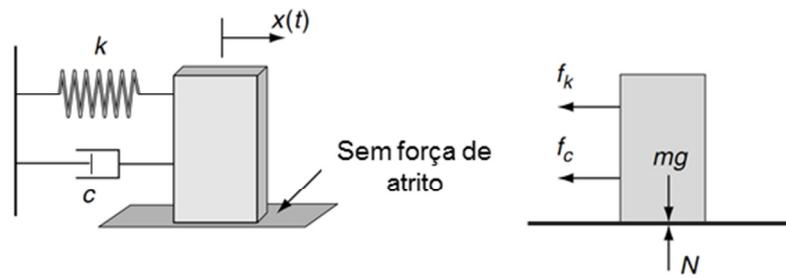


Figura 3.8 – Representação do sistema oscilatório com amortecimento (Inman, 2007)

$$m\ddot{x} = -kx - c\dot{x} \quad (3.6a)$$

$$kx + c\dot{x} + m\ddot{x} = 0 \quad (3.7b)$$

As Equações(3.6a) e (3.6a) representa o equilíbrio dinâmico ou Equação de movimento de um sistema elástico com amortecimento viscoso.

### 3.3. SISTEMA DINÂMICO QUARTER CAR

Apresentam-se aqui os fundamentos para a formulação matemática do problema de equilíbrio do modelo de quarto de carro. As características gerais desse modelo foram apresentadas no capítulo 2. Lá mostrou-se que o sistema que representa o modelo quarto de carro é representado por duas massas separadas por um sistema de amortecimento e uma mola. Já a massa inferior é ligada ao pavimento por outra mola, que é a representação do pneu do veículo.

Apresentam-se, por meio da Figura 3.9, as componentes de forças que atuam em cada uma das massas, suspensa e não amortecida. A massa suspensa representa todo o somatório das massas acima do eixo do veículo para um quarto de veículo. A massa não amortecida representa a soma das massas do eixo e da roda de um quarto de carro.

Na Figura 3.9, a seguir, têm-se forças atuantes no sistema, a força na mola, dada pelo produto rigidez,  $k$ , deslocamento,  $x$ , a força devido ao trabalho do amortecedor, dada pelo produto do amortecimento,  $c$ , pela velocidade,  $\dot{x}$ , e, por fim tem-se a força de inércia dada pelo produto massa,  $m$ , aceleração,  $\ddot{x}$ .

Observa-se que para as forças de amortecimento e de mola tem-se que o amortecimento,  $c$ , e a rigidez,  $k$ , multiplicam a velocidade relativa e deslocamento relativo, respectivamente. A

diferença de deslocamentos representa o quanto a mola se estendeu ou se contraiu diante do movimento das massas. A diferença de velocidade representa a variação da viscosidade durante o amortecimento.

Na Figura 3.9 os deslocamento, velocidades e acelerações são dadas em função da variável  $z$  e não mais  $x$ , como foi apresentados para o sistema simples apresentados pelas Figs. 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8.

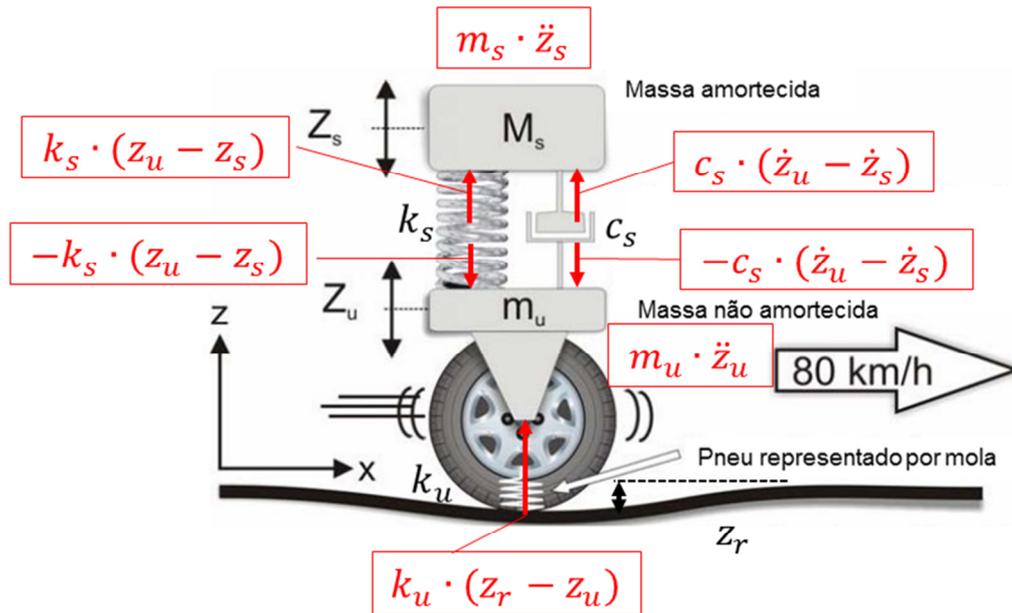


Figura 3.9 – Forças atuantes nos sistema quarto de carro

Fazendo o equilíbrio das forças atuantes em cada uma das massas, conforme apresentado na Figura 3.9, é possível montar o sistema de equações que represente o modelo de quarto de carro. As equações que representam o equilíbrio de forças em cada massa é expressa em (3.8), em que se percebe que se optou por isolar o termo aceleração, devido à praticidade pela representação computacional do sistema.

$$\ddot{z}_s = \frac{k_s}{m_s}(z_u - z_s) + \frac{c_s}{m_s}(\dot{z}_u - \dot{z}_s) \quad (3.8)$$

$$\ddot{z}_u = -\frac{k_s}{m_u}(z_u - z_s) - \frac{c_s}{m_u}(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + \frac{k_u}{m_u}(z_r - z_u)$$

Estas equações são utilizadas para se obter os valores de IRI e da força vertical pneu asfalto, ambos de grande interesse para esta pesquisa. Os cálculos são feitos por meio de rotina que se

utiliza da plataforma MATLAB/Simulink. O cálculo do IRI, da força e o uso da plataforma são descritos no Capítulo 4.

O IRI fornece o estado superficial do pavimento, por isso usado como dado de entrada no dimensionamento do pavimento. Ele é calculado a partir do perfil longitudinal do pavimento,  $z_r$ , e do conjunto de parâmetros dos componentes do modelo quarto de carro, que inseridos na Equação acima possibilitam o cálculo dos deslocamentos relativos das massas,  $z_u$  e  $z_s$ .

As forças dinâmicas sobre o pavimento também são calculadas a partir do perfil longitudinal do pavimento,  $z_r$ , e do conjunto de parâmetros do veículo frente às irregularidades longitudinais, dado pela componente  $k_u(z_r - z_u)$  da Equação (3.8).

Os resultados do cálculo da força são utilizados como dado de entrada para a simulação do estado de tensões e deformações das camadas de pavimento via método dos elementos finitos, logo é possível calcular a vida de fadiga para as camadas de pavimento.

O cálculo das forças dinâmicas atuantes em veículos e nos seus elementos é prática recorrente em pesquisas da engenharia mecânica e aeronáutica, as quais têm enfoque na durabilidade das peças e no conforto dos usuários. Esta pesquisa utiliza-se dos conceitos referentes aos cálculos das cargas dinâmicas, porém sob a luz do cálculo da solicitação dos pavimentos que tem como consequência o dimensionamento dos pavimentos. Essa abordagem quanto ao dimensionamento de pavimento é outra inovação desta pesquisa e representa exatamente a segunda etapa da metodologia de dimensionamento do pavimento apresentado nesse trabalho.

### **3.4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Métodos numéricos capazes de solucionar problemas físicos, matemáticos e de engenharia, representados por equações de difícil solução analítica, foram desenvolvidos ao longo dos anos. Dentre os métodos desenvolvidos destaca-se nesta pesquisa o método dos elementos finitos. Este método é entendido como um processo em que subdivide o domínio contínuo em elementos, em seguida são aplicadas as formulações matemáticas desenvolvidas que transformam as relações matemáticas que convertem derivadas de difícil solução em sistemas de equações lineares da qual é possível obter a solução aproximada para um dado fenômeno.

### 3.4.1. CONCEITOS GERAIS

Nas seções anteriores foram apresentados a Equação de movimento para uma massa simples (ou partícula discreta) e o sistema de equações para um conjunto de duas massas, representando o sistema quarter-car. Neste caso tem-se um sistema de equações diferenciais, cuja solução analítica não é imediata em função das condições de contorno relativamente complicadas representadas pelo perfil de irregularidade longitudinal da superfície do pavimento. Para condições simplificadas, serão apresentadas soluções usando a ferramenta Simulink do Matlab no Capítulo 5.

Para um meio constituído de várias camadas como um pavimento, o número de partículas é infinito e geralmente recorre-se a uma formulação do problema dinâmico em termos da Mecânica dos Meios Contínuos. A solução de problemas de contorno complexos, neste caso, requer o uso de técnicas numéricas, como o Método dos Elementos Finitos, descrito a seguir.

Considerando a aplicação do Método dos Elementos Finitos em problemas de equilíbrio, apresentam-se inicialmente as formulações básicas para o problema sob condições de carregamento estático. Essa formulação é bem conhecida, entretanto torna-se necessária a sua apresentação para detalhar melhor a expansão do método dos elementos finitos de modo a considerar problemas transientes de carregamentos dinâmicos (Fish, 2009). Boa parte desse trabalho se concentrou na implementação destas expansões a código de elementos finitos estático.

A Equação de equilíbrio estático, considerando-se um ponto qualquer de um meio contínuo em três dimensões, é dada pela Equação(3.9).

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (3.9)$$

Em que  $\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}^T$  é o operador divergente,  $\boldsymbol{\sigma}$  é o tensor de tensão na

notação de Voigt (matriz coluna ou vetor com seis componentes, ou seja,  $\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}\}^T$  e  $\mathbf{b}$  é o vetor das forças de massa,  $\mathbf{b} = \{b_x, b_y, b_z\}^T$  .

Reescrevendo a Equação (3.9) em termos das direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  e fazendo uso do operador gradiente,  $\nabla^T = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z} \right\}$ , obtém-se:

$$\begin{aligned}\nabla^T \sigma_x + b_x &= 0 \\ \nabla^T \sigma_y + b_y &= 0 \\ \nabla^T \sigma_z + b_z &= 0\end{aligned}\tag{3.10}$$

Nas equações (3.10) os termos  $\nabla^T \sigma_i$  representam o divergente das componentes de tensão numa dada direção  $i$ . O operador divergente representa um balanço de uma função avaliada na vizinhança de um ponto, por unidade de volume, e a Equação como um todo significa simplesmente que o somatório das forças internas (expressas em termos de tensões) e forças externas (as forças de massa) devem ser nulos em cada direção, ou seja, o ponto deve estar em equilíbrio.

Nas equações (3.7) têm-se apenas três equações para seis incógnitas (as componentes de tensão). Logo, são necessárias mais equações para que o problema seja definido. Portanto, além das equações de equilíbrio, deve-se satisfazer uma relação tensão-deformação, expressa como:

$$\sigma = \mathbf{D}\epsilon\tag{3.11}$$

Onde  $\mathbf{D}$  é uma matriz (6x6) de módulos de rigidez de acordo com o modelo constitutivo adotado. Por sua vez o vetor de deformações  $\epsilon = \{\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}\}^T$  se relaciona com o vetor de deslocamentos no ponto  $d = \{u, v, w\}^T$ , por intermédio do mesmo operador diferencial  $\mathcal{E}$  utilizado na Equação de equilíbrio:

$$\epsilon = \mathcal{E}d\tag{3.12}$$

A solução das equações diferenciais de (3.10) a (3.12) é dada pela integração dessas no volume,  $V$ , sujeitas às condições de contorno ( $\Gamma = \Gamma_t + \Gamma_d$ ), as quais podem ser divididas em uma região com forças de superfície impostas,  $\Gamma_t$ , e outra com deslocamentos impostos,  $\Gamma_d$ . A primeira condição de contorno exige que:

$$\begin{aligned}\sigma_x^T \mathbf{n} &= t_x \\ \sigma_y^T \mathbf{n} &= t_y\end{aligned}\tag{3.13}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_z^T \mathbf{n} = t_z$$

Onde  $\mathbf{n}$  é o vetor normal ao contorno  $r_t$  no qual está aplicado o vetor de forças de superfície  $\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$ . Em outras partes do contorno  $r_d$  estão aplicados deslocamentos prescritos  $\bar{\mathbf{d}}$ .

A formulação fraca do problema de equilíbrio é obtida multiplicando-se as equações (3.10) por funções de peso  $\mathbf{w}^T = \{w_x \ w_y \ w_z\}$  e integrando-se no volume, de acordo com o método dos resíduos ponderados (Fish, 2009).

$$\begin{aligned} \int_V w_x \nabla^T \boldsymbol{\sigma}_x dV + \int_V w_x b_x dV &= 0 \\ \int_V w_y \nabla^T \boldsymbol{\sigma}_y dV + \int_V w_y b_y dV &= 0 \\ \int_V w_z \nabla^T \boldsymbol{\sigma}_z dV + \int_V w_z b_z dV &= 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Aplicando-se o Teorema de Green ao primeiro termo do lado esquerdo da Equação (3.14) e somando as equações resultantes, obtém-se:

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} (w_x \boldsymbol{\sigma}_x^T \mathbf{n} + w_y \boldsymbol{\sigma}_y^T \mathbf{n} + w_z \boldsymbol{\sigma}_z^T \mathbf{n}) d\Gamma \\ - \int_V ((\nabla w_x)^T \boldsymbol{\sigma}_x + (\nabla w_y)^T \boldsymbol{\sigma}_y + (\nabla w_z)^T \boldsymbol{\sigma}_z) dV \\ + \int_V (w_x b_x + w_y b_y + w_z b_z) dV = 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Substituindo as condições de contorno da Equação (3.13) no primeiro termo do lado esquerdo da Equação (3.15), e notando-se que as funções de ponderação devem ser nulas em  $r_d$ , e observando-se ainda que o integrando no segundo termo do lado esquerdo da Equação (3.15) corresponde a  $(\mathbf{E}\mathbf{w})^T \boldsymbol{\sigma}$ , obtém-se:

$$\int_{\Gamma_t} \mathbf{w}^T \mathbf{t} d\Gamma - \int_V (\boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{w})^T \mathbf{D} \boldsymbol{\sigma} dV + \int_V \mathbf{w}^T \mathbf{b} dV = 0 \quad (3.16)$$

Agora substituindo a Equação (3.12) em (3.11) e o resultado em (3.16) e reorganizando-se, obtém-se:

$$\int_V (\boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{w})^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{d} dV = \int_{\Gamma_t} \mathbf{w}^T \mathbf{t} d\Gamma + \int_V \mathbf{w}^T \mathbf{b} dV \quad (3.17)$$

Finalmente o deslocamento em um ponto pode ser expresso em função do vetor de deslocamentos nodais do elemento,  $\mathbf{u}$ , por meio de uma matriz de interpolação,  $\mathbf{N}_u$ , i.e.,  $\mathbf{d} = \mathbf{N}_u \mathbf{u}$ . De forma semelhante às funções de peso  $\mathbf{w}$  podem ser expressas em função de seus valores nodais  $\mathbf{W}$  por meio de outro conjunto de funções de ponderação,  $\mathbf{w} = \mathbf{N}_w \mathbf{W}$ ,  $\mathbf{N}_w$  é uma matriz (3x3n, n é o número de nós do elemento) com os valores das funções de ponderação para os nós do elemento avaliada no ponto em que se deseja conhecer os pesos  $\mathbf{w}$ . Caso as mesmas funções sejam utilizadas ( $\mathbf{N}_u = \mathbf{N}_w = \mathbf{N}$ ), como no método de Galerkin, obtém-se:

$$\int_V \mathbf{W}^T (\boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{N})^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{N} \mathbf{u} dV = \int_{\Gamma_t} \mathbf{W}^T \mathbf{N}^T \mathbf{t} d\Gamma + \int_V \mathbf{W}^T \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV \quad (3.18)$$

Como os valores nodais em  $\mathbf{W}$  são arbitrários, este vetor pode ser cancelado e, fazendo-se  $\mathbf{B} = \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{N}$ , obtém-se a clássica formulação de elementos finitos para o problema de equilíbrio estático em termos de deslocamentos:

$$\int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{u} dV = \int_{\Gamma_t} \mathbf{N}^T \mathbf{t} d\Gamma + \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV \quad (3.19)$$

O sistema de equações de equilíbrio estático pode ser reescrito na forma condensada como,

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (3.20)$$

Onde:

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_t + \mathbf{f}_b$$

$$\mathbf{f}_t = \int_{\Gamma} \mathbf{N}^T \mathbf{t} \, d\Gamma \quad (3.21)$$

$$\mathbf{f}_b = \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} \, dV$$

$$\mathbf{F} = \int_{\Gamma} \mathbf{N}^T \mathbf{t} \, d\Gamma + \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} \, dV \quad (3.22)$$

$$\mathbf{K} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \, dV \quad (3.23)$$

Em que  $\mathbf{D}$  é a matriz constitutiva,  $\mathbf{K}$  é a matriz de rigidez do esqueleto sólido e  $\mathbf{F}$  é o vetor de forças externas, obtido da soma dos vetores de forças nodais equivalentes às forças de superfície,  $\mathbf{t}$ , e às forças de massa,  $\mathbf{b}$  (Fish, 2009).

### 3.5. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA PROBLEMAS DINÂMICOS

A formulação do método dos elementos finitos convencional pode ser adaptada para resolver problemas dinâmicos. Nesse caso, parte-se da Equação de equilíbrio estático, modificando-se as forças de massa  $\mathbf{b}$ , de modo a introduzir os efeitos das forças de inércia,  $\mathbf{f}_a$ , e as forças resistivas ou de arraste,  $\mathbf{f}_c$ , considerando-se o meio viscoso. Dessa forma adotando-se um vetor de forças de massa equivalente,  $\bar{\mathbf{b}}$ , dado por:

$$\bar{\mathbf{b}} = \mathbf{b} - \mathbf{f}_a - \mathbf{f}_c \quad (3.24)$$

Onde,

$$\mathbf{f}_a = \rho \ddot{\mathbf{a}} \quad (3.25)$$

$$\mathbf{f}_c = \mu \dot{\mathbf{a}}$$

Em que  $\rho$  é o peso específico do material,  $\ddot{\mathbf{a}}$  é o vetor de aceleração no ponto,  $\mu$  é a matriz de coeficientes de viscosidades e  $\dot{\mathbf{a}}$  é o vetor velocidade no ponto. Discretizando-se as acelerações e velocidades em função dos deslocamentos nodais  $\mathbf{u}$ , i.e., ( $\ddot{\mathbf{a}} = \mathbf{N}\ddot{\mathbf{u}}$  e  $\dot{\mathbf{a}} = \mathbf{N}\dot{\mathbf{u}}$ ) e substituindo  $\mathbf{b}$  por  $\bar{\mathbf{b}}$  na Equação (3.22) obtém-se:

$$\bar{\mathbf{F}} = \mathbf{F} - \int_V \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} \ddot{\mathbf{u}} dV - \int_V \mathbf{N}^T \boldsymbol{\mu} \mathbf{N} \dot{\mathbf{u}} dV \quad (3.26)$$

Dessa forma, para o equilíbrio dinâmico tem-se a seguinte Equação,

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \bar{\mathbf{F}} \quad (3.27)$$

A qual pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} - \int_V \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} \ddot{\mathbf{u}} dV - \int_V \mathbf{N}^T \boldsymbol{\mu} \mathbf{N} \dot{\mathbf{u}} dV \quad (3.28)$$

A qual fornece a formulação clássica para o problema de equilíbrio dinâmico.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (3.29)$$

Em que,

$$\mathbf{C} = \int_V \mathbf{N}^T \boldsymbol{\mu} \mathbf{N} dV, \quad (3.30)$$

$$\mathbf{M} = \int_V \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} dV \quad (3.31)$$

Nota-se a semelhança entre o sistema de equações algébricas ou Equação matricial Equação (3.29), válido para todos os pontos discretos de uma malha de elementos finitos, com a Equação escalar para uma única partícula apresentada em Equação (3.6a).

### 3.5.1. O AMORTECIMENTO LINEAR E A MATRIZ DE MASSA

A determinação da matriz de amortecimento,  $\mathbf{C}$ , requer a matriz de coeficientes de viscosidade,  $\boldsymbol{\mu}$ , que pode ter diferentes valores considerando a composição dos vários materiais. Esta matriz é de difícil obtenção experimental, logo, frequentemente, assume-se que a matriz de amortecimento pode ser aproximada como uma combinação linear das matrizes de rigidez e de massa, i.e.,

$$\mathbf{C} = \alpha_m \mathbf{M} + \alpha_k \mathbf{K} \quad (3.32)$$

As constantes  $\alpha_m$  e  $\alpha_k$  possuem unidade de  $s^{-1}$  e  $s$ , respectivamente. Elas são conhecidas como massa proporcional de amortecimento e rigidez proporcional de amortecimento. O

conjunto descrito pela Equação (3.32) é uma soma proporcional entre as matrizes de massa e rigidez denominada como amortecimento de Rayleigh (Clough, 1993).

Uma forma de se obter constantes  $\alpha_m$  e  $\alpha_k$  é representar o amortecimento em termos de taxas de amortecimento  $\xi_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ), diretamente relacionadas às constantes. Essas taxas são a avaliação do deslocamento em um ponto comparado ao seu deslocamento anterior, sendo prevista a dissipação de energia no sistema. Assim, a força aplicada a um sistema gera nele deslocamentos consecutivos decrescentes.

A taxa de amortecimento é calculada em função dos coeficientes  $\alpha_m$  e  $\alpha_k$ , e da frequência natural  $w_n$ , de acordo com a seguinte expressão:

$$\xi_n = \frac{\alpha_m}{2w_n} + \frac{\alpha_k w_n}{2} \quad (3.33)$$

A Figura 3.10 representa a relação entre taxa de amortecimento e frequência considerando valores para os coeficientes  $\alpha_m$  e  $\alpha_k$ .

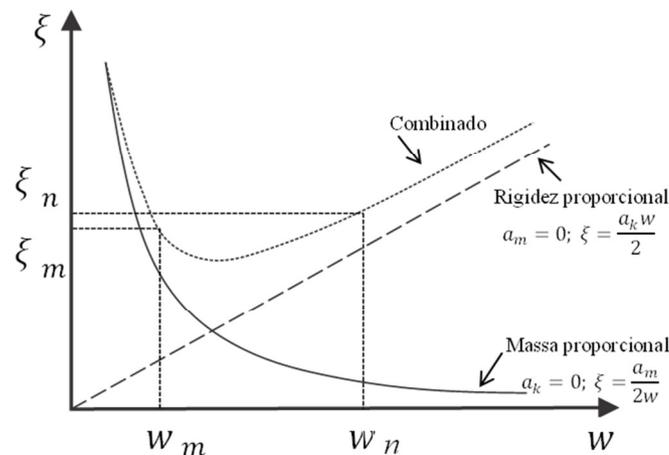


Figura 3.10 – Relação entre taxa de amortecimento e frequência (Chopra, 2000)

Assim é possível que os coeficientes de amortecimento de Rayleigh,  $\alpha_m$  e  $\alpha_k$ , possam ser calculados pela solução de um sistema de equações, desde que as taxas de amortecimento  $\xi_n$  e  $\xi_m$  e as frequências  $w_n$  e  $w_m$  sejam conhecidas. Escrevendo a Equação (3.33) para cada um dos casos e as expressando em forma de matriz, tem-se a Equação (3.34).

$$\begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/w_m w_m \\ 1/w_n w_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_m \\ \alpha_k \end{Bmatrix} \quad (3.34)$$

Esta Equação também pode ser escrita de forma inversa como:

$$\begin{Bmatrix} \alpha_m \\ \alpha_k \end{Bmatrix} = \frac{2w_m w_n}{w_n^2 - w_m^2} \begin{bmatrix} w_n & -w_m \\ -1/w_n & 1/w_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{Bmatrix} \quad (3.35)$$

Pelo fato de a variação da taxa de amortecimento com a frequência raramente ser disponível, é usual assumir que a mesma taxa de amortecimento seja aplicada para as duas taxas de frequência (i.e.,  $\xi_m = \xi_n = \xi$ ). Assim, é possível reduzir a Equação (3.35) a:

$$\begin{Bmatrix} \alpha_m \\ \alpha_k \end{Bmatrix} = \frac{2\xi}{w_n + w_m} \begin{bmatrix} w_n w_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Na aplicação desse procedimento de derivação da matriz de amortecimento proporcional, na prática, é recomendável que  $w_n$  geralmente seja a frequência fundamental ou natural do sistema e que  $w_m$  seja tomado como o maior modo de frequência do sistema, desta forma, é possível obter  $\alpha_m$  e  $\alpha_k$ .

A determinação da matriz de massa,  $\mathbf{M}$ , para vários tipos de elementos conhecidos foge do escopo deste trabalho, tendo em vista que a matriz de massa depende basicamente da geometria do elemento e das propriedades do material. Supondo um elemento com densidade  $\rho$  constante e espessura constante  $h$ , tem-se:

$$\mathbf{M} = h \iint \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} dx dy \quad (3.37)$$

Considerando as análises bidimensionais do tipo tensão plana ou deformação plana e optando-se, a título de exemplo, por um elemento triangular de três nós (1, 2, 3), a matriz  $\mathbf{N}^e$  é então dada por:

$$\mathbf{N}^e = [\mathbf{N}_1 \ \mathbf{N}_2 \ \mathbf{N}_3] \quad (3.38)$$

onde

$$\mathbf{N}_i = N_i \mathbf{I} \quad (3.39)$$

Sendo  $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  em que a função de forma  $N_i$  para um nó qualquer  $i$  desse elemento é dada por:

$$N_i = \frac{a_i + b_i x + c_i y}{2\Delta} \quad (3.40)$$

Sendo  $\Delta$  a área do elemento triangular. Dado que a espessura do elemento é constante  $h$ , tem-se a matriz de massa final igual a:

$$\mathbf{M} = \frac{\rho h}{12} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Note-se que a matriz de massa calculada de acordo com a Equação (3.31) é uma matriz cheia, como pode ser visto no exemplo acima, e é conhecida como matriz de massa consistente. Às vezes, usa-se uma matriz diagonalizada, conhecida como matriz de massa concentrada (lumped mass matrix, em inglês), em que a massa total do elemento é transferida para os nós. O uso da matriz de massa concentrada, apesar de aproximada, se justifica como um artifício para acelerar os cálculos, uma vez que a matriz de massa deve ser invertida como parte dos procedimentos de integração no tempo, como será visto na seção 3.7.

### 3.6. ESQUEMA DE SOLUÇÃO

O problema de equilíbrio dinâmico é naturalmente não-linear. A não-linearidade é devido à variação da magnitude e forma de aplicação do vetor de forças,  $\mathbf{F}$ , ao longo do tempo e devido ao comportamento do material diante da aplicação dos esforços.

A solução das equações de equilíbrio dinâmico exige que elas sejam integradas. Integrar analiticamente essas equações é uma tarefa árdua. Opta-se, portanto, pela utilização da integração numérica. Os métodos de integração utilizados para solucionar problemas intrinsecamente não-lineares são fundamentalmente os mesmos. A solução para a não-linearidade material considerando pequenos deslocamentos é apresentada a seguir.

A solução de problemas não-lineares pelo método dos elementos finitos é usualmente obtida com algumas técnicas básicas, geralmente do tipo incremental e iterativa. Nesta seção, apresenta-se o procedimento incremental. A fim de simplificar a demonstração, considera-se o problema apenas para um elemento, dada pela Equação de equilíbrio estático:

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \bar{\mathbf{F}} \quad (3.42)$$

Admite-se que a não linearidade ocorre na matriz de rigidez,  $\mathbf{K}$ , função do comportamento não linear do material, quando submetido a esforços. A não linearidade é simbolizada pela relação entre o vetor de forças,  $\bar{\mathbf{F}}$ , e o vetor deslocamento,  $\mathbf{u}$ , conforme Figura 3.11.

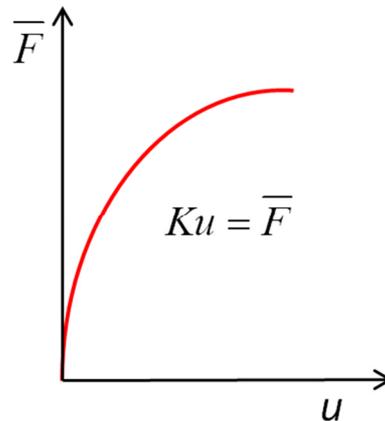


Figura 3.11 – Relação não-linear entre força,  $\bar{\mathbf{F}}$ , versus deslocamento,  $\mathbf{u}$

A base do procedimento incremental é a subdivisão da carga em pequenas partes ou incrementos. Usualmente os incrementos de carga são de igual magnitude, mas ocorrem casos onde os incrementos são distintos. A carga é aplicada em pequenos intervalos em incrementos sucessivos, onde se assume linear a relação força-deslocamento para cada intervalo, em outras palavras um valor fixo de  $\mathbf{K}$  é assumido para todo o incremento.

A solução para cada acréscimo de carga é obtida como um incremento de deslocamento,  $\mathbf{u}$ . O incremento de deslocamento é acumulado gerando a cada estágio de carregamento o valor total do deslocamento. O processo incremental é repetido até que todo carregamento seja aplicado. Essencialmente, a solução incremental aproxima o problema não-linear de uma série de problemas lineares.

Escrevendo a Equação para o método incremental, em que o estado inicial do corpo é dado pelo vetor carregamento,  $\bar{\mathbf{F}}_0$ , e pelo vetor deslocamento,  $\mathbf{u}_0$ , o carregamento total deve ser dividido em  $i$  incrementos. Assim o carregamento total é dado por:

$$\bar{\mathbf{F}} = \bar{\mathbf{F}}_0 + \sum_{j=1}^n \Delta \bar{\mathbf{F}}_j \quad (3.43)$$

Em que  $\Delta$  é usado para indicar o incremento infinitesimal, que será aplicado em  $i$  etapas sendo a carga final dada pelo incremento  $\Delta \bar{\mathbf{F}}_i$ . Adotando o mesmo procedimento para o deslocamento, tem-se que o deslocamento final é dado por:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \sum_{j=1}^n \Delta \mathbf{u}_j \quad (3.44)$$

Para computar cada incremento de deslocamento é usado um valor fixo de rigidez  $\mathbf{K}$ , que é avaliado no final do incremento anterior, conforme a seguir:

$$\mathbf{K}_{j-1} \mathbf{u}_j = \Delta \bar{\mathbf{F}}_j, \text{ para } j = 1, 2, 3, \dots, i \quad (3.45)$$

O procedimento incremental é esquematicamente indicado por meio da Figura 3.12.

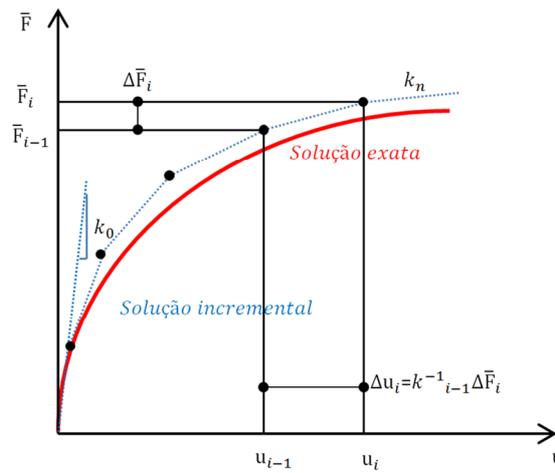


Figura 3.12 – Procedimento incremental básico de integração

O método incremental é análogo ao método numérico usado para a integração dos sistemas de equações lineares ou não-lineares, como o método de Euler e Runge-Kutta. A acurácia do método pode ser melhorada utilizando incrementos menores de carga, todavia, como a matriz de rigidez  $\mathbf{K}$  deve ser computada para cada passo, os esforços computacionais são aumentados.

O processo iterativo é baseado em um valor de referência, denominado erro, em que o processo é recalculado até que o erro seja aceitável. Essencialmente, esse método consiste em sucessivas correções para a solução que atenda à Equação de equilíbrio para a carga total  $\bar{\mathbf{F}}$  (Desai e Abel, 1972).

### 3.7. ESQUEMA DE INTEGRAÇÃO NO TEMPO

Os sistemas de equações diferenciais dependentes do tempo podem ser resolvidos por métodos numéricos diversos, como os métodos baseados na série de Taylor, método de Runge-Kutta e método de Newmark entre outros.

O método de Newmark é um dos mais versáteis e populares para solução de grandes sistemas de equações diferenciais de segunda ordem. Ele possui a vantagem de corrigir no mesmo instante,  $i$ , previsões feitas anteriormente, ou seja, trata-se de um método de integração explícito no tempo. Esse método, como vários outros métodos de integração, utiliza-se do truncamento da série de Taylor, entretanto, adiciona termos até o grau  $p$ , por meio de função polinomial, que minimiza o erro da aproximação numérica, que será apresentado a seguir.

O algoritmo GN22 (Newmark Generalizado aplicado ao problema de ordem dois a partir de polinômio quadrático), empregado nesta tese, é um caso especial do algoritmo generalizado de Newmark, no qual se tem a série de Taylor truncada até a segunda ordem e um polinômio de correção quadrático,  $p = 2$ , o mínimo requerido para solucionar problemas de segunda ordem. Descrevem-se a seguir os detalhes para o uso generalizado deste algoritmo. A expansão da Equação generalizada de Newmark para  $p = 2$  resulta nas seguintes equações:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{n+1} &= \mathbf{u}_n + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 (1 - \beta_2) \ddot{\mathbf{u}}_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 \beta_2 \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \\ \dot{\mathbf{u}}_{n+1} &= \dot{\mathbf{u}}_n + \Delta t (1 - \beta_1) \ddot{\mathbf{u}}_n + \beta_1 \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \end{aligned} \quad (3.46)$$

Onde  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são constantes adequadas.

Considerando as equações em (3.46) inseridas na Equação da dinâmica satisfeitas ao final do passo de tempo  $\Delta t$ , i.e., no tempo  $n+1$ , tem-se:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}_{n+1} + \mathbf{K} \mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{F}_{n+1} \quad (3.47)$$

Assim, torna-se possível relacionar os valores desconhecidos de deslocamento,  $\mathbf{u}_{n+1}$ , velocidade,  $\dot{\mathbf{u}}_{n+1}$ , e aceleração,  $\ddot{\mathbf{u}}_{n+1}$ , nos tempos futuros,  $n+1$ , com os valores conhecidos no tempo anterior,  $n$ , da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}_n + \Delta t (1 - \beta_1) \mathbf{C} \ddot{\mathbf{u}}_n + \beta_1 \Delta t^2 \mathbf{C} \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} + \mathbf{K} \mathbf{u}_n + \Delta t \mathbf{K} \dot{\mathbf{u}}_n \\ + \frac{1}{2} \Delta t^2 (1 - \beta_2) \mathbf{K} \ddot{\mathbf{u}}_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 \beta_2 \mathbf{K} \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} = -\mathbf{F}_{n+1} \end{aligned} \quad (3.48)$$

Reescrevendo a Equação (3.48) de forma que os termos que estão em tempo futuro fiquem separados dos que estão em tempo presente, obtém-se:

$$\begin{aligned}
& \left( \mathbf{M} + \beta_1 \Delta t^2 \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{2} \beta_2 \mathbf{K} \right) \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \\
& = \mathbf{F}_{n+1} - \mathbf{C}[\dot{\mathbf{u}}_n + \Delta t(1 - \beta_1)\dot{\mathbf{u}}_n] \\
& - \mathbf{K} \left[ \mathbf{u}_n + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 (1 - \beta_2) \ddot{\mathbf{u}}_n \right]
\end{aligned} \tag{3.49}$$

A partir da Equação (3.49) em que o termo entre parênteses do lado esquerdo da igualdade é representado por  $\mathbf{S}$ , e todo termo explícito do lado direito da igualdade representado por  $\bar{\mathbf{F}}_{n+1}$  tem-se a Equação(3.50), que pode ser escrita de forma condensada:

$$\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} = \mathbf{S}^{-1} \bar{\mathbf{F}}_{n+1} \tag{3.50}$$

Diante dessa expressão tem-se que um problema dinâmico regido pela Equação (3.47) pode ser solucionado utilizando-se o método de integração de Newmark do tipo GN22, dado que são conhecidos os valores iniciais  $\mathbf{u}_n$ ,  $\dot{\mathbf{u}}_n$  e  $\ddot{\mathbf{u}}_n$ , bem como as matrizes  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{K}$ . Assim, calculam-se os termos  $\mathbf{S}$  e  $\bar{\mathbf{F}}_{n+1}$  possibilitando-se obter  $\ddot{\mathbf{u}}_{n+1}$  que permite calcular por meio das equações em (3.46) os valores futuros de  $\mathbf{u}_{n+1}$  e  $\dot{\mathbf{u}}_{n+1}$ .

Anteriormente foi citado que o método do tipo GN22 usa além de um truncamento da série de Taylor um polinômio que minimiza o erro de aproximação da integração numérica. O polinômio para o GN22 tem grau dois em que são agregadas constantes denominadas constantes de Newmark, 1.e.2 cujos valores considerados razoáveis, descritos por Newmark, são  $\beta_1 = 1/2$  e  $\beta_2 = 1/4$ .

Com base no esquema de integração de Newmark pode-se escrever um algoritmo computacional para integração de equações diferenciais de segunda ordem de sistemas lineares descritos por sete passos básicos:

1. Dados do problema: matrizes  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$  e os vetores  $\mathbf{u}_0$  e  $\dot{\mathbf{u}}_0$ .

2. Inicialização:

$$\ddot{\mathbf{u}}_0 = \mathbf{M}^{-1} \{ \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}_0 + \mathbf{K} \mathbf{u}_0 + \mathbf{F}_0 \} \tag{3.51}$$

3. Incremento temporal:

$$n + 1 = n + \Delta t \tag{3.52}$$

4. Previsão:

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 (1 - \beta_2) \ddot{\mathbf{u}}_n \quad (3.53)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{n+1} = \dot{\mathbf{u}}_n + \Delta t (1 - \beta_1) \ddot{\mathbf{u}}_n$$

5. Equação de equilíbrio:

$$\bar{\mathbf{F}}_{n+1} = \mathbf{F}_{n+1} - \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}_{n+1} - \mathbf{K} \mathbf{u}_{n+1}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{M} + \beta_1 \Delta t^2 \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{2} \beta_2 \mathbf{K} \quad (3.54)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} = \mathbf{S}^{-1} \bar{\mathbf{F}}_{n+1}$$

6. Correção:

$$\mathbf{u}_{n+1} \leftarrow \mathbf{u}_{n+1} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \beta_2 \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \quad (3.55)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{n+1} \leftarrow \dot{\mathbf{u}}_{n+1} + \Delta t^2 \beta_1 \ddot{\mathbf{u}}_{n+1}$$

7. Critério de parada: ao atingir  $t_n$ .

O esquema acima deixa claro o benefício em se usar o artifício de uma matriz de massa concentrada (*lumped*), uma vez que sua inversão no passo 2, Equação(3.51) seria direta.

### 3.8. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO

Esta tese apresenta nova metodologia de dimensionamento de pavimento asfáltico. Para isso utiliza-se dos conceitos descritos como o método mecanicista de dimensionamento de pavimento asfáltico, índice internacional de irregularidade (IRI) e da previsão das forças dinâmicas atuantes sobre o pavimento frente às irregularidades.

Trata-se, portanto, de abordagem mais acurada de dimensionamento de pavimento asfáltico, tomando como referência as apresentadas nesse trabalho. O método de dimensionamento mecanicista tradicional, como o aplicado pela AASHTO (2002), pode ser descrito sucintamente, conforme apresentado por meio da Figura 3.13 em quatro etapas.

A primeira etapa é intitulada como entrada de dados. Ela mostra os dados que o projetista deve conhecer a priori, quais sejam o tráfego de veículos e o clima da região. Aquela informa a demanda de veículos trafegando sobre a pista no momento presentes e fornece a

possibilidade de estimar a futuro tráfego de veículos. Esta informa as condições climáticas em que será construído o pavimento e a variação da temperatura atuante.

A etapa seguinte diz respeito à escolha das espessuras das camadas do pavimento, bem como os materiais que compõem a rodovia, portanto, conhecendo-se os materiais e por meio de ensaios de campos e laboratoriais, é possível conhecer os parâmetros que serão usados para o cálculo de resposta do pavimento diante do carregamento estimado.

Admitindo que na terceira etapa, onde se avaliam deformação, tensão e deflexão máximas das camadas, segundo critérios pré-estabelecidos em normas técnicas, caso o pavimento supra os critérios normativos e passe no teste de verificação de desempenho, ou seja, supere o critério de ruptura, tem-se que o dimensionamento possui resposta satisfatória sendo considerado exequível. Caso contrário, deve-se retornar à segunda etapa e redimensionar o pavimento.

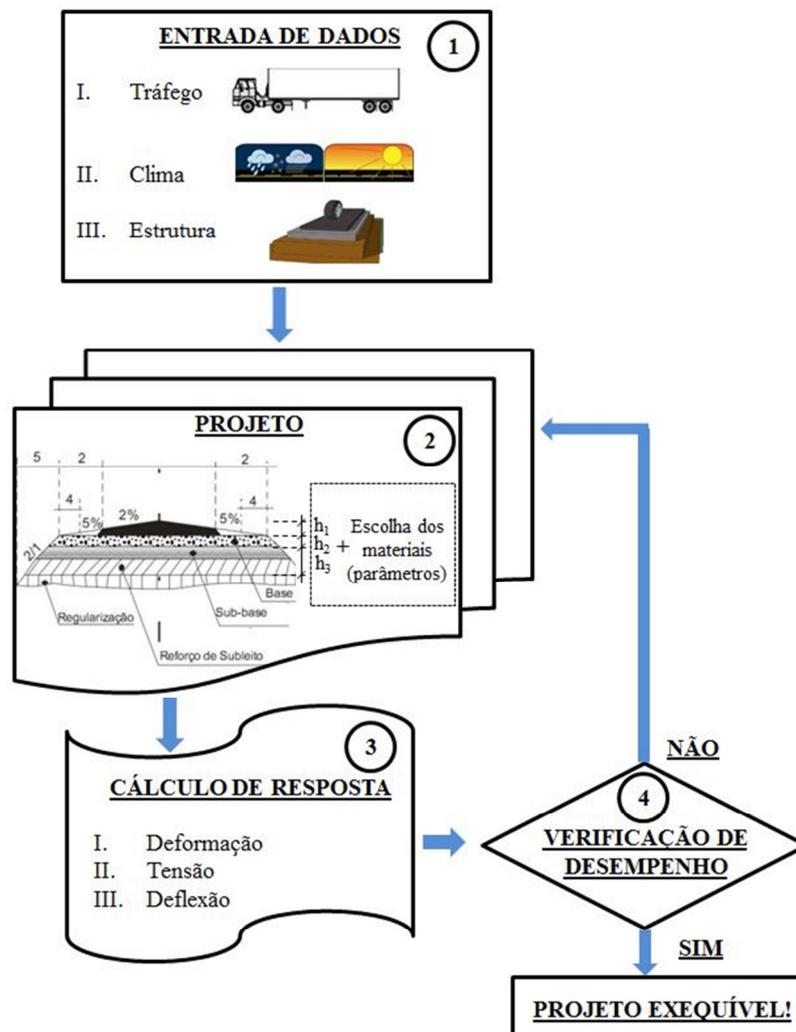


Figura 3.13 – Modelo mecanicista de dimensionamento de pavimento asfáltico

Nesta pesquisa, entretanto, sugerem-se duas outras etapas as quais se julga indispensáveis ao dimensionamento de pavimento asfáltico, a fim de torná-lo mais realista e eficaz ao longo do tempo. Trata-se de considerar os conceitos descritos ao longo desse capítulo, sendo eles, o método mecanicista-empírico, a consideração da irregularidade longitudinal do pavimento asfáltico e o carregamento dinâmico atuante no pavimento como critério de dimensionamento.

No método mecanicista tradicional e em outros métodos de dimensionamento no Brasil, admite-se que o pavimento não possui irregularidades, tampouco os efeitos do carregamento dinâmico diante das irregularidades, capazes de magnificar o carregamento sobre o pavimento e, por conseguinte, provocar desgaste precoce ou reduzir a vida útil do pavimento.

Desta forma, entende-se que a metodologia a ser aplicada ao dimensionamento de pavimento deve considerar um item a mais na primeira etapa e uma etapa a mais no procedimento.

As modificações sugeridas são apresentadas no diagrama representado por meio da Figura 3.15. Assim, deve-se admitir na primeira etapa, entrada de dados, que o pavimento possui irregularidades inerentes do processo executivo ou decorrente do uso e das intempéries ao longo de sua vida útil.

Esse valor pode ser estimado diretamente por meio de análise das irregularidades de pavimentos cujas características sejam semelhantes ou por meio dos estudos existentes, como os descritos por Sayers e Karamihas, (1997), apresentado pela Figura 3.14.

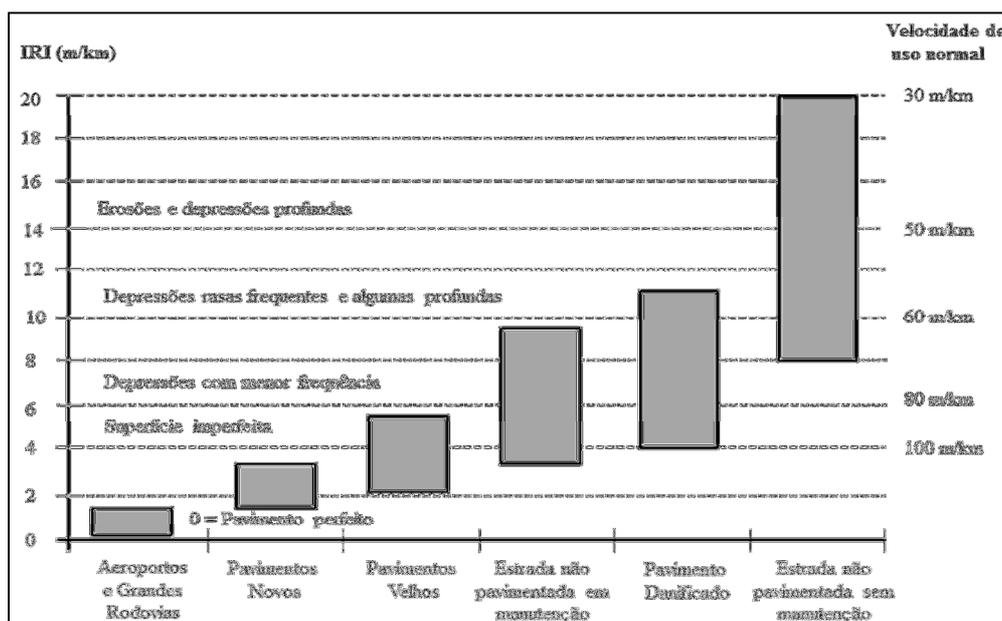


Figura 3.14 – Variação de IRI em função do tipo de pavimento e velocidade do veículo

Quanto ao cálculo dos esforços dinâmicos têm-se, por meio da simulação que utiliza o modelo quarto de carro, os valores das forças dinâmicas decorrentes do tráfego de veículo sobre pavimentos cujas condições refletem índices internacionais de irregularidade (IRI), conforme foi apresentado na Figura 3.14. Neste trabalho apresenta-se o cálculo dos esforços atuantes sobre o pavimento com irregularidades longitudinais diversas no Capítulo 5.

A partir dos comentários anteriores apresenta-se a Figura 3.15, a qual descreve a inserção do item IRI na primeira etapa admitida no método de dimensionamento.

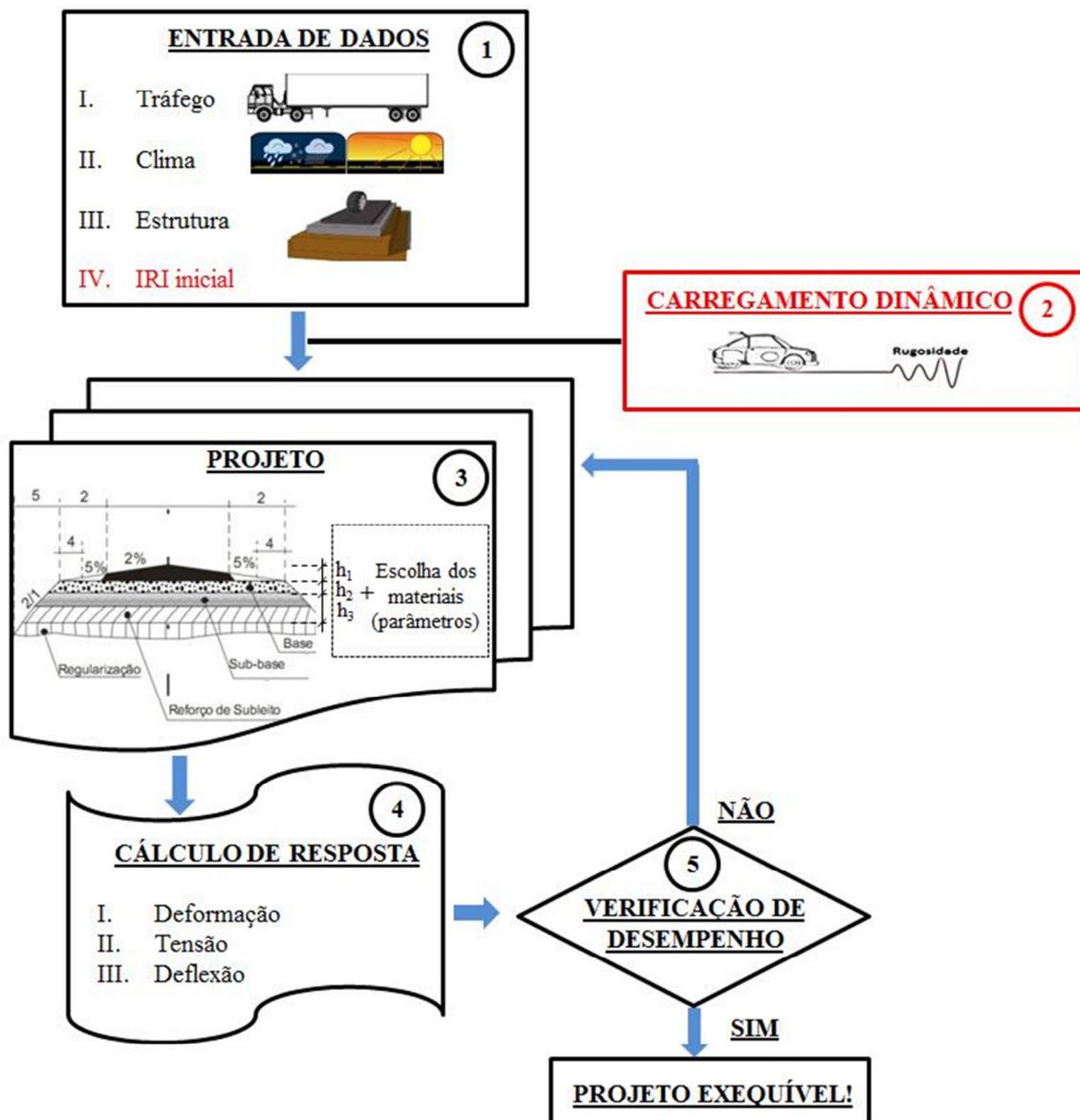


Figura 3.15 – Modelo mecanicista modificado de dimensionamento de pavimento asfáltico

A metodologia de dimensionamento modificada, apresentada de acordo com a Figura 3.15 é descrita detalhadamente a partir dos tópicos abaixo.

### 3.9. CARACTERÍSTICAS INICIAIS PARA O DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

A primeira etapa do método de dimensionamento é a coleta de dados, conforme observado na Figura 3.15, divididos em quatro tópicos principais, quais sejam: Tráfego, Clima, Estrutura e IRI inicial.

Sobre a influência do estudo de tráfego e do clima com a relação à deterioração do pavimento, Balbo (2007) explica que os materiais durante a sua vida de serviço apresentam processo de degradação que implica na alteração de suas propriedades. As mudanças são em virtude do carregamento dos veículos, produtos químicos e ações ambientais, como temperatura e umidade. Todos esses agentes são responsáveis pelo processo de ruptura ou do fim da vida útil do pavimento. A Figura 3.16 mostra que tanto o clima quanto o carregamento agem destruindo o pavimento até a sua ruptura ou até o estágio de recuperação. Assim, o modelo de dimensionamento deve levar em consideração os efeitos do tráfego e da ação do intemperismo sobre o pavimento de forma que a sua durabilidade seja próxima à prevista em projeto.

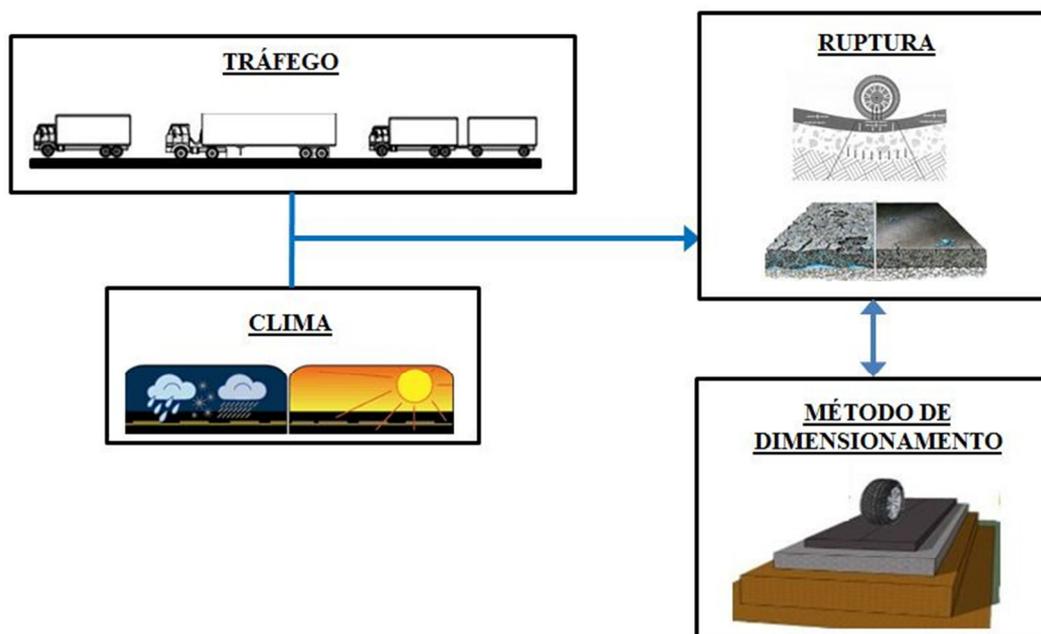


Figura 3.16 – Agentes atuantes sobre o pavimento asfáltico

Como observado por meio da Figura 3.16, para que o método de dimensionamento seja concebido é necessário associá-lo a um mecanismo de ruptura e a um critério mínimo de aceitabilidade. Quando o critério de ruptura é vinculado ao tráfego de veículos, ele pode ser por resistência ou por fadiga.

A ruptura por resistência ocorre quando os materiais utilizados para compor as camadas de pavimento apresentam resistências características inferiores aos esforços solicitantes de cada camada ou do seu conjunto. Nos métodos clássicos de dimensionamento por resistência, como o Método do DNIT (Souza, 1966), a principal preocupação é a determinação de uma espessura total do pavimento de modo a proteger o subleito contra ruptura por cisalhamento. Entretanto, estes métodos não fazem uso direto de parâmetros clássicos de resistência ao cisalhamento, como a coesão e o ângulo de atrito do critério de Mohr-Coulomb. A resistência do subleito e de outras camadas seria assegurada indiretamente por meio de valores mínimos de índices de suporte (IS) como o Índice de Suporte Califórnia, ISC (ou CBR, *California Bearing Ratio*, em inglês). A resistência à ruptura por fadiga foi conceituado no capítulo 2 como a resistência das misturas asfálticas em suportar carregamentos repetidos à flexão sem que trincas se desenvolvam. O modelo que utiliza esse conceito de ruptura admite que as camadas de revestimento asfáltico, base e sub-base trabalham em flexão e ficam sujeitas aos esforços de tração na flexão. Esse tipo de ruptura será utilizado no modelo desenvolvido nesta pesquisa, sendo discutida em outro tópico desse capítulo.

A partir dos conceitos dos tipos de ruptura devido ao carregamento dos veículos sobre o pavimento, torna-se clara a importância do estudo de tráfego e do conhecimento das cargas atuantes sobre ele a fim de se prever a durabilidade do pavimento.

Os veículos comerciais rodoviários são os que interessam ao dimensionamento do pavimento, já que os leves provocam danos insignificantes às estruturas se comparados aos veículos pesados. A partir do estudo de tráfego, que fornece a estimativa do quantitativo de veículos que trafegam sobre a rodovia e os classifica ainda quanto ao número de eixos, é possível dimensionar o pavimento para que a durabilidade da rodovia atenda ao determinado em projeto. Portanto, a entrada de dados do item tráfego equivale na conversão do tráfego estimado em número de passadas do caminhão tipo toco.

Balbo (2007) explica que a atuação diária e sazonal do clima não apenas implica alterações momentâneas na resposta estrutural dos pavimentos, como também e principalmente modifica as características dos materiais, o que implica na destruição mais rápida do pavimento. Ele classifica também que os agentes do intemperismo mais agressivos ao pavimento são a radiação solar e a precipitação.

O terceiro tópico, estrutura, que consta na primeira etapa, entrada de dados, é relativo à distribuição das camadas de pavimento. Elas são combinadas de forma a distribuir os esforços atuantes sobre o pavimento, gerar conforto ao usuário, suportar a repetição das solicitações sobre o pavimento ao longo do tempo e tornar a estrutura economicamente viável.

Esta pesquisa utiliza-se da distribuição do pavimento em três camadas, sendo elas, camada asfáltica, base e subleito, configuração bastante utilizada na construção de pavimentos. Sabe-se, contudo, que essa configuração pode ser alterada com adição de camadas intermediárias, buscando soluções mais estáveis ou economicamente viáveis. Contudo, a fim de simplificar as variáveis do problema a ser estudado, admite-se apenas esta configuração nesta pesquisa.

A adoção de IRI inicial como critério de dimensionamento de projeto é a última das variáveis listadas na primeira etapa, entrada de dados. Trata-se de uma sugestão e inovação dessa pesquisa que pretende trazer característica observada em pavimentos novos e velhos, a irregularidade longitudinal, representada pelo índice IRI. A adoção do valor de IRI admite que a pista tenha um defeito sistêmico médio equivalente ao valor adotado de IRI. Em pavimentos novos o defeito pode ser proveniente do próprio processo de execução, em pavimentos velhos que se encontram rompidos ou em fase de manutenção a irregularidade pode ser decorrente de sobrecarga na pista, excessiva deformação das camadas do pavimento, ação do intemperismo entre outras. Ao se adotar o IRI como dado inicial do dimensionamento, tem-se instantaneamente o aumento da magnitude da força atuante sobre o pavimento. Como consequência, o carregamento dinâmico atuante sobre o pavimento é aumentado em decorrência das irregularidades e, por conseguinte, a vida de fadiga a que o pavimento teria em condições de pista sem irregularidade seria reduzida.

Diante dessa hipótese foi construída esta pesquisa. Dessa forma, entende-se que se deve criar a relação IRI versus carregamento dinâmico máximo permitindo que para vários valores de IRI se tenha a força atuante correspondente que representaria, de forma que seja gerada uma gama de valores de IRI com correspondências para os valores de força. Assim, ao se dimensionar o pavimento, poder-se-ia basear em um valor de referência de IRI para se escolher qual seria a força a ser aplicada sobre o pavimento.

Portanto, o cálculo do IRI e os conceitos que envolvem esse índice foram apresentados no capítulo 2. Neste capítulo introduz-se o conceito do índice IRI com nova abordagem, aqui ele

é introduzido como um parâmetro inicial de dimensionamento do pavimento como descrito acima.

Os elementos que compõem a primeira etapa do dimensionamento foram descritos nesse tópico. Com vistas ao escopo desta pesquisa, a influência do clima sobre a vida útil do pavimento não foi abordada de forma completa, embora se saiba que ela tem a mesma importância que as demais, contudo outras bibliografias detalham amplamente o tema os quais esgotam o assunto.

### **3.10. PROJETOS DE DIMENSIONAMENTO PRÉVIO DO PAVIMENTO**

Um dos fatores mais relevantes no dimensionamento de pavimento é o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas do material. Para isso estão disponíveis vários testes que fornecem os parâmetros dos materiais. A forma como são obtidos os parâmetros dos materiais utilizados no pavimento fogem do escopo desse trabalho, outros autores como Mello, Balbo, Huang entre outros discutem amplamente o tema.

Nesta pesquisa são arbitrados para os materiais valores típicos para os parâmetros que representam o modelo elástico linear, portanto, módulo de elasticidade,  $E$ , e coeficiente de Poisson,  $\nu$ . Esses valores são valores típicos observados em pavimentos, sendo citados nos trabalhos acima e em diversas bibliografias.

Ressalta-se, contudo, que a prática recorrente para o uso de material na construção do pavimento é a utilização de ensaios laboratoriais e de campo. Aqui, como se tem a determinação genérica de nova metodologia de dimensionamento, os parâmetros a serem adotados, embora representativos, são meramente ilustrativos.

Sabe-se ainda que os parâmetros dos materiais, a solicitação sobre o pavimento, a busca por fazer as camadas do pavimento duráveis e economicamente viáveis determinam as alturas de cada camada. Esse processo é iterativo, conhecendo-se os parâmetros do material são arbitradas as alturas de cada camada. Verifica-se, então, se os critérios de resistência, conforto e custo desejados são atendidos, em caso afirmativo tem-se o pavimento dimensionado. As estimativas iniciais das alturas das camadas do pavimento asfáltico são baseadas em pesquisas amplamente divulgadas e em manuais de pavimentação. Essa etapa, que corresponde à terceira etapa descrita na metodologia apresentada no capítulo 2, é fundamental para o

dimensionamento do pavimento, porém segue a forma convencional de dimensionamento das camadas de outras metodologias, portanto, não foi discutida neste trabalho.

### **3.11. CÁLCULO DE RESPOSTA E VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO**

Foi mencionado no tópico anterior o processo iterativo de escolha das alturas das camadas do pavimento, o qual deve satisfazer, ao fim de cada iteração, alguns critérios, dentre eles o deslocamento máximo no topo do pavimento.

Outro requisito de projeto, a vida de fadiga, também deve ser avaliada a cada iteração, sendo necessário, para isso, calcular as tensões e deformações na base do revestimento e no topo do subleito, locais em que são avaliadas a vida de fadiga.

Essa avaliação é denominada nesta pesquisa como cálculo de resposta. Os requisitos para a resolução do problema iterativo são obtidos por análise numérica. O dimensionamento das alturas do pavimento, problema a ser resolvido, é simulado arbitrando inicialmente as alturas das camadas, a carga dinâmica aplicada sobre o pavimento, que representa o tráfego estimado, e os parâmetros dos materiais, obtidos por meio de ensaios de campo e laboratoriais. Essa etapa equivale à penúltima etapa do processo de dimensionamento. A ferramenta numérica denominada método dos elementos finitos será descrita adiante. O problema a ser resolvido iterativamente, descrito nesse parágrafo, é explanado no Capítulo 6.

A última etapa, denominada de verificação de desempenho, é a confirmação mediante testes experimentais de que o planejamento das etapas anteriores atendeu aos requisitos de projeto.

Pode-se reafirmar que para que a metodologia aqui apresentada seja usada de forma abrangente devem-se considerar as características locais recalibrando os dados de entrada da metodologia. Ao mesmo tempo para que se possa iniciar o dimensionamento a partir de um valor de referência, ou tomando uma faixa de valores, admite-se a variação do IRI considerando-se que para rodovia perfeitamente suave tem-se *IRI* igual a zero, enquanto que em rodovias onde há severas irregularidades, o *IRI* tem valor aproximado de 6m/km.

A título de curiosidade existe valor de interferência para a manutenção dos pavimentos, o qual varia de acordo com os critérios de cada país. Por exemplo, os EUA admitem esse valor como 2,7 m/km, no Brasil, Chile, Uruguai e Espanha, 4,0 m/km e em Honduras, 6,0 m/km.

Por fim, embora não esteja no escopo desta pesquisa, é necessário que se tenha em mente que para pavimentos de aeroportos e ferrovias devem-se considerar os mesmo efeitos sugeridos para pavimentos asfálticos rodoviários, no que tange ao dimensionamento, haja vista que ambos estão sujeitos a irregularidades e carregamentos dinâmicos.

# Capítulo 4

## 4. AS FERRAMENTAS NUMÉRICAS E SUAS VALIDAÇÕES

Neste capítulo introduzem-se os aspectos relevantes sobre os programas usados nesta pesquisa, assim como suas respectivas validações. Nesta tese, os programas utilizados foram o MechSys e o Matlab/Simulink. O primeiro engloba diferentes métodos para resolução de equações diferenciais parciais que representem problemas de engenharia, tais como o método dos elementos finitos e o método dos elementos discretos entre outros. Nesta pesquisa utiliza-se o método dos elementos finitos para o cálculo do estado de tensão no maciço de solo.

O Matlab/Simulink é capaz de resolver o sistema de equações, para isso utiliza-se de blocos que têm funções específicas, pré-programadas. Trata-se, portanto, de sistema utilizado para resolução de grande gama de problemas de forma simples e integrada com as funções do Matlab. Nesta pesquisa ele foi utilizado para calcular os esforços dinâmicos gerados pela passagem de um quarto de carro sobre o pavimento com irregularidades diversas.

### 4.1. A FERRAMENTA NUMÉRICA MECHSYS

O MechSys é composto de várias bibliotecas as quais são responsáveis por partes específicas da montagem e resolução de problemas usando o método dos elementos finitos entre outros. As várias bibliotecas funcionam a partir de um conjunto de comandos ou rotina que pode ser facilmente construído, permitindo ao usuário maior flexibilidade na montagem do problema, já que podem ser inseridas funções diversas que representem a forma de aplicação das condições de contorno, bem como construções condicionais dentre outras. As rotinas evocam outras na linguagem C++ agrupadas nas bibliotecas do Mechsys, também escritas em linguagem de programação do tipo C++, as quais são utilizadas ao longo da definição do problema e de sua resolução.

O Mechsys é capaz de resolver problemas diversos, como problemas de fluxo, equilíbrio estático e agora equilíbrio dinâmico. Os métodos dos elementos finitos e dos elementos

discretos são os dois métodos que possuem mais recursos. Outros métodos como Lattice Boltzmann vêm sendo implementados. Para simular o comportamento dos materiais estão disponíveis modelos constitutivos do tipo elástico linear, elástico perfeitamente plástico (Von-Mises), e elastoplástico (Camclay). Trata-se de um programa cujo código é livre, permitindo que pesquisadores de diversas universidades possam usá-lo, bem como desenvolvê-lo concomitantemente. Esse programa, que foi desenvolvido a partir dos trabalhos de Pedroso (2006) e Durand (2008), está sendo conduzido pelo pesquisador Dorival de Moraes Pedroso e seu grupo de pesquisa na universidade de Queensland, Austrália. Maiores detalhes sobre o uso do MechSys são descritos nos trabalhos de Pedroso (2006) e Durand (2008), bem como no site *mechsys.nongnu.org*. A seguir é apresentada a descrição de uma rotina típica do MechSys.

A estrutura abaixo apresenta uma função de aplicação do carregamento cíclico ao longo do tempo, dada por uma função do tipo “*haversine*”. No MechSys é possível aplicar as condições naturais ou essenciais do problema, utilizando-se de um valor fixo ou de uma função que descreva o comportamento de uma carga ou do deslocamento ao longo do tempo.

```
double Multiplier (double t)
{
    double func = sin(pi/2.0+pi*t/r); // function to multiply sin squared
    return func*func; // Haver sin function
}
```

A geometria do problema e a discretização da malha é entrada em blocos de informações, como no exemplo a seguir. É necessário definir um nome para o arquivo de saída ("mesh\_rep\_15", no exemplo) onde serão gravadas as informações sobre a malha e as condições de contorno para futura visualização.

```
Array<Mesh::Block>blks(2);
blks[0].Set (/*NDim*/2, /*Tag*/-1, /*NVert*/4,
            0., 0.00, 0.00,
            0., 1.20, 0.00,
            0., 1.20, 5.00,
            0., 0.00, 5.00, -12.,0.,0.,-11.);
blks[0].SetNx (2);
blks[0].SetNy (2);
```

```

blks[1].Set (/*NDim*/2, /*Tag*/-2, /*NVert*/4,
            0., 1.20, 0.00,
            0., 1.40, 0.00,
            0., 1.40, 5.00,
            0., 1.20, 5.00, -12.,0.,0.,0.);
blks[1].SetNx (2);
blks[1].SetNy (2);
Mesh::Structured mesh(/*NDim*/2);
mesh.Generate (blks,/*O2*/true);
mesh.WriteMPY ("mesh_rep_15", /*withtags*/false, /*withids*/true);

```

No exemplo acima encontram-se marcas ou “tags”, as quais são utilizadas no Mechsys para complementar a definição do problema, com informações tais como tipo de problema, condições de contorno, tipos e propriedades dos elementos etc. As “tags” obedecem ao seguinte critério: valores unitários, como -1, são usados para elementos; valores de ordem decimal, como -10, são usados para as bordas dos blocos; e valores centesimais, como -100, são usados para os nós.

O exemplo a seguir mostra o uso das “tags” (-1 e -2, no bloco anterior) para anexar ao bloco de informações originais o tipo de análise (deformação plana, axissimétrico, tridimensional), o tipo de problema (equilíbrio ou fluxo) e o tipo de elemento a ser utilizado (triangular de 3 ou 6 nós, quadrilátero de 4 nós ou 8 nós, entre outros). No caso abaixo “psa” identifica um problema de deformação plana, “Equilib” um problema de equilíbrio, “Quad8” o uso de elementos quadriláteros de oito nós. O usuário determina de acordo com o problema a proporção do amortecimento, inserindo na rotina os valores de DampAm e DampAk para cada camada, ou seja, os coeficientes ( $\alpha_m$  e  $\alpha_k$ ) do método de Rayleigh Ritz. No caso de o usuário optar por um sistema sem amortecimento, os coeficientes devem ter valores aproximadamente iguais a zero.

```

// elementsproperties
double TRUE = 1.0;
Dictprps;
prps.Set(-1, "probgeom activepsa rho DampAm DampAk", PROB("Equilib"),

```

```
GEOM("Quad8") 23.0, 0.0000000001, 0.0000000001);
```

```
prps.Set(-2, "probgeom activepsa rho DampAm DampAk", PROB("Equilib"),
```

```
GEOM("Quad8") 23.0, 0.0000000001, 0.0000000001);
```

Utilizando as “tags” (-1 e -2) são adicionados aos blocos o modelo constitutivo (elástico linear, elastoplástico) e seus respectivos parâmetros onde devem constar de unidades compatíveis. No módulo abaixo, o modelo elástico linear (“LinElastic”) está associado ao bloco 0 por meio da tag -1 e o modelo elastoplástico de von Mises (“ElastoPlastic”) está associado ao bloco 1 por meio da tag -2, com seus respectivos valores de parâmetros.

#### // models

```
Dictmdls;
```

```
mdls.Set(-1, "name E nu psa", MODEL ("LinElastic"), 31000000.0, 0.25, );
```

```
mdls.Set(-2, "name E nu sY psa", MODEL ("ElastoPlastic"), 200000.0, 0.30, 500.0);
```

O usuário pode utilizar as “tags” para determinar para cada bloco de elementos o estado inicial de tensão, para as direções x, y, z além das tensões cisalhantes.

#### // initial values

```
Dictinis;
```

```
inis.Set(-1, "sxsyszsy", 0.0,0.0,0.0,0.0);
```

```
inis.Set(-2, "sxsyszsy", 0.0,0.0,0.0,0.0);
```

O usuário pode determinar, conforme expresso na rotina abaixo, que os dados relativos a alguns nós sejam disponibilizados. Assim o usuário poderá plotar as relações das grandezas como força, deslocamento, tempo ou qualquer outra que for conveniente à análise dos resultados.

#### // select some nodes for output

```
Array<int>out_nods(332,197);
```

A seguir são determinadas todas as características dos elementos que compõem o domínio. São elas a malha, as propriedades, o modelo e os valores iniciais de tensão nos elementos.

#### // domain

```
FEM::Domain dom(mesh, prps, mdls, inis, /*filekey*/"mesh_rep", &out_nods);  
dom.MFuncs[-21] = &Multiplier; // set database of callbacks
```

Abaixo rotina descreve a forma como o “*solver*” é utilizado. O usuário deve determinar o esquema de integração do sistema de equações diferenciais parciais que compõem o problema de equilíbrio dinâmico. Nesse caso, tem-se a opção de escolher entre o esquema de integração para problemas estáticos ou dinâmicos, nos problemas descritos nesse trabalho utiliza-se o esquema de integração dinâmico dado pelo algoritmo Generalizado de Newmark do tipo GN22.

Ao problema dinâmico podem ser acrescentados os efeitos do amortecimento. Diante da dificuldade de se obter as viscosidades do material, o Mechsys considera o amortecimento como uma combinação linear das matrizes de rigidez e de massa aplicadas a todo domínio.

#### // solver

```
FEM::Solver sol(dom);  
sol.DScheme = FEM::Solver::GN22_t;  
sol.DampTy = FEM::Solver::Rayleigh_t;
```

Os trechos descritos anteriormente definem o problema. No estágio a seguir o problema começa a ser resolvido: aplicam-se efetivamente as condições de contorno, é definido o *solver* do tipo dinâmico, determinam-se o tempo final o incremento,  $\Delta t$ .

#### // stage # 1

```
Dictbcs;  
bcs.Set(-11, "ux", 0.0);  
bcs.Set(-12, "uxuy", 0., 0.0);  
bcs.Set(-21, "qnmfunc", -32., 0.0);  
dom.SetBCs (bcs);  
sol.DynSolve (/*tf*/0.012, /*dt*/0.0001, /*dtOut*/0.0002, "mesh_rep_15");  
dom.WriteVTU ("mesh_rep_15");
```

#### 4.1.2. VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA NUMÉRICA MECHSYS

Apresentam-se a seguir três análises numéricas utilizando o MechSys, que representam parte de uma série de problemas típicos de dinâmica, os quais foram retirados da bibliografia e se prestam para validar os algoritmos numéricos implementados no programa de elementos finitos do MechSys. Além dos problemas apresentados a seguir, outros problemas, incluindo os de equilíbrio dinâmico, estático e fluxo, considerando análises do tipo tridimensionais, tensão plana, deformação plana e axissimétrica para diferentes condições de contorno e diferentes domínios foram testadas a partir de problemas encontrados em diversas bibliografias e cadastrados no programa sendo facultativo ao usuário a qualquer tempo rodar todos eles por meio de uma rotina denominada de teste.

As informações concernentes aos problemas analisados serão apresentadas de forma objetiva quando se descrevem as condições de contorno dos problemas, os valores iniciais utilizados, o modelo e seus respectivos parâmetros, bem como o comparativo de resultados obtidos pelo MechSys com os resultados da bibliografia. Ressalta-se que toda teoria apresentada nos capítulos anteriores, em especial nos capítulos 3 e 4, fomentam os algoritmos implementados no programa MechSys.

O primeiro problema é relativo a uma treliça submetida a um carregamento cíclico, descrito por Bhatti (2005). Nesse problema é considerada uma relação constitutiva do tipo elástica linear, normalmente assumida em problemas que envolvem barras isoladas ou treliças. O problema é esboçado pela Figura 4.1 cujas unidades são dadas em metros.

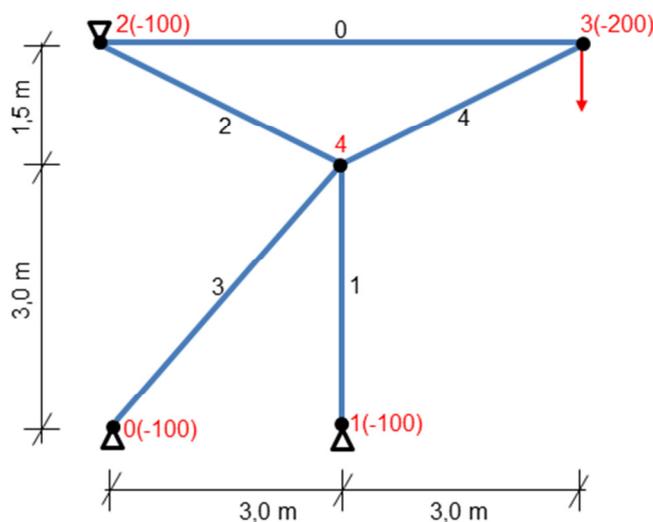


Figura 4.1 – Representação dos elementos de uma treliça e das condições de contorno

A Figura 4.1 apresenta uma treliça plana composta por 5 nós e 5 barras sendo que os nós 0, 1 e 2 têm seus movimentos restritos nas direções horizontal e vertical enquanto os nós 3 e 4 estão livres para se mover.

No nó 3 é aplicada uma carga cíclica equivalente a uma função senoidal  $f(t)$ . Os números negativos (-100, -200) que aparecem na Figura 4.1 são “tags” utilizados pelo MechSys. Tal recurso normalmente é utilizado para impor as condições de contorno e as propriedades dos materiais nos nós, arestas, elementos e em faces.

Todas as barras possuem área,  $A = 8,06 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$ , peso específico do material igual a  $7849,05 \text{ kgf/m}^3$  e módulo de elasticidade,  $E = 2,07 \cdot 10^8 \text{ kPa}$ . A treliça ainda suporta uma máquina giratória no nó 3 que equivale a  $0,897 \text{ kN}$ , que aplica uma força harmônica dada pela função,  $f(t) = 100 \cdot \cos(7\pi t)$ .

Na Figura 4.2 a relação deslocamento versus tempo para o nó 3 da treliça, local da aplicação do carregamento cíclico, é plotado juntamente com o valor de referência dado por Bhatti (2005), atestando a acurácia do algoritmo implementado no Mechsys.

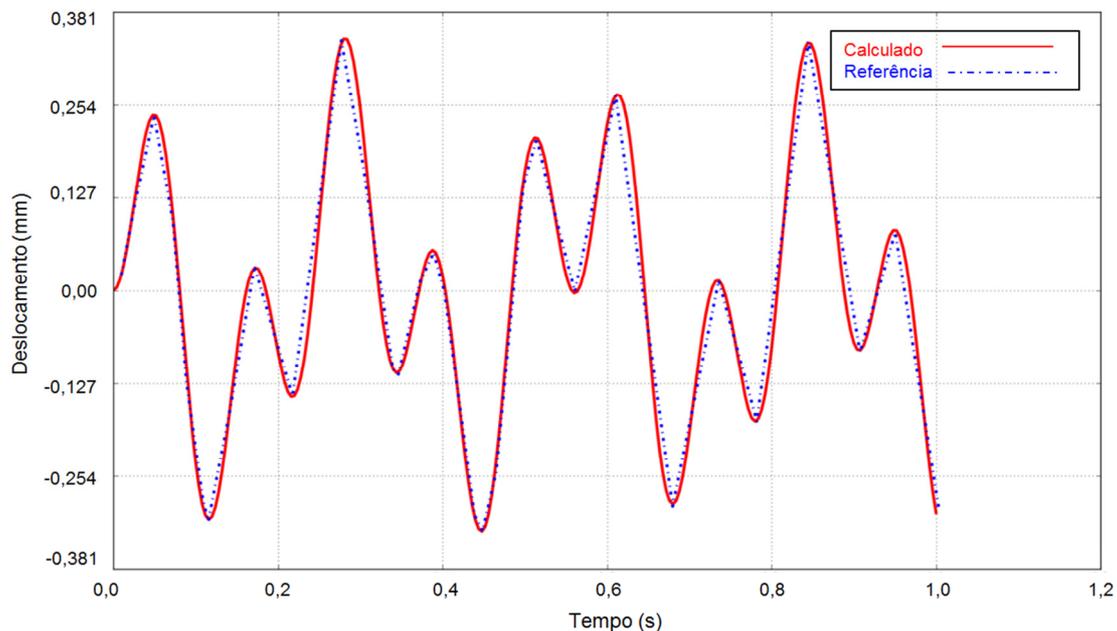


Figura 4.2 – Deslocamento versus tempo do nó 3 quando submetido ao carregamento cíclico

O segundo problema é relativo a uma viga engastada na qual é aplicada, na sua extremidade livre, um carregamento cíclico dado por uma força representada por uma função  $f(t) = 100 \cdot \cos(wt)$  onde  $w = 0.3$ . A Figura 4.3 apresenta a geometria da viga, os parâmetros constitutivos, bem como as suas condições de contorno. Tem-se para o problema uma análise

numérica para um material cujo comportamento foi assumido Elástico Linear e em deformação plana. Para resolver esse problema foi utilizada uma malha estruturada retangular de 8 nós, igual à utilizada no trabalho de referência de Griffiths e Smith (2006).

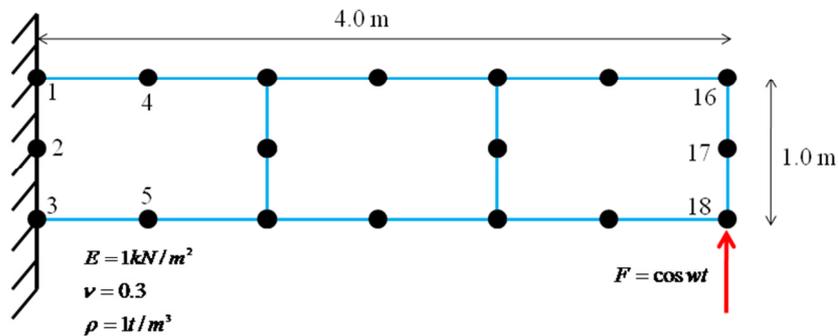


Figura 4.3 – Representação de um problema dinâmico, elementos quadrangulares de 8 nós

A seguir é apresentada a comparação entre o resultado obtido por Griffiths e Smiths (2006) e o programa MechSys, para o nó 17, relacionando o tempo e o deslocamento vertical. Os resultados mostram a acurácia do algoritmo utilizado no MechSys, haja vista a proximidade dos resultados apresentados pela Figura 4.4

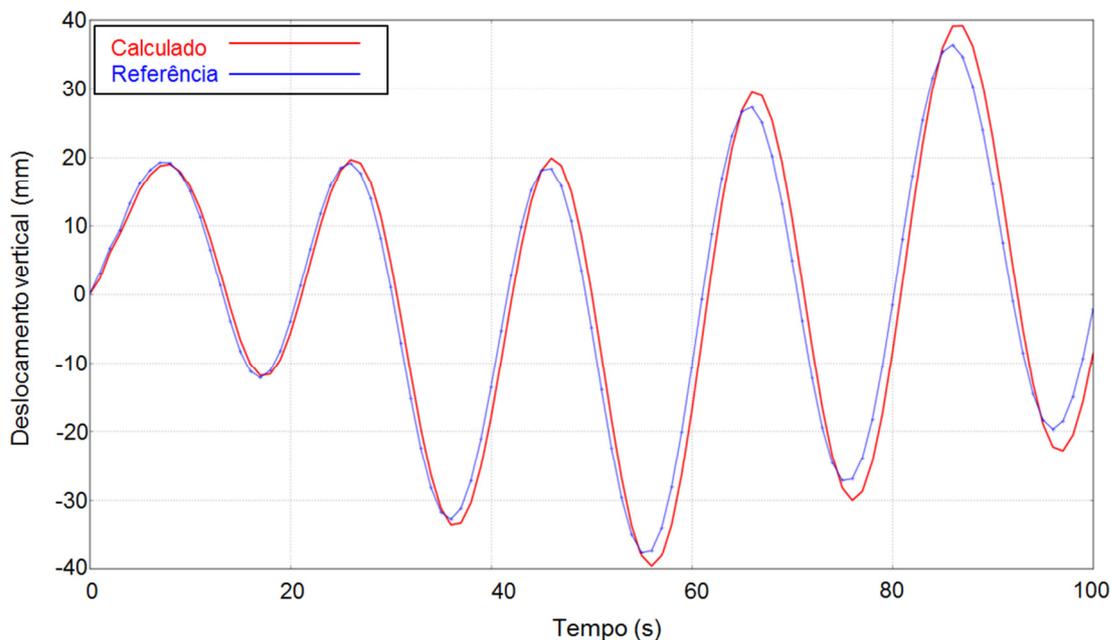


Figura 4.4 – Deslocamento versus tempo do nó 17 quando submetido ao carregamento cíclico

O terceiro problema é relativo a uma viga biapoiada na qual é aplicada no seu topo ao longo de todo comprimento, uma carga de impacto distribuída e instantânea. A Figura 4.5 apresenta a geometria da viga, bem como as suas condições de contorno, apresentadas para toda a viga e

para um quarto dela. O presente exemplo foi apresentado por alguns autores dos quais se cita Owen e Hinton (1980) e Griffiths e Smith (2006).

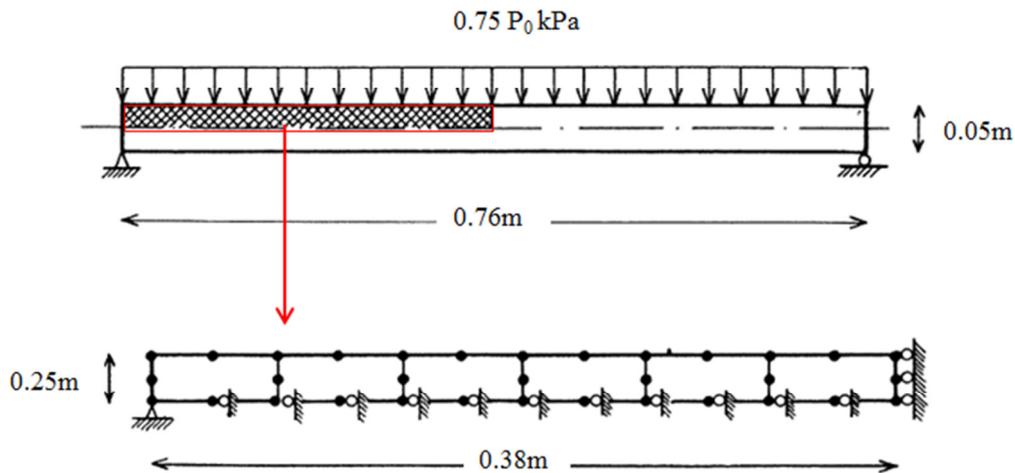


Figura 4.5 – Viga biapoiada e as respectivas condições de contorno aplicadas

Esse problema admite um comportamento não linear para o material, de forma que o comportamento foi simulado com o modelo elástico perfeitamente plástico de Von Mises, conforme apresentado por Griffiths e Smith (2006). Para isso são fornecidos os parâmetros denominados módulo de elasticidade,  $E$ , coeficiente de Poisson,  $\nu$ , peso específico do material,  $\rho$ , e o limite de resistência do material,  $\sigma_y$ , tensão a partir da qual o material plastifica, passando a apresentar deformações irreversíveis. Os parâmetros assumem os seguintes valores para esse problema,  $E = 3 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $\rho = 7,33 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$  e  $\sigma_y = 5 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ .

Na Figura 4.6 em que é plotado o deslocamento versus o tempo apresenta-se a comparação entre o resultado obtido pelo programa MechSys e as soluções de origem dadas por Griffiths e Smith (2006), mostrando a acurácia do algoritmo utilizado no MechSys.

Verificada a eficácia do módulo dinâmico do MechSys para problemas quando o comportamento do material é do tipo linear elástica e para problemas em que o comportamento do material é elástico perfeitamente plástico, portanto, não linear. Desta forma, admite-se a ferramenta verificada e pronta para a resolução de problemas com características de aplicação do carregamento e de comportamento do material similares às validações feitas.

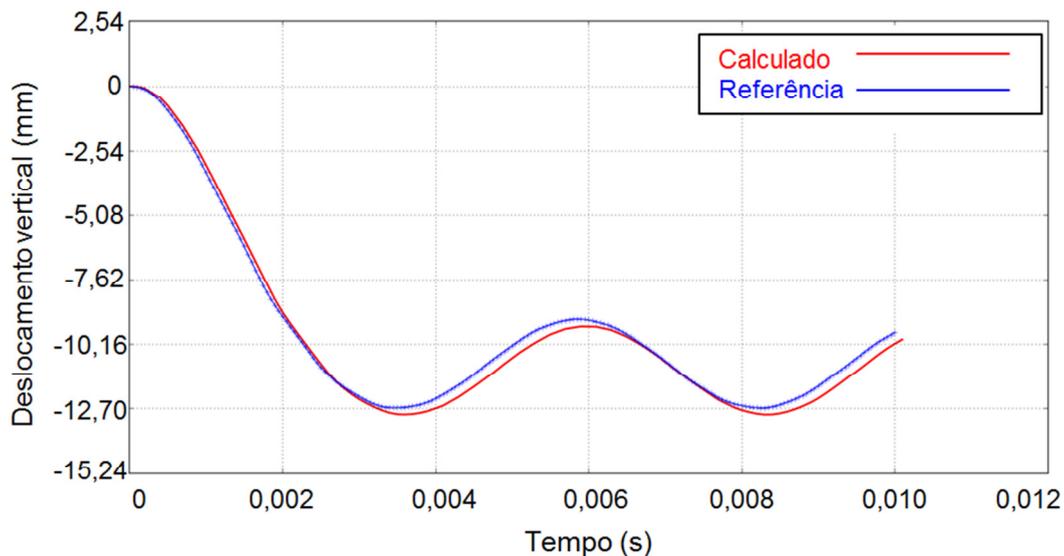


Figura 4.6 – Resultado do deslocamento vertical no tempo para diferentes algoritmos

## 4.2. A FERRAMENTA NUMÉRICA MATLAB/SIMULINK

O Simulink é um programa utilizado para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Esse programa é diretamente acoplado ao MATLAB e foi utilizado nesta pesquisa. O programa se aplica a sistemas lineares e não-lineares, contínuos e/ou discretos no tempo. Para isso o Simulink disponibiliza uma interface gráfica em que o usuário constrói o modelo a partir de diagramas em blocos, através de operações de clique-e-arraste do mouse. Cada bloco representa uma operação matemática de entrada e saída e são organizados em bibliotecas contendo fontes, visualizadores, componentes lineares, não-lineares e conectores, com a opção de criação ou personalização de blocos, conforme ilustrado na Figura 4.7.

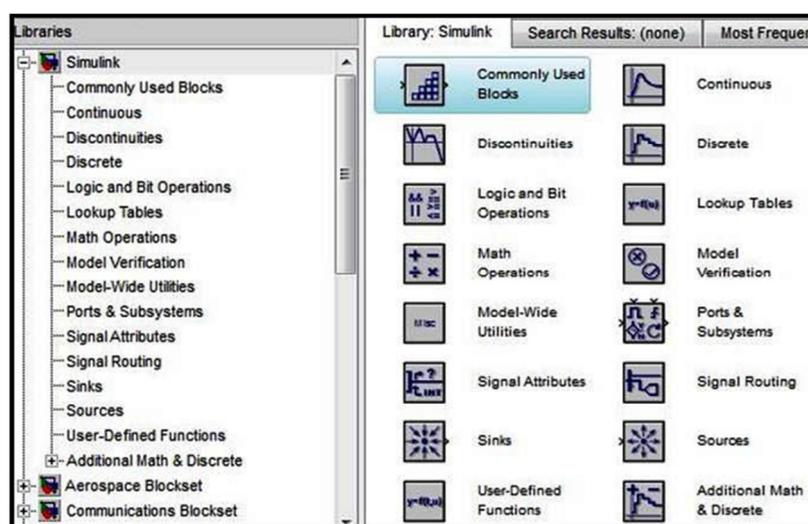


Figura 4.7 – Bibliotecas de blocos Simulink

Após a definição do modelo e de suas correspondentes equações diferenciais, utiliza-se o conjunto Simulink/Matlab para resolver o sistema de equações. Por meio do Simulink e de suas bibliotecas são desenvolvidos os sistemas de equações e o algoritmo de resolução, dentre várias opções, montando-se um sistema interativo. O Matlab é especialmente útil para operar os resultados obtidos na análise via Simulink, sendo possível visualizar os vários dados obtidos em análise anterior.

Portanto, o trabalho nos dois ambientes é conveniente e facilita a utilização do software pelo programador. O conjunto desses ambientes, Matlab e Simulink, pode ser utilizado facilmente para representar modelos diversos sendo necessário para tanto que o usuário disponha das equações diferenciais que regem o modelo. Os blocos são utilizados para representar as equações bem como para resolvê-las. A resolução do sistema de equações é feito pelo bloco “solver”. Nesse bloco é possível escolher os métodos de solução, sendo eles do tipo passo variável ou passo fixo, além de ser possível configurações opções, como, o tamanho do passo de integração, para passo fixo, e diferentes algoritmos de solução para equações diferenciais.

Antes de detalhar a utilização desse programa nesta pesquisa, introduz-se um exemplo da utilização do SIMULINK para o sistema amortecido de segunda ordem. O exemplo foi apresentado por James B. (1998), sendo transcrito a seguir.

O problema considera o sistema amortecido de segunda ordem, ilustrado na Figura 4.8, em que se representa um modelo composto por veículo de massa  $m$ , amortecedor,  $c$ , e rigidez da mola  $k$ . A esse sistema é aplicado o deslocamento,  $x$ .

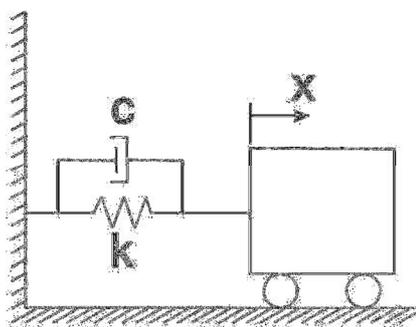


Figura 4.8 – Esquema massa-mola-amortecedor

Admite-se que o coeficiente de amortecimento  $c$  é 1.0 Ns/m, a constante da mola  $k$  é 2 N/m e a massa do carro  $m$  é 5 kg. O bloco é deslocado inicialmente de 1 m em relação a sua posição de equilíbrio e depois é liberado suavemente (sem aplicação de velocidade inicial).

O esquema é o mesmo ilustrado na Fig. 3.7 e é regido pela Equação (3.5) que pode ser reescrita como a seguir, dividindo-se todos os termos pela massa  $m$ :

$$\ddot{x} = -\frac{c}{m}\dot{x} - \frac{k}{m}x \quad (4.1)$$

Substituindo os valores assumidos para as constantes  $c$ ,  $m$  e  $k$ , tem-se a Equação diferencial que rege o problema:

$$\ddot{x} = -0,2\dot{x} - 0,4x \quad (4.2)$$

A partir dessa Equação é possível representar e resolver no Simulink o sistema amortecido de segunda ordem por meio do seu conjunto de blocos. Na montagem do modelo parte-se dos blocos de integração, dos quais se obtém os componentes que são utilizados para compor a Equação (4.2).

Para a resolução da Equação (4.2), são requeridos dois blocos “integradores” de forma a se obter o deslocamento. Assim, pode-se assumir que antes da primeira integração, a variável é de segunda ordem, e para o exemplo em questão é equivalente à aceleração,  $\ddot{x}$ . A variável de segunda ordem integrada passa a ser de primeira ordem,  $\dot{x}$ , e para o caso em estudo é a velocidade. Em seguida a variável  $\dot{x}$  é integrada convertendo-se  $x$ , ou seja, deslocamento. Os blocos de integração estão representados por retângulos, sobre os quais está escrito “int.” na parte superior da Figura 4.9.

As componentes de velocidade,  $\dot{x}$ , e deslocamento,  $x$ , associadas às saídas dos blocos de integração são afetados por “multiplicadores”, que aplicam nas componentes os fatores  $\frac{c}{m}$  e  $\frac{k}{m}$ . Estas operações estão representadas nos triângulos com os valores 0.2 e 0.4 na parte inferior da Figura 4.9. Finalmente, as saídas dos dois blocos multiplicadores funcionam com entrada para um bloco de “soma”, representado pelo círculo na Figura 4.9.

Este último bloco adiciona (com sinais negativos) os termos que definem a aceleração  $\ddot{x}$  na Equação (4.2). Isto fecha o ciclo e tem-se, por conseguinte, a expressão montada no Simulink e pronta para ser resolvida. Na Figura 4.9 são destacadas ainda em uma moldura na barra superior com o valor 50, que representa o tempo total de análise em segundos, e na barra inferior destaca-se uma moldura onde se lê “ode45”, que representa o esquema de integração numérico adotado, dentre vários disponibilizados pelo Simulink.

Devem ser considerados ainda os valores iniciais de deslocamento,  $x(0) = 1$ , e velocidade inicial,  $\dot{x}(0) = 0$ , que são introduzidos diretamente nos blocos de integração.

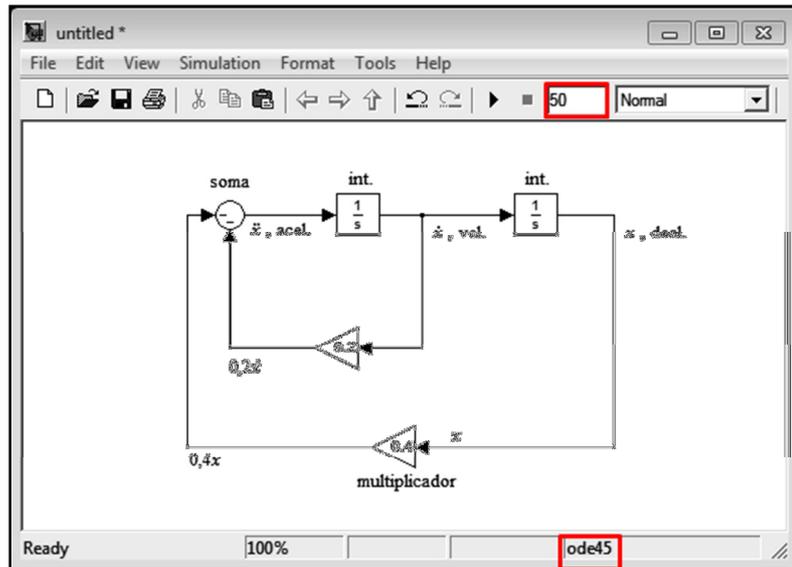


Figura 4.9 – Diagrama de blocos apresentados no ambiente SIMULINK

Concebido o diagrama de blocos no Simulink e ajustadas outras configurações como a escolha do esquema de integração, condições iniciais e tempo inicial e final da análise, inicia-se a resolução da Equação diferencial ou do sistema de equações. Como descrito anteriormente, é possível durante a resolução das equações visualizar os resultados no próprio Simulink utilizando-se de blocos de visualização. Outra opção é exportar os resultados, por meio de blocos, para o MATLAB, como utilizado a seguir para se avaliar o deslocamento do veículo ao longo do tempo. Na Figura 4.10 observa-se o decaimento do deslocamento durante os 50 segundos transcorridos.

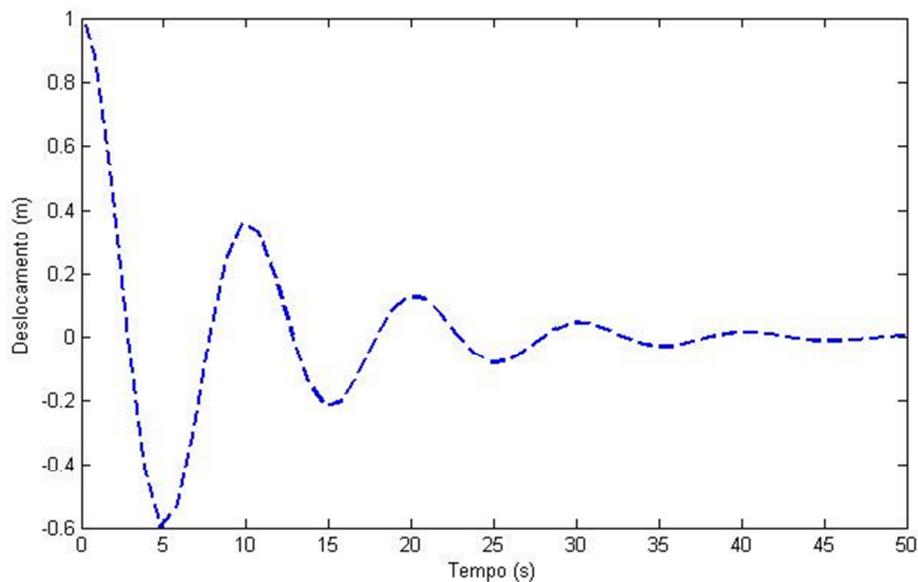


Figura 4.10 – Deslocamento horizontal da massa ao longo do tempo

Maiores detalhes sobre as várias potencialidades do Simulink não serão abordados, pois fogem objetivo deste trabalho, porém podem ser encontrados em manuais na internet ou em livros como o de James B. (1998).

#### 4.2.1. SOLUÇÃO DO QUARTER CAR USANDO O SIMULINK

O Simulink vem sendo utilizado em diversas pesquisas, dada sua versatilidade. Como exemplos, têm-se a pesquisa de Gustavsson (2002), que estudou um protótipo para processamento de sinal digital; Chiu (2008) pesquisou um modelo de previsão e prevenção de capotamento de veículos; e Antônio (2005) estudou a sobrecarga dinâmica em caminhões por meio de medições diretamente no veículo.

O uso do Simulink nesta pesquisa tem por objetivo obter o valor da força dinâmica pneu-pavimento e do índice IRI dado o perfil longitudinal do pavimento. Para isso, é necessário resolver o conjunto de equações diferenciais que representam o modelo do tipo *quarter-car*, o qual representa os efeitos da passagem de um quarto de veículo de passeio padrão (*Golden car*) em uma pista de rolamento com irregularidade longitudinal representada por um perfil de elevações medidas ou adotadas.

Assim, foram tomados como referência os trabalhos destacados acima e os exemplos e pesquisas apresentados no site da empresa Mathworks que desenvolveu os ambientes Matlab/Simulink para o desenvolvimento e validação do modelo desenvolvido nesta pesquisa. Dessa forma, utilizando-se o Simulink, foram compostas as equações do modelo do tipo um quarto de carro, apresentadas detalhadamente no Capítulo 3, e reescritas a seguir de forma normalizada pelas respectivas massas:

$$\ddot{z}_s = \frac{k_s}{m_s} (z_u - z_s) + \frac{c_s}{m_s} (\dot{z}_u - \dot{z}_s) \quad (4.3)$$

$$\ddot{z}_u = -\frac{k_s}{m_u} (z_u - z_s) - \frac{c_s}{m_u} (\dot{z}_u - \dot{z}_s) + \frac{k_u}{m_u} (z_r - z_u)$$

A fim de tornar o processo de montagem do diagrama de blocos no Simulink mais facilmente interpretável pelo leitor, optou-se por representá-lo em três etapas. O primeiro passo é destacado em vermelho, na Figura 4.11, onde se tem, a exemplo do diagrama anterior, que os componentes de aceleração,  $\ddot{z}$ , velocidade,  $\dot{z}$ , e deslocamento,  $z$ , para as duas equações, são obtidos a partir dos blocos de integração. O perfil de irregularidades da pista de rolamento neste exemplo é assumido como uma função senoidal,  $z_r$ .

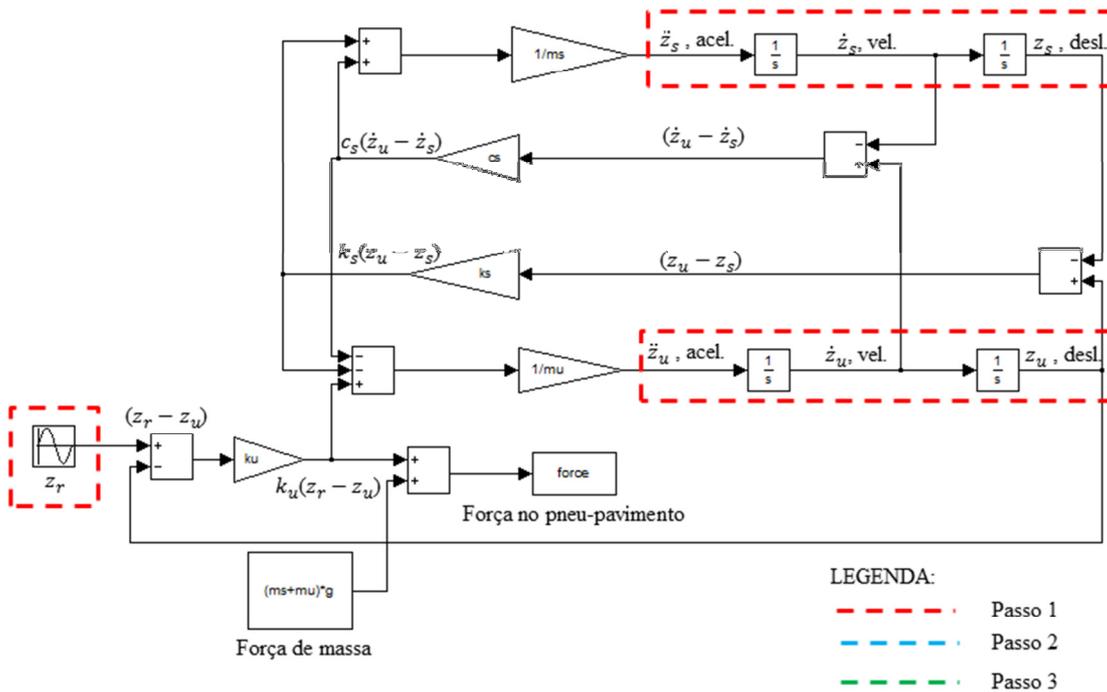


Figura 4.11 – Modelo Simulink, primeiro passo

O segundo passo, destacado em azul na Figura 4.12, mostra como os termos que compõem a Equação(4.3) são montados por meio de blocos do tipo soma e do tipo multiplicação, gerando os termos  $k_s(z_u - z_s)$ ,  $c_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s)$  e  $k_u(z_r - z_u)$ .

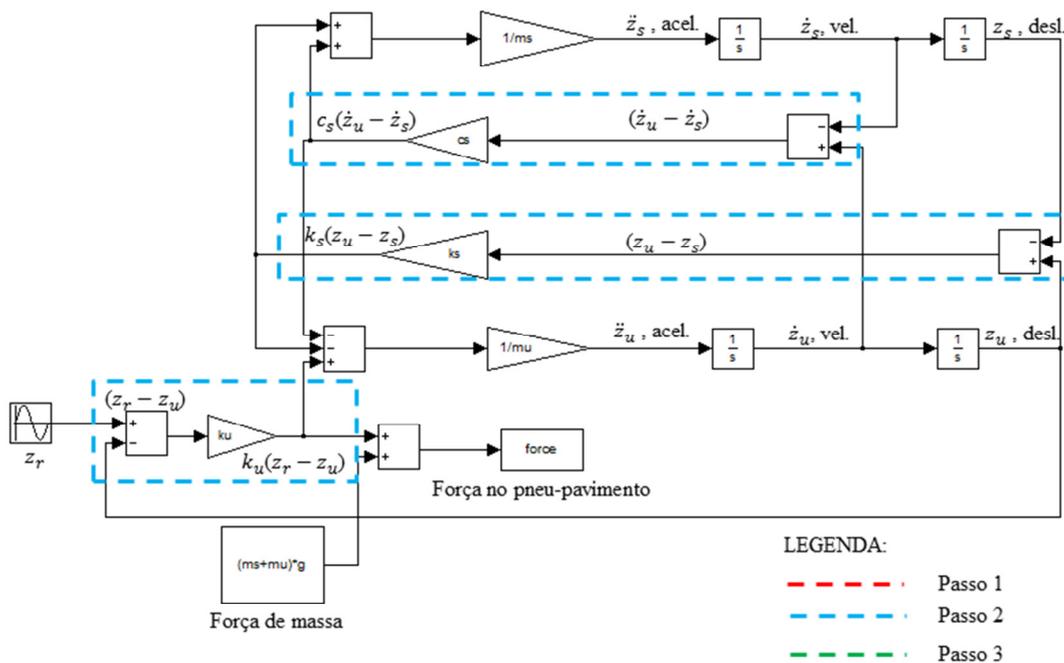


Figura 4.12 – Modelo Simulink, segundo passo

O terceiro passo, destacado em verde na Figura 4.13, mostra o somatório que reúne todos os termos gerados no passo dois sendo esses termos divididos pelas massas suspensa,  $m_s$ , e não suspensa,  $m_u$ . Essa operação fornece o lado direito da Equação (4.3).

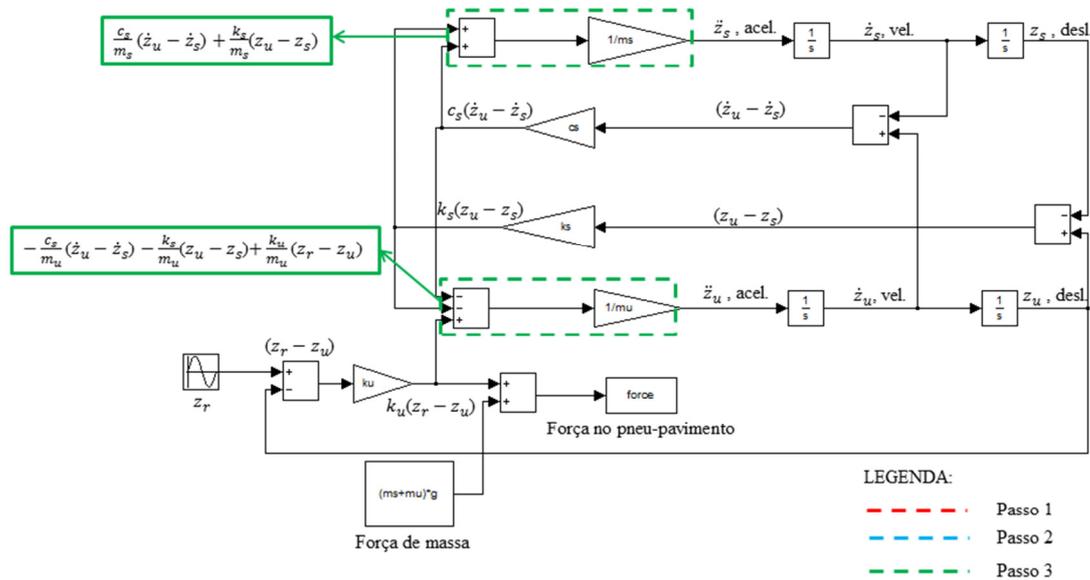


Figura 4.13 – Modelo Simulink, terceiro passo

Ao final do terceiro passo, tem-se o sistema de equações montados sendo necessário ajustar os parâmetros do sistema de um quarto de carro,  $m_s$ ,  $m_u$ ,  $k_s$ ,  $k_u$ ,  $c_s$  e  $z_r$ , as condições iniciais,  $\ddot{z} = 0$ ,  $\dot{z} =$  velocidade constante estimada durante o percurso, e  $z = 0$ . A velocidade constante ao longo do percurso caracteriza o movimento como uniforme, assim, conhecendo-se a velocidade do automóvel e o comprimento do percurso, determina-se o tempo final que equivale ao tempo da análise. Finalmente é necessário fornecer a irregularidade da pista de rolamento,  $z_r$ .

Ajustado os parâmetros do modelo é iniciada a análise numérica do sistema de equações diferenciais. A solução das Equação (4.3) permite que se conheçam os valores de velocidade,  $\dot{z}_u$ ,  $\dot{z}_s$ , e de deslocamento,  $z_r$ ,  $z_u$ , para cada passo de tempo. Esses valores são extremamente importantes, pois a partir deles é possível calcular a força de contato pneu-pavimento e o índice IRI.

O valor da força de contato pneu-pavimento é dado, por meio do diagrama de blocos apresentado na Figura 4.14, em que se multiplica a diferença entre os deslocamentos ( $z_r - z_u$ ) e a rigidez da mola, equivalente ao pneu no modelo. A diferença entre os deslocamentos

representa quanto à mola, que representa o pneu, foi comprimida ou tracionada. Somado a esse esforço deve-se contabilizar a força de massa do sistema de um quarto de carro, conforme observado na Fig. a seguir.

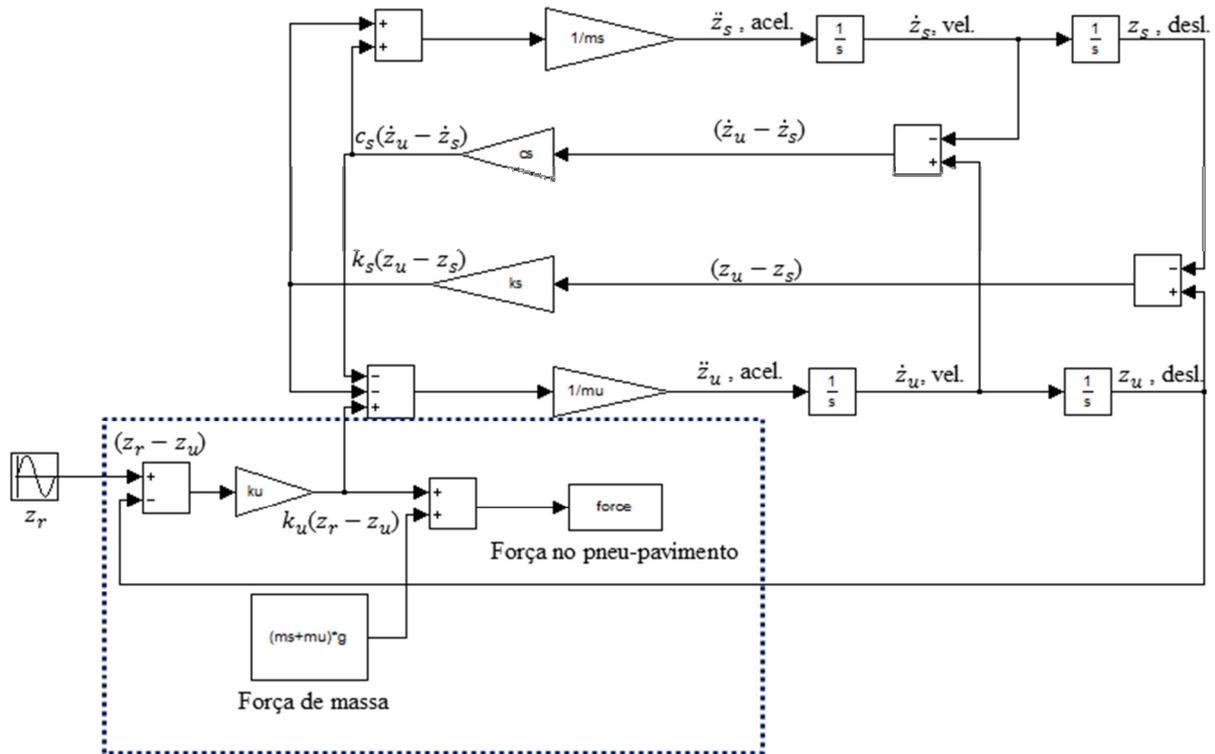


Figura 4.14 – Modelo Simulink, cálculo da força

O IRI pode ser calculado diretamente a partir das velocidades relativas absolutas  $|\dot{z}_u, \dot{z}_s|$ . Para tanto, basta dividir o tempo total de percurso ( $T=L/v$ ) na Equação (2.1) em  $n$  intervalos de tempo igualmente espaçados ( $\Delta t=T/n$ ) e somar as áreas dos retângulos da partição. Dessa forma, obtém-se a seguinte expressão para o cálculo aproximado do IRI.

$$IRI = \frac{1}{nv} \sum_{i=1}^n |\dot{z}_{u,i} - \dot{z}_{s,i}| \quad (4.4)$$

Os valores obtidos com a Equação (4.4) são multiplicados por 1000 para expressar o IRI em m/km.

É conveniente calcular o valor de IRI dado pela Equação (4.4) utilizando o diagrama de blocos do SIMULINK, já que se dispõe dos valores  $\dot{z}_u, \dot{z}_s$  para todos os incrementos de tempo, conforme observado na Figura 4.15.

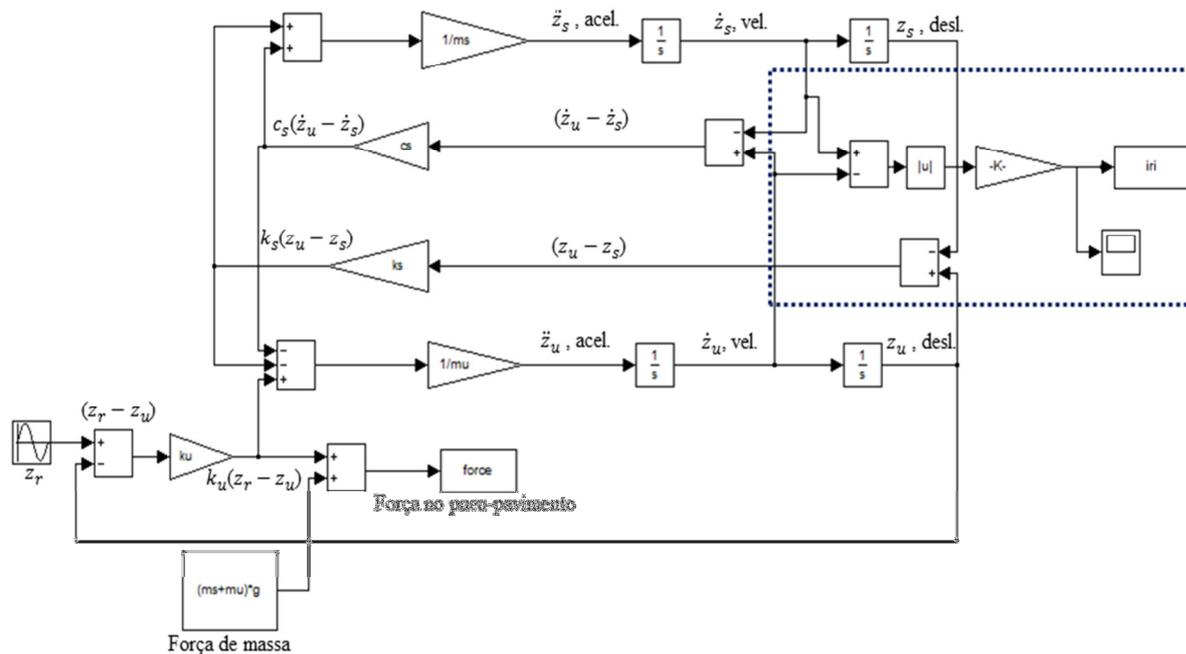


Figura 4.15 – Modelo Simulink, cálculo do IRI

Nesta pesquisa os diagramas de blocos apresentados foram utilizados para simular a passagem de um quarto de carro e de caminhão sobre perfil longitudinal irregular ou com defeito pontual.

As análises tiveram como objetivo avaliar a relação entre o índice IRI e a força dinâmica, produzida devido à passagem do veículo pela irregularidade, e à força estática, ou peso do veículo. Além disso, avaliou-se a magnitude da força dinâmica vertical máxima, entre o pneu e o pavimento no instante da passagem do veículo pela pista irregular.

Para validar o modelo desenvolvido nesta pesquisa para o cálculo do IRI e da força pneu pavimento, foram utilizados a pesquisa de Sayers e Karamihas (1998) e o programa ADAMS/VIEW.

Sayers e Karamihas (1998) mostram o resultado do valor de IRI para diferentes perfis, utilizando um algoritmo próprio, em que se considerou o modelo de um quarto de carro, para veículo tipo Golden Car, trafegando à velocidade de 80 km/h sobre perfil longitudinal com diferentes configurações que representam defeitos no pavimento. A Figura 4.16 são apresentados alguns dos perfis hipotéticos de onde se calculou os valores de IRI.

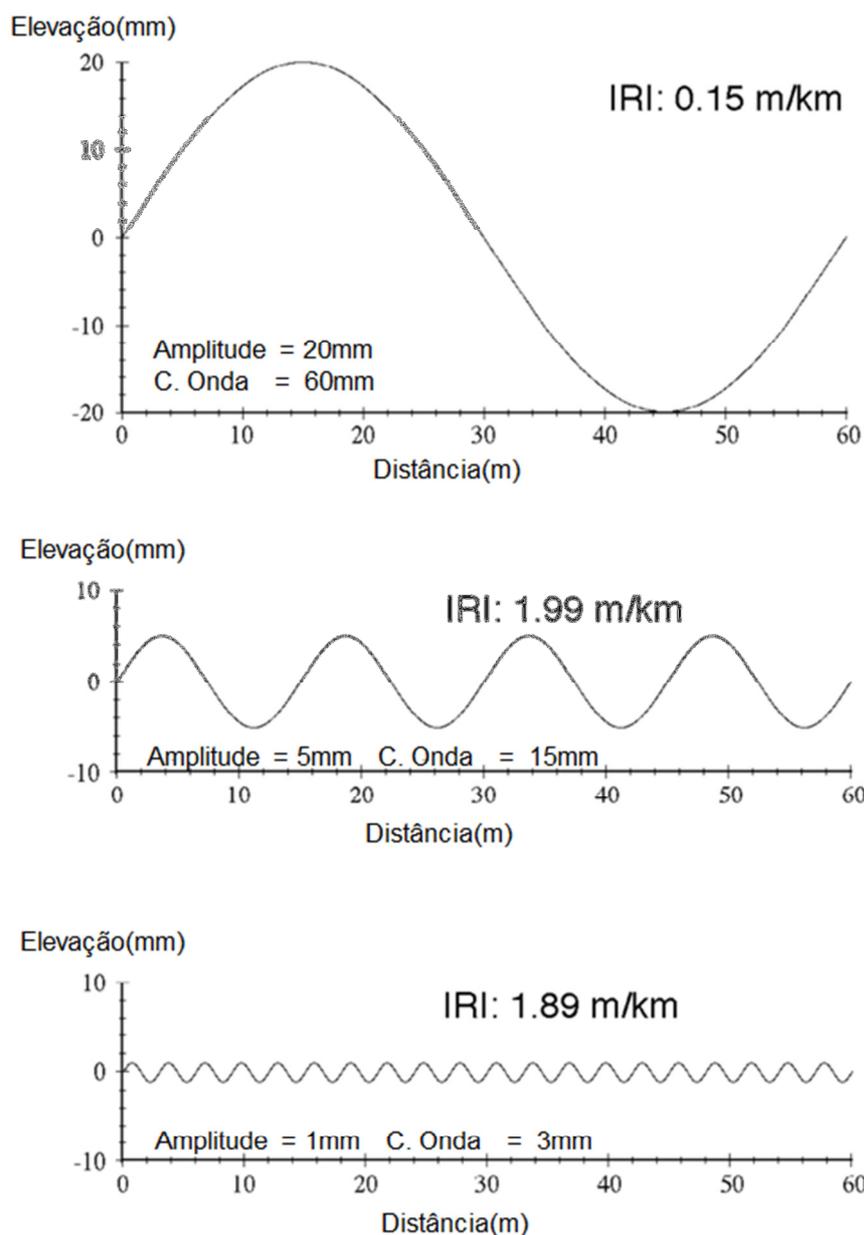


Figura 4.16 – IRI para diferentes perfis de pavimento (Sayers e Karamihas 1998)

Os resultados dos valores de IRI calculados para os perfis acima e outros apresentados por Sayers e Karamihas (1998) são comparados com os obtidos pelo modelo desenvolvido nesta pesquisa no ambiente Simulink, conforme Tabela 4.1 a seguir. Os resultados mostram que há uma pequena divergência entre alguns valores, porém eles possuem a mesma ordem de grandeza, portanto, validando o modelo desenvolvido nesta pesquisa para o cálculo de IRI. As pequenas divergências percebidas nos valores apresentados na Tabela 4.1 podem ser explicadas pela forma como o valor de IRI é calculado. Enquanto no método descrito por Sayers e Karamihas (1998) utiliza-se a diferença entre inclinações dos pontos consecutivos para o cálculo do IRI, no modelo desenvolvido nesta pesquisa utilizam-se as velocidades

relativas em pontos consecutivos. Essa divergência de forma de integração gera pequenas diferenças de valores de IRI, que não são significativas.

Tabela 4.1—Resultados de IRI (Sayers e Karamihas versus o modelo Simulink) para os perfis representados por senoidais.

Comprimento de onda (m)	Amplitude (mm)	IRI m/km (Sayers e Karamihas, 1998)	IRI m/km (Modelo Simulink)
60	20	0,15	0,27
30	10	0,62	0,71
15	5	1,99	1,89
6	2	1,53	1,52
3	1	1,89	1,91
1.5	0,5	0,99	1,04

As forças calculadas pelo modelo implementado no Simulink foram comparadas com as obtidas com o programa comercial Adams/View. Esse programa é muito utilizado por profissionais e pesquisadores de Engenharia Mecânica, em especial no estudo de suspensão de veículos e por isso foi utilizado nesta pesquisa. O programa Adams/View possui vários recursos e módulos, podendo compor desde um simples sistema de suspensão até sistemas complexos. Nos seus diversos módulos, é possível simular os sistemas mecânicos dos carros, chassis, transmissão, rotação entre peças entre outros. O usuário tem acesso a cada um dos parâmetros que envolvem o problema, como inércia, massa, rigidez, amortecimento, trajetórias entre outras.

Por meio dele engenheiros criam e testam facilmente protótipos virtuais de sistemas mecânicos em pouco tempo e com baixos custos, os quais são normalmente elevados para a constituição física do teste. O Adams/View incorpora a física real e, simultaneamente, resolve equações de cinemática, estática, quasi-estática e dinâmica utilizando tecnologia de solução dinâmica, capaz de resolver também problemas dinâmicos não-lineares em pequena fração de tempo. Esse programa, embora seja de grande utilidade para simulação de diversos tipos de sistemas mecânicos, foi utilizado nesta pesquisa somente como fonte para a validação do modelo criado no MATLAB/Simulink e, portanto, maiores detalhes sobre ele podem ser encontrados no site <http://www.mscsoftware.com>.

Na Figura 4.17 apresenta-se a área de trabalho em que foi concebido o modelo de um quarto de carro no programa ADAMS/VIEW. Nesta Fig. podem ser observadas três massas ligadas entre si por molas e amortecedores. A massa superior representa a massa suspensa, ou amortecida, do sistema de um quarto de carro e abaixo dela estão integrados o amortecedor e a mola de uma das suspensões do veículo. Na base do componente mola-amortecedor é conectado outro corpo que representa a massa não amortecida. Por fim, tem-se a representação do contato pneu-pavimento por meio de outro conjunto onde somente a mola está ativada e é ligada a um corpo que representa a superfície do pavimento. Todos os elementos são representados por parâmetros ou funções introduzidas pelo usuário, de forma a fornecer os elementos físicos necessários para se montar o protótipo, bem como as condições de contorno como deslocamentos ou forças impostas. Na base da mola inferior, foi imposta uma função senoidal que representa a irregularidade do pavimento durante o percurso do veículo ao longo do tempo. Esse modelo é equivalente ao apresentado no Capítulo 2 por meio da Figura 2.3.

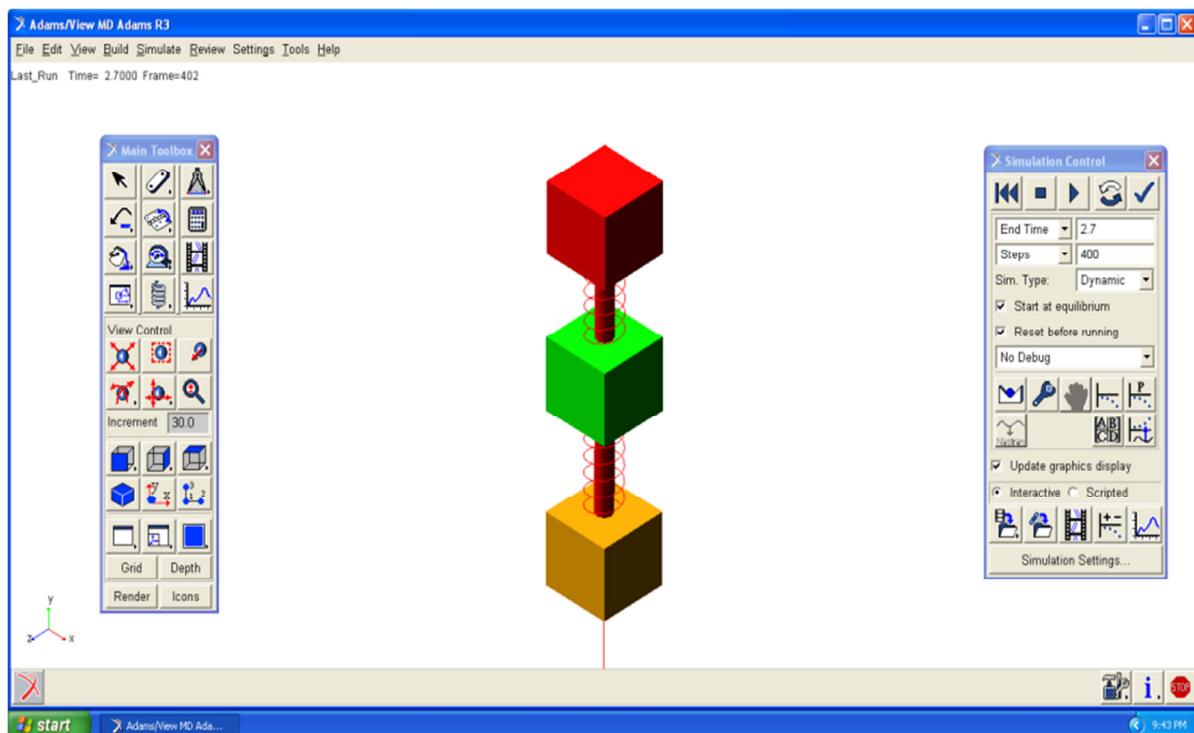


Figura 4.17 – Área de trabalho do programa Adams/View e modelo de um quarto de carro

O modelo representado no Adams/View foi composto pelos mesmos parâmetros utilizados no modelo Simulink. Esses parâmetros são apresentados pela Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados na simulação comparativa entre Simulink e Adams

Veículo	$m_s$ (kg)	$m_u$ (kg)	$k_s$ (N/m)	$k_u$ (N/m)	$c_s$ (N.s/m)
Caminhão <i>ESRD</i>	3720,0	380,0	500.000,0	1.950.000,0	21.000,0

O perfil longitudinal sobre o qual trafega o caminhão é arbitrado como sendo uma senoidal, seguindo as variações das configurações de perfis estudadas por Sayers e Karamihas 1998. As características dos perfis são dadas na Tabela 4.2, além disso, é apresentado o valor da velocidade que se admite constante durante o percurso com extensão de 60m.

Tabela 4.3–Velocidade do veículo e características do perfil senoidal

Amplitude (m)	Comp.onda (m)	Comp. Total (m)	Velocidade (m/s)
10,0	30,0	60,0	22,2

A Figura 4.18 mostra os perfis de força gerada sobre a roda em contato com o perfil irregular ao longo do tempo. Os resultados foram obtidos a partir dos programas Simulink ADAMS. Observa-se a concordância dos resultados para o caso estudado de onde se depreende que o modelo constituído tanto para o cálculo do IRI quanto para o cálculo da força atuante sobre a roda do veículo ao longo do tempo são válidos.

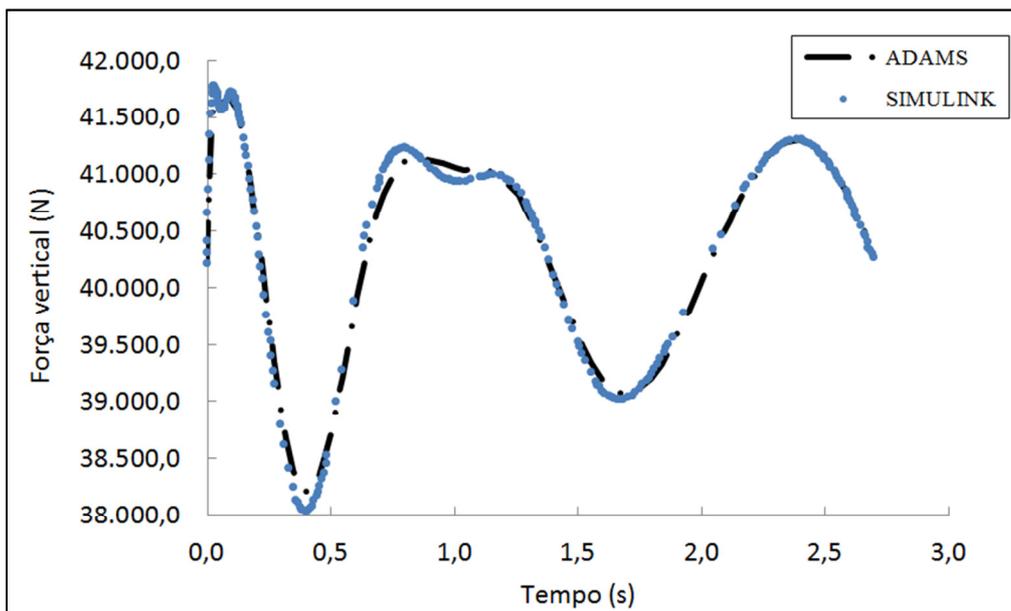


Figura 4.18 – Validação do modelo Simulink para cálculo de forças pelo programa Adams

# Capítulo 5

## 5. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DINÂMICOS

No capítulo anterior foram introduzidos os aspectos relevantes sobre os programas usados nesta pesquisa, assim como suas respectivas validações. Neste capítulo avalia-se o efeito de amplificação da força de contato pneu-pavimento, para modelos de quarto de carro representativos do veículo de passeio padrão (Golden Car) e do veículo comercial padrão (Eixo Simples Padrão), trafegando a diferentes velocidades sobre uma rodovia com diferentes tipos de irregularidade. Para isso, foram realizadas simulações no ambiente Simulink, utilizando-se o modelo de quarto de carro apresentado na Figura 4.15.

Para realização das análises foi necessário estabelecer a priori o cenário a ser estudado e seus principais condicionantes. Os elementos que caracterizam o problema são os parâmetros dos componentes do modelo de um quarto de carro, a velocidade do veículo, o formato do perfil longitudinal e o seu respectivo comprimento, descritos a seguir.

### 5.1. PARÂMETROS DOS VEÍCULOS UTILIZADOS

As características dos veículos necessárias para definir o modelo de um quarto de carro são os valores de massa, rigidez e amortecimento de seus componentes. Nesta tese são utilizados os valores descritos para os veículos definidos como Golden Car, (Melis e Rio, 1992) e para o caminhão de Eixo Simples Padrão (ESP). Os veículos foram escolhidos por serem representativos para o cálculo do IRI, Golden Car, e para o cálculo dos esforços atuantes sobre o pavimento, ESRD, relevantes para o dimensionamento de pavimentos. Na Tabela 5.1 são apresentados os valores requeridos para o modelo de um quarto de carro.

Tabela 5.1 – Parâmetros dos veículos Golden Car ESP

Veículo	$m_s$ (kg)	$m_u$ (kg)	$k_s$ (N/m)	$k_u$ (N/m)	$c_s$ (N.s/m)	Força Estática (kN)
<i>Golden Car</i>	250,0	37,5	15.825,0	163.250,0	1.500,0	2,875
ESP	3.720,0	380,0	500.000,0	1.950.000,0	21.000,0	41,0

### 5.1.2. VELOCIDADE UTILIZADA NAS ANÁLISES

A velocidade de 80 km/h é requerida como padrão para o cálculo do IRI, e, por conseguinte deve ser adotada nas análises. As velocidades limites de 60 km/h e 120 km/h também foram utilizadas para estudar a influência da variação da velocidade no cálculo do Índice de Irregularidade (RI, *Roughness Index*) e na amplificação da carga dinâmica produzida sobre o pavimento. A sigla IRI será reservada à definição original usando os parâmetros do *Golden Car* à velocidade padrão de 80 km/h. Para as demais condições de velocidade ou diferentes parâmetros dinâmicos, será utilizada a sigla RI, embora a forma e algoritmo de cálculo sejam as mesmas. Essas velocidades foram escolhidas por serem representativas e frequentemente utilizadas por veículos leves e pesados nas rodovias brasileiras.

### 5.1.3. PERFIS LONGITUDINAIS ESTUDADOS

Os perfis longitudinais dos pavimentos estudados foram arbitrados de forma a contemplar as situações com maior ocorrência. Eles são denominados como, perfil tipo “Buraco”, perfil tipo “Elevação” e perfil tipo “Senoidal”. Os perfis foram gerados por senoidais simples e compostas. Os perfis arbitrados são ilustrados na Figura 5.1.

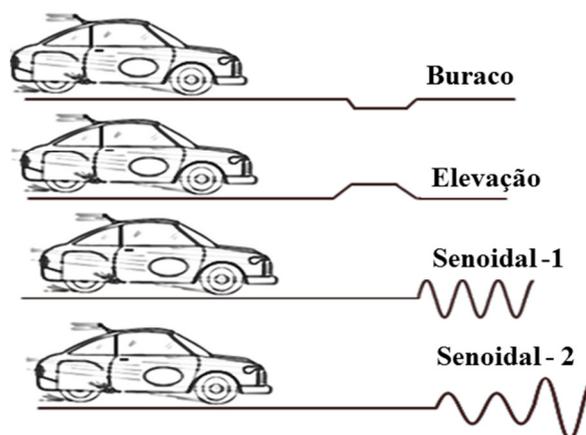


Figura 5.1 – Perfis longitudinais do tipo buraco, elevação e senoidal.

Os comprimentos dos perfis longitudinais ensaiados variaram entre 60 m e 150 m para obtenção de valores representativos de IRI e para o cálculo dos perfis de forças dinâmicas aplicadas sobre o pavimento.

As condicionantes utilizadas nas diversas análises são sintetizadas na Tabela 5.2. Os tópicos a seguir, que apresentam as análises usando o SIMULINK, são montados a partir dos parâmetros dados pelas combinações dos dados apresentados pela Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resumo dos parâmetros usados na análise

Tipo de Veículo	Velocidade (km/h)	Tipo de Perfil	Dimensões (mm)	Comp. Perfil (m)
Golden Car	60	“Buraco”	Profundidades 30,60 e 100	60
		“Elevação”	Altura 30,60 e 100	
ESP	80	“Seno 1”	Amplitude (A) 10, 20 e 40	150
			Comp. Onda 10.000 a 12.000	
	120	“Seno 2”	Amplitude 10, 20 e 40	
			Comp. Onda (m) variado	

## 5.2. SIMULAÇÃO PARA VEÍCULO DO TIPO GOLDEN CAR

A seguir são apresentadas as análises que utilizam as combinações entre as colunas dadas pela Tabela 5.2. As combinações partem da primeira coluna, fixando o tipo de veículo como Golden Car. Em seguida escolheu-se o Tipo de Perfil, inicialmente optou-se pelos perfis dos tipos Buraco e Elevação. Esses perfis possuíam defeitos, profundidades e alturas equivalentes a 30mm, 60mm e 100mm. Estes valores correspondem a espessuras típicas de camadas de revestimento asfáltico, os quais resultam em buracos da ordem de grandeza atingindo a camada de base quando muito desgastados. As elevações podem corresponder a saliências

resultantes de remendos e operações tapa-buraco mal executadas, ou de saliências construídas propositalmente como redutores de velocidade do tipo “lombada”.

As velocidades utilizadas foram de 60km/h, 80km/h e 120km/h, velocidades que ocorrem frequentemente e varrem um grande faixa de velocidades. Os comprimentos dos perfis longitudinais adotados foram de 60m ou 150m. Os resultados para os perfis que produziram os valores mais significativos de Índice de Irregularidade (RI) e força dinâmica máxima são apresentados na Tabela 5.3 e na Tabela 5.4. Observa-se que para ambos os perfis, “Buraco” e “Elevação”, os valores de RI são iguais para as mesmas velocidades e comprimentos de trechos quando a altura das elevações tem o mesmo valor que a profundidade dos buracos.

Entretanto, para os valores de força máxima, admitindo os mesmos valores de profundidade e altura e todas as outras características iguais, tem-se que para as velocidades de 80km/h e 120km/h os valores de força dinâmica são maiores para o perfil tipo “Elevação” do que para o perfil “Buraco”. Nota-se ainda que os maiores valores de força dinâmica e de RI registrados são para a velocidade de 60 km/h e para a profundidade e altura de 100mm.

Tabela 5.3 – Parâmetros dos perfis em “Elevação”

	Altura(mm)	V (km/h)	L (m)	RI (m/km)	F <sub>max</sub> (kN)
<b>ELEVAÇÃO</b>	100,0	60,0	60,0	8,16	19,15
	100,0	80,0	60,0	5,08	19,15
	100,0	80,0	150,0	5,00	19,15
	100,0	120,0	60,0	2,78	18,14

Tabela 5.4 – Parâmetros dos perfis “Buraco”

	Prof.(mm)	V (km/h)	L (m)	RI (m/km)	F <sub>max</sub> (kN)
<b>BURACO</b>	100,0	60,0	60,0	8,16	20,51
	100,0	80,0	60,0	5,08	17,15
	100,0	80,0	150,0	5,00	17,15
	100,0	120,0	60,0	2,78	14,64

Observou-se ainda uma correlação direta e perfeita ( $R^2=1$ ) entre os valores de IRI, calculados com os parâmetros do Golden Car a velocidade de 80 km/h, e as profundidades das depressões ou alturas das elevações, como ilustrado na Figura 5.1. O valor do RI em m/km é aproximadamente igual ao valor da depressão (ou altura) em mm dividido por 20 (vinte), conforme observado na Figura 5.2.

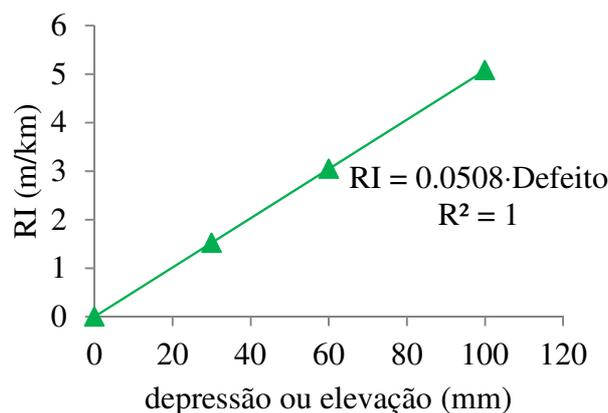


Figura 5.2 – Relação entre RI e profundidades das depressões (ou alturas das elevações)

Os principais resultados das análises realizadas utilizando o SIMULINK, apresentados na Tabela 5.3 e na Tabela 5.4, são apresentados graficamente na Figura 5.3, onde estão plotados os pares RI versus relação força dinâmica/força estática. A relação força dinâmica/força estática foi escolhida para que fosse expressa a majoração da força dinâmica em relação à força estática, dado o índice de irregularidade longitudinal, representada pelo RI. Na Figura 5.3 adotou-se um ajuste linear para a relação RI versus força dinâmica/força estática. As equações de regressão para as velocidades analisadas de 60km/h, 80km/h e 120km/h assim como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre as variáveis também são mostradas na Fig.. Todos os coeficientes de determinação são superiores a 0,90, de modo que a correlação linear pode ser considerada muito boa e demonstra que o índice de irregularidade é a variável principal que determina o acréscimo de força dinâmica, principalmente para velocidades abaixo de 80 km/h.

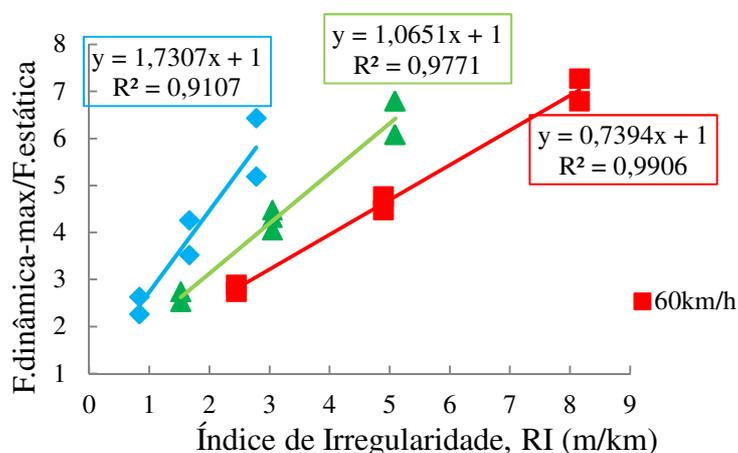


Figura 5.3 – Relação força versus RI para perfis buraco e elevação, para veículo Golden Car

Os resultados apresentados na Figura 5.3 possibilitam afirmar que para perfis longitudinais em que haja buraco ou elevação a relação entre a força e o índice de irregularidade é aproximadamente linear. Como os valores de cálculo de RI por convenção são determinados para um veículo do tipo Golden Car a uma velocidade média de 80km/h, tem-se que a relação RI versus a relação força dinâmica/força estática pode ser determinada pela seguinte Equação:

$$\frac{F_{dm}}{F_e} = 1,065 \cdot IRI + 1 \quad (R^2 = 0,977) \quad (5.1)$$

em que,

$F_{dm}$  é a força dinâmica vertical máxima no contato pneu-pavimento e  $F_e$  é a força vertical estática equivalente ao peso de um quarto do veículo. A Equação (5.1) tem um coeficiente linear (intercepto) unitário, o que é consistente com o fato de não haver amplificação dinâmica para uma rodovia perfeitamente plana ( $IRI=0$ ). O fato empírico de o coeficiente angular (igual a 1,065) de a Equação ser também próximo da unidade facilita o cálculo expedito do fator de majoração da carga dinâmica como sendo aproximadamente o próprio valor do RI acrescido da unidade. Assim, uma irregularidade representada por um buraco ou uma elevação de 40 mm ou RI igual a 2,0 praticamente triplica a carga aplicada por um veículo de passeio sobre o pavimento.

Apresentam-se a seguir os valores calculados do índice de irregularidade (RI) e das forças dinâmicas máximas para os perfis irregulares compostos por ondas senoidais. Qualquer perfil de irregularidades distribuídas ao longo de um trecho pode ser decomposto em uma soma de ondas senoidais, utilizando séries de Fourier. O número de ondas necessárias para representar bem um perfil, bem como a amplitude e comprimento dessas ondas, depende de quão homogêneo é o perfil estudado. Entretanto, as características dinâmicas de um veículo são afetadas principalmente por umas poucas ondas predominantes. Portanto, neste trabalho serão analisados apenas perfis senoidais simples e compostos por duas ondas.

Para esse estudo modificou-se o comprimento de onda e a amplitude na proporção (0,001 x comprimento de onda/amplitude) de 1:1, 1:2 e 1:3 tomando as amplitudes de 10 mm, 20 mm e 40mm. Dessa forma, os comprimentos de onda variam na faixa de 10 a 120 metros. Sayers e Karamihas (1998) utilizaram-se de comprimentos de onda de 5m, 15m e 60m. Além disso, variaram os valores de amplitude de 1mm a 20mm para o cálculo do RI. Tomando esse estudo como referência optou-se por ampliar os valores de comprimento de onda e amplitude para se

obter resultados diversos. Além disso, foram avaliadas as repostas para as velocidades de 60km/h, 80km/h e 120km/h para os comprimentos dos perfis longitudinais de 60m e 150m. Os perfis senoidais simulam irregularidades distribuídas ao longo de todo o segmento, implicando em índices de irregularidades baixos até elevados (RI de 0 a 5), porém representativos de defeitos diferentes dos pontuais dados pelos perfis do tipo “Buraco” e “Elevação”.

Os perfis de irregularidades geram perfis de forças que atingem valores máximos e mínimos ao longo do trecho em consideração. A Tabela 5.5 mostra os máximos valores de força dinâmica e os índices de irregularidade (RI) obtidos para vários perfis simulados do tipo senoidal. Ao se comparar os valores das forças máximas para perfis dados por uma onda senoidal regular e com pequena amplitude com os perfis dos tipos “Elevação” ou “Buraco”, observa-se que os perfis senoidais geram menores valores de força dinâmica máxima, embora os valores de irregularidade sejam próximos. Pode-se entender que os defeitos pontuais e distribuídos analisados ao longo dos comprimentos de 60 m e 150 m são equivalentes em média em termos de irregularidade longitudinal, definida aqui pelo RI. Contudo, em se tratando de força, o defeito pontual resulta em forças dinâmicas concentradas mais elevadas que a máxima observada em irregularidades bem distribuídas.

Na Tabela 5.5 é utilizada a seguinte nomenclatura: A = amplitude; C = Comprimento de onda; C/A = relação entre comprimento de onda e amplitude; V =, velocidade do veículo; L = comprimento total do perfil longitudinal; RI = índice de irregularidade (*Roughness Index*) e  $F_{max}$  = força dinâmica máxima.

Tabela 5.5 – Resultados para os perfis senoidais simples.

	A(mm)	C(m)	0,001(C/A)	V (km/h)	L (m)	RI (m/km)	$F_{max}$ (kN)
<b>SENO1</b>	20,0	20,0	1,0	60,0	60,0	3,48	3,12
	20,0	20,0	1,0	80,0	60,0	4,47	3,32
	40,0	40,0	1,0	80,0	150,0	2,72	3,22
	20,0	20,0	1,0	120,0	60,0	3,64	3,50

Os resultados para o veículo do tipo Golden Car podem ser observados em forma de gráfico na Figura 5.4. Igualmente ao procedimento utilizado para analisar os perfis dos tipos “Buraco” e “Elevação”, no perfil senoidal foram simuladas combinações possíveis descritas pela Tabela 5.2, destacando que as irregularidades variaram conforme a relação (A/C) entre amplitude e comprimento de onda. As equações de regressão apresentadas na Figura 5.4 são

distintas daquelas observadas na Figura 5.3, donde se pode concluir que as relações entre a razão de forças estáticas e dinâmicas máximas e o RI são função do perfil estudado.

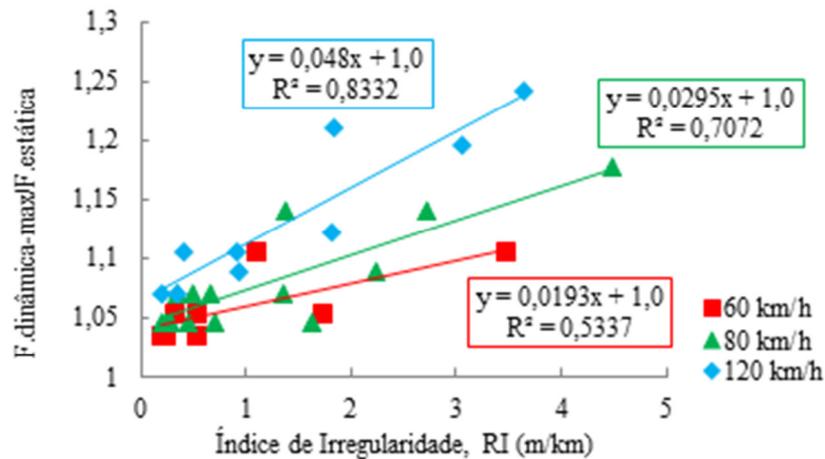


Figura 5.4 -Resultado da relação força versus RI para perfis seno para Golden Car.

Para veículo tipo Golden Car a 80 km/h, a irregularidade define o IRI e a seguinte relação foi obtida:

$$\frac{F_{dm}}{F_e} = 0,0295 \cdot IRI + 1,0 \quad (R^2 = 0,7072) \quad (5.2)$$

Comparando as equações geradas pelos perfis tipo “Buraco” ou “Elevação” ao perfil dado por uma onda senoidal, tem-se que a influência de uma variação unitária no IRI na produção da força dinâmica reduz cerca de 100% na Equação (5.1), para cerca de 3% na Equação (5.2). Observa-se ainda uma significativa queda no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do ajuste linear, indicando que outros fatores além do RI têm influência significativa na determinação da amplificação dos esforços dinâmicos para perfis senoidais, como a velocidade ou tipo de perfil. Além disso, considerar a relação dos resultados obtidos representados por uma reta pode não ser a melhor opção. Portanto, é necessário estudar outros índices como, por exemplo, a densidade espectral (PSD, *Power Spectral Density*) como sugerido por Ferreira (2003) ou outras relações matemáticas que não a utilizada com intuito de que a Equação apresentada reflita da melhor maneira a relação defeito no pavimento e força dinâmica gerada.

Apresentam-se a seguir os resultados das análises semelhantes às descritas anteriormente, onde foram estudadas as combinações de ondas senoidais contínuas e de amplitude e frequência constante ao longo do comprimento total. Na análise do perfil denominado

“senoidal 2”, de acordo com a Tabela 5.2 o perfil passou a ser composto por duas ondas em formato senoidal, sendo essas distintas quanto aos valores de amplitude e comprimento de onda, porém com valores relacionados por multiplicador. Assim, tem-se que para as amplitudes adotadas de 10 mm, 20 mm e 40 mm aplicaram-se as proporções para cada uma das senoidais de (comprimento de onda/amplitude) 1:1, 1:2 e 1:3.

Logo, tem-se que para a amplitude da primeira senoidal de 10 mm a segunda senoidal poderia ter amplitude de 10 mm, 20 mm ou 30 mm, de acordo com as proporções dadas. A Figura 5.5 apresenta a composição das duas senoidais adjacentes formando outro tipo de perfil. Neste caso as amplitudes,  $A$ , e os comprimentos de onda,  $\lambda$ , se relacionam pelos valores de  $n$  e  $x$ , obedecendo as proporções dadas anteriormente e são descritos como,  $n = 1, 2$  e  $3$  e  $x = 2, 3$  e  $4$ .

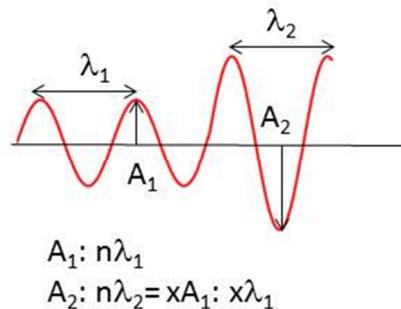


Figura 5.5 – Composição do perfil por duas senoidais

Os perfis compostos por duas ondas senoidais conforme mostrado na Figura 5.5 têm os valores de comprimento de onda e de amplitude apresentado na Tabela 5.6. A mesma terminologia da Tabela 5.5 é utilizada, porém com os sub-índices 1 e 2 para identificar as ondas componentes.

Tabela 5.6 – Parâmetros dos perfis senoidais

	$A_1$ (mm)	$C_1$ (m)	$\frac{0,001}{C_1/A_1}$	$C_2$ (m)	$\frac{0,001}{C_2/A_2}$	$V$ (km/h)	$L$ (m)	$IRI$ (m/km)	$F_{max}$ (kN)
<b>SENO 2</b>	10,0	10,0	1,0	20,0	1,0	60,0	60,0	5,01	3,16
	10,0	10,0	1,0	20,0	1,0	80,0	60,0	4,65	3,32
	10,0	10,0	1,0	20,0	1,0	80,0	150,0	12,55	3,20
	10,0	10,0	1,0	20,0	1,0	120,0	60,0	3,40	3,50

Os valores de força máxima apresentados são próximos aos valores obtidos para os perfis compostos por apenas uma onda senoidal, conforme observado na Tabela 5.5. Para os perfis senoidais compostos, as forças dinâmicas são mais elevadas para os casos em que o

comprimento de onda é próximo do valor da amplitude, e a amplitude alta, acima de cinco centímetros.

A Figura 5.6 apresenta os resultados das análises em forma de equações lineares que representam a relação das forças dinâmicas e estáticas com o índice de irregularidade (RI), dados os perfis longitudinais senoidais dos pavimentos.

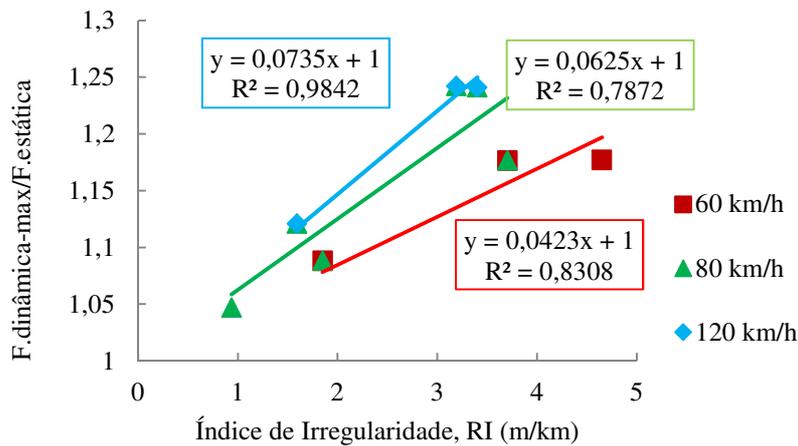


Figura 5.6 -Resultado da relação força versus RI para perfis seno composto para Golden Car

Para o carro Golden Car a 80 km/h, observa-se que, para o perfil composto por duas senoidais, a relação entre força dinâmica e força estática é dada por:

$$\frac{F_{dm}}{F_e} = 0,0625 \cdot IRI + 1 \quad (R^2 = 0,787) \quad (5.3)$$

Ressalta-se que o número de seções avaliadas para o perfil do tipo seno 2, composta por duas ondas senoidais, foi menor que as demais. A redução de análises é fruto da dificuldade em ajustar o perfil dado por senos diferentes e contíguos.

### 5.3. SIMULAÇÃO PARA O EIXO SIMPLES PADRÃO (ESP)

Os estudos envolvendo o veículo do tipo Golden Car são necessários para se avaliar os valores de RI dado perfil longitudinal. Porém, em se tratando de dimensionamento de pavimentos o tráfego de projeto é representado pelo número ( $N$ ) de passadas de um eixo simples padrão (ESP), que é um eixo simples de roda dupla (ESRD), sujeito a uma carga por eixo de 82kN (8,2tf) e uma pressão de enchimento dos pneus de 560kPa (80psi). Todos os veículos que compõem uma frota são transformados em ESP por meio de fatores de equivalência (DNIT, 2006).

Dessa forma, é necessário que sejam realizadas simulações em busca da força dinâmica máxima atuante sobre o pavimento de modo que o dimensionamento do pavimento considere a carga real atuante sobre suas camadas. Portanto, foram realizadas simulações com diferentes combinações de perfis, velocidades e comprimento total dos segmentos, de acordo com a Tabela 5.2. Neste caso, foram utilizados os parâmetros do eixo simples padrão (ESP) nas simulações via SIMULINK, os quais já foram apresentados na Tabela 5.1. Os perfis do tipo “Buraco” e “Elevação”, já apresentados anteriormente nas simulações com o veículo tipo Golden Car, foram novamente utilizados, porém para o ESP. Os resultados mais significativos são apresentados na Tabela 5.7 para o perfil do tipo “Buraco” e na Tabela 5.8 para o perfil do tipo “Elevação” com profundidade (altura) de 100mm. Foram avaliadas velocidades de 60km/h, 80km/h e 120km/h e comprimentos de 60m e 150 m. Nessas Tabelas são apresentados os valores de força dinâmica máxima ( $F_{max}$ ) e os valores de coeficientes de irregularidade ( $RI^*$ ) equivalentes ao índice RI, porém utilizando os parâmetros dinâmicos do ESP. Este índice ( $RI^*$ ), não é padronizado internacionalmente, já que o RI é calculado com os parâmetros do veículo do tipo Golden Car à velocidade de 80 km/h. Esse veículo foi escolhido pois apresentou o melhor ajuste para a relação entre razão de forças versus irregularidade.

Tabela 5.7 – Resultados para o ESP e perfis do tipo “ buraco”.

	<b>Prof. (mm)</b>	<b>V (km/h)</b>	<b>L (m)</b>	<b><math>RI^*</math> (m/km)</b>	<b><math>F_{max}</math> (kN)</b>
<b>BURACO</b>	100,00	60,0	60,0	7,72	231,05
	100,00	80,0	60,0	4,69	201,12
	100,00	80,0	150,0	4,80	201,12
	100,00	120,0	60,0	2,54	175,38

Em se tratando apenas dos resultados das forças dinâmicas produzidas, observa-se que as forças para os perfis do tipo “Buraco” e “Elevação” são de mesma magnitude, porém os valores das forças para o perfil do tipo elevação são mais elevados. Em relação ao peso da metade de um eixo simples padrão, ou seja, 41,0kN, tem-se que a força dinâmica chega a ser até cinco vezes maior que o valor da força estática, para os perfis analisados. Assim, ao se dimensionar o pavimento onde se tenha defeitos concentrados, como elevações e buracos, deve-se considerar o valor da carga dinâmica e não o valor da carga estática sob risco de que o projeto seja subdimensionado.

Tabela 5.8 – Resultados para o ESP e perfis do tipo “elevação”.

	Altura (mm)	V (km/h)	L (m)	RI* (m/km)	F <sub>max</sub> (kN)
<b>ELEVAÇÃO</b>	100,00	60,0	60,0	7,72	235,22
	100,00	80,0	60,0	4,69	235,22
	100,00	80,0	150,0	4,80	235,22
	100,00	120,0	60,0	2,54	221,44

A Figura 5.7 apresenta os resultados das análises em forma gráfica e os ajustes lineares que representam a relação das forças estáticas e dinâmicas com o Índice de Irregularidade (RI\*), dados os perfis longitudinais do tipo buraco e elevação, incluindo todos os valores de elevações/depressões analisados (30, 60 e 100 mm).

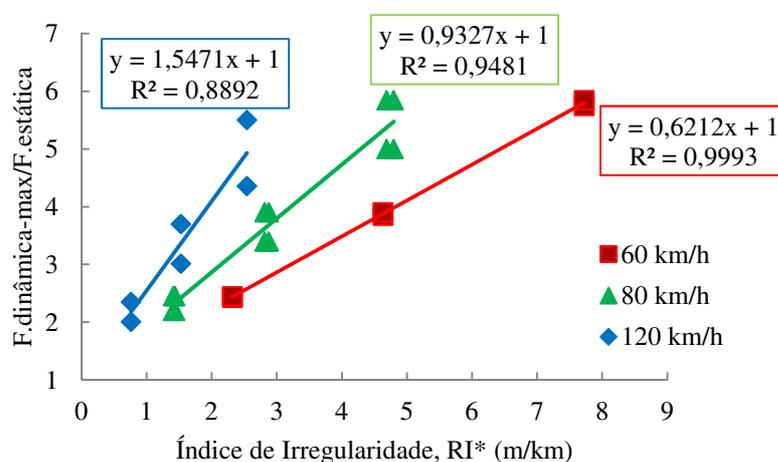


Figura 5.7 – Relação força versus RI\* para perfis em buraco e elevação para caminhão ESP.

Para a passagem do caminhão ESP na velocidade de 80 km/h a relação força versus RI\* permanece praticamente a mesma quando comparada com o RI, obtido com os parâmetros do *Golden car*, e é dada pela seguinte Equação:

$$\frac{F_{dm}}{F_e} = 0,9327 \cdot RI^* + 1 \quad (R^2 = 0,9481) \quad (5.4)$$

Comparando-se a Equação (5.4), obtida com o ESP, versus a Equação (5.1), obtida para o *Golden car*, para os perfis buraco e elevação, observa-se que as equações obtidas são similares. A Tabela 5.9 apresenta os resultados das análises para as diversas combinações de perfis compostos por uma onda senoidal, em que trafega um eixo simples padrão (ESP). Percebe-se que os valores são cerca de 22% maiores que o carregamento estático, porém

muito menores que os valores calculados quando o veículo do tipo ESRD trafega sobre defeitos pontuais como buraco ou elevações.

Tabela 5.9 – Resultados para o ESP e perfis senoidais simples.

SENO1	A (mm)	C(m)	0,001 C/A	V (km/h)	L (m)	RI* (m/km)	F <sub>max</sub> (kN)
	20,00	20,00	1,00	60,00	60,00	1,89	43,78
	20,00	20,00	1,00	80,00	60,00	2,82	49,44
	20,00	20,00	1,00	80,00	150,00	6,45	49,44
	10,00	10,00	1,00	120,00	60,00	2,97	48,58

Na Figura 5.8 apresenta-se a relação gráfica entre RI\* e força dinâmica/força estática.

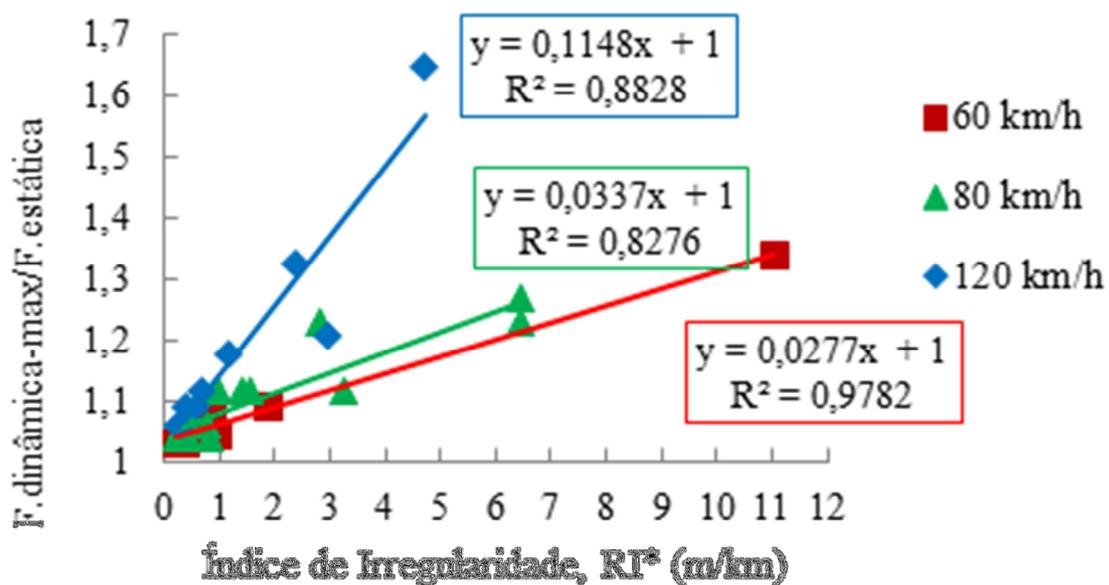


Figura 5.8 – Resultado da relação força versus RI\* para perfis seno para ESP.

Percebe-se, por meio da Figura 5.8, que a relação força e RI\* dada para a velocidade de 80 km/h para um ESP sobre ondas senoidais pode ser expressa como:

$$\frac{F_{dm}}{F_e} = 0,0337 \cdot RI^* + 1 \quad (5.5)$$

A Tabela 5.10 apresenta os resultados mais relevantes das simulações via Simulink para os perfis compostos. Verifica-se que a magnificação dos esforços sobre o pavimento, decorrente do tráfego do veículo sobre perfil irregular é superior aos resultados produzidos por perfil longitudinal representado por apenas uma onda senoidal, nesse caso a magnificação é da ordem de 30%.

Tabela 5.10 – Resultados para o ESP e perfis senoidais compostos

	A <sub>1</sub> (mm)	C <sub>1</sub> (m)	0,001 C <sub>1</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> (mm)	C <sub>2</sub> (m)	0,001 C <sub>2</sub> /A <sub>2</sub>	V (km/h)	L (m)	RI* (m/km)	F <sub>max</sub> (kN)
SENO2	10,00	10,00	1,00	20,00	20,00	1,00	60,00	60,00	4,84	52,21
	10,00	10,00	1,00	20,00	20,00	1,00	80,00	60,00	4,61	51,41
	10,00	20,00	2,00	20,00	40,00	2,00	80,00	150,00	5,22	30,71
	10,00	10,00	1,00	20,00	20,00	1,00	120,00	60,00	3,83	64,27

Os resultados das forças dinâmicas dividido pela força estática relacionada ao valor do IRI\* são apresentados na Figura 5.9, onde também estão incluídas as equações de regressão linear que relacionam para cada velocidade força versus RI\*.

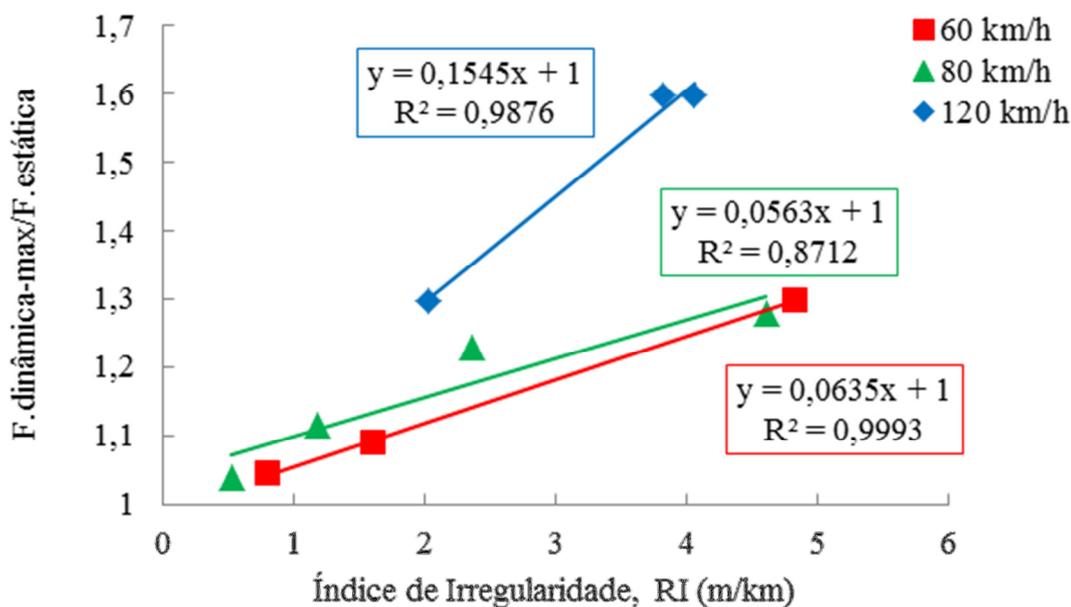


Figura 5.9 – Resultado da relação força versus IRI para perfis seno para ESRD

Para a velocidade de 80 km/h e um ESP sobre ondas senoidais compostas, a razão de força dinâmica versus coeficiente de irregularidade RI\* é dada pela seguinte Equação:

$$\frac{F_{dm}}{F_e} = 0,0563 \cdot RI^* + 1 \quad (R^2 = 0,8712) \quad (5.6)$$

A fim de se atender as premissas desenvolvidas para o estudo e dimensionamento do pavimento é necessário que sejam apresentadas a relação RI versus Força. Logo, o valor de RI utilizado vem das simulações em que o veículo Golden Car foi usado e para a Força, utilizaram-se os valores simulados com ESP (eixo simples padrão), para os mesmos perfis e diferentes velocidades. Na Figura 5.10 apresentam-se as relações matemáticas RI versus Força para os perfis buraco e elevação.

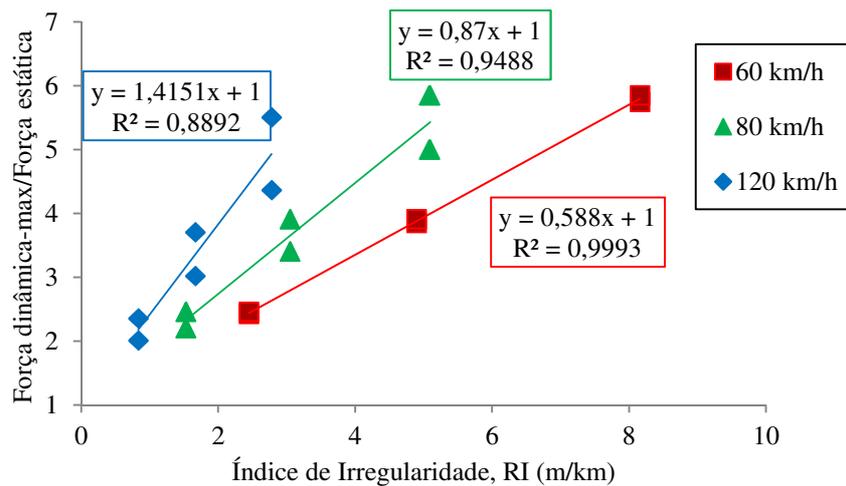


Figura 5.10 - Força versus IRI para perfis “Buraco” e “Elevação”.

Para o caso específico de velocidade a 80 km/h o RI representa o IRI e sua relação com a força dinâmica relativa é dada por:

$$\frac{F_{dm}}{F_e} = 0,87 \cdot IRI + 1 \quad (R^2 = 0,9488) \quad (5.7)$$

Percebe-se, por meio da Equação(5.7), que a relação força versus IRI, dada para a velocidade de 80 km/h por um caminhão ESRD sobre perfis do tipo “Buraco” e “Elevação”, é semelhante àquela obtida com o RI\* na Equação(5.4). Portanto, a relação anterior é próxima e validada para o caso onde se deseja calcular qualquer uma das variáveis contidas na Equação, porém deve-se utilizar a Equação(5.7), já que somente ela a rigor obedece à definição internacional de irregularidade.

Com intuito de generalizar os resultados apresentados na Figura 5.10, realizou-se estudo por regressão linear múltipla e de correlação entre a variável dependente (força relativa) e as variáveis dependentes (velocidade,  $v$ , e irregularidade, RI).

A regressão linear é utilizada para compor a representação matemática a partir de uma série de dados calculados. Em uma regressão linear múltipla, o modelo é dado pela seguinte Equação:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m \quad (5.8)$$

onde se tem que a variável dependente, Y, se relaciona às variáveis independentes,  $x_1, x_2, \dots, x_m$  por meio dos respectivos coeficientes,  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ , calculados a partir do método dos mínimos quadrados.

Para o caso estudado nesta tese, em que a força é calculada a partir do RI e velocidade, a Equação (5.8) é aplicada, considerando a força como variável dependente, Y, e RI e velocidade como variáveis independentes. A seguir apresentam-se os coeficientes calculados, conforme a Tabela 5.11, a partir do método dos mínimos quadrados.

Tabela 5.11 – Coeficientes calculados para expressão dada pela regressão linear múltipla

Variáveis	Coeficientes
Interseção	-0,905 ( $a_0$ )
RI ( $x_1$ )	0,718( $a_1$ )
V( $x_2$ )	0,105( $a_2$ )

Assim, tem-se a expressão geral que representa o cálculo da força por meio das variáveis velocidade e do RI:

$$Y = -0,905 + 0,718RI + 0,105V \quad (5.9)$$

O coeficiente de correlação é de grande importância na análise de duas variáveis aleatórias. A partir dele é medida a interdependência linear entre variáveis aleatórias, isto é, o valor de correlação mede a acurácia com a qual cada uma das variáveis aleatórias pode ser aproximada por uma função linear em outra variável. A partir da Tabela 5.12, em que são mostrados os valores de correlações entre variáveis, tem-se que a força se correlaciona ao RI e da velocidade com coeficientes de determinação de 0,621 e 0,6434, respectivamente. Já a relação entre as variáveis RI e velocidade (V) é aproximadamente zero.

Para ajuste perfeito entre variáveis, o valor da correlação deve ser 1, e para a relação inexistir o valor deve ser 0. Os valores calculados em torno de 0,6 demonstram que a relação entre variáveis não apresenta ajuste perfeito, porém são correlacionáveis.

Tabela 5.12 – Correlação entre variáveis

	<i>Fd/Fe</i>	<i>RI</i>	<i>V</i>
Fd/Fe	1		
RI	0,6218	1	
V	0,6434	1,44E-17	1

A seguir, por meio da Tabela 5.13, apresenta-se o grau de confiabilidade dessa expressão dado pelos valores coeficientes de regressão. Observa-se que o valor ajustado é da ordem de 0,78, mostrando que a Equação definida é representativa para calcular a Força dado o RI e a velocidade.

Tabela 5.13 – Determinação de grau de confiabilidade da expressão dada pela Equação(5.9).

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,894819601
R-Quadrado	0,800702118
R-quadrado ajustado	0,781721367

A fim de representar o plano que simboliza a distribuição dos pontos calculados para três eixos, Força, RI e velocidade, construiu-se, conforme apresentado pela Figura 5.11, a representação tridimensional do plano separado por zonas, onde se podem identificar as regiões onde a relação força dinâmica versus força estática,  $F_d/F_e$ , são semelhantes dados os diferentes valores de RI e de Velocidade. Observa-se que para o plano apresentado tem-se que os valores  $F_d/F_e$  crescem linearmente com aumento da velocidade e do RI.

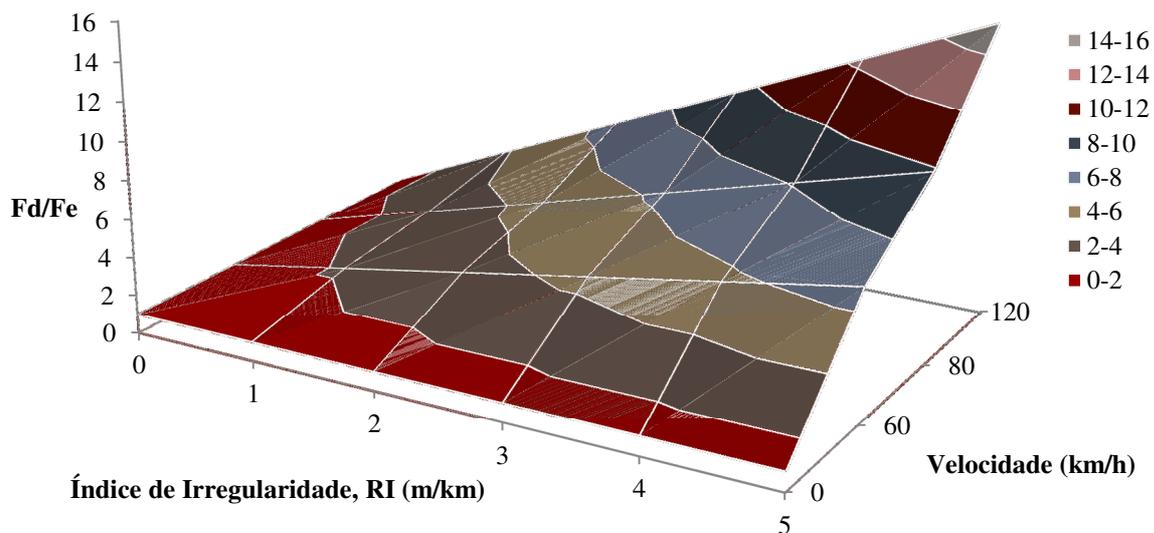


Figura 5.11 - Força versus RI para perfis “Buraco” e “Elevação”

Por meio das análises de regressão linear e correlação entre variáveis é possível produzir uma série de dados a partir da Equação (5.9), onde se assume o RI variando de 0 a 5 e a velocidade de 60 a 140km/h.

Da mesma forma que para análise descrita anteriormente, foram realizados estudos estatísticos que geraram correlações na tentativa de generalizar os resultados das análises para perfis do tipo “Senoidal”. Para isso, inicialmente foram utilizados como dados de base os

valores calculados a partir das equações apresentadas pela Figura 5.12, para perfil dado por ondas senoidais.

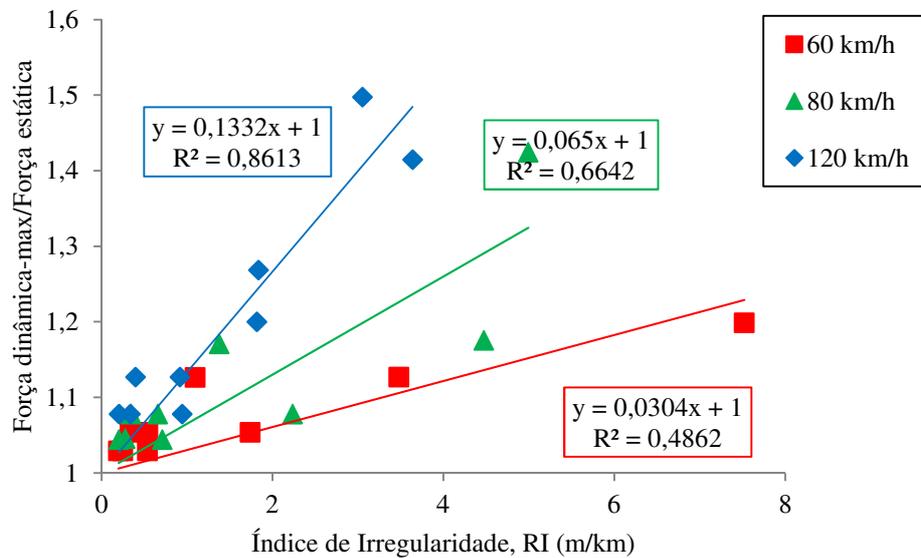


Figura 5.12 - Força versus RI para perfis “Seno2”

Destaca-se, por meio da Tabela 5.14, o resultado do estudo de correlação entre variáveis tomadas duas a duas para o caso onde a irregularidade imposta é do tipo seno1.

Tabela 5.14 – Correlação entre variáveis

	<i>Fd/Fe</i>	<i>RI</i>	<i>V</i>
<i>Fd/Fe</i>	1		
<i>RI</i>	0,557395684	1	
<i>V</i>	0,651458994	1,44E-17	1

Nesse caso tem-se que as correlações entre variáveis são mais fracas que para os parâmetros que envolviam as mesmas variáveis, porém para diferente perfil de pavimento. O estudo de regressão linear, entretanto, apresenta boa representatividade entre as variáveis múltiplas, *Fd/Fe*, *RI* e velocidade, conforme apresentado na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Determinação de grau de confiabilidade da expressão acima.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,85737318
R-Quadrado	0,73508877
R-quadrado ajustado	0,70985913

A regressão linear fornece também os coeficientes que são necessários para compor a Equação linear dada por:

$$Y = 0,828 + 0,57IRI + 0,009V \quad (5.10)$$

Como apresentado pela Equação (5.10) para as superfícies do tipo seno1, apresenta-se a Equação geral para o perfil composto por ondas senoidais curtas, perfil do tipo seno2, para a qual se obteve:

$$Y = 0,657 + 0,098IRI + 0,019V \quad (5.11)$$

Diante dessas equações, é possível estabelecer, para os perfis estudados, “Buraco”, “Elevação” e “Seno” qual a força dinâmica atuante sobre o pavimento considerando a velocidade de tráfego e a sua irregularidade, RI. As equações (5.9), (5.10) e (5.11) são expressões gerais compostas por regressão linear múltipla de onde são admitidas diferentes condições que produzem forças dinâmicas que serão amplamente utilizadas no Capítulo 6, como dados de entrada que servem ao programa capaz de calcular os esforços internos para pavimento. A partir dos valores dos esforços gerados é possível calcular a vida de fadiga da camada asfáltica e do subleito, e dessa forma dimensionar a altura das camadas do pavimento. Esse procedimento será mais bem detalhado no próximo capítulo.

# Capítulo 6

## 6. ANÁLISES NUMÉRICAS

Neste capítulo são apresentadas análises via método dos elementos finitos com o intuito de avaliar o estado de tensão-deformação das camadas de pavimento admitindo o uso de carga dinâmica. Para isso, foram catalogados valores de forças dinâmicas a partir das equações (5.9), (5.10) e (5.11) descritas no capítulo 5. A partir dos valores de força dinâmica obtidos para diferentes velocidades e irregularidades longitudinais são realizadas análises do tipo tensão-deformação utilizando o programa Mechsys, de onde se extraem os valores de tensão e deformação da fibra inferior da camada de asfalto e do topo do subleito. Esses valores são necessários para que seja calculado o número de passadas que o pavimento suporta, admitindo que o tráfego seja representado por um número de passadas de eixos simples padrão no tempo previsto em projeto. Por conseguinte, tem-se que com essa análise é possível determinar as espessuras das camadas que suportam o tráfego requerido para o período estimado. Os passos necessários para que o dimensionamento do pavimento seja possível, admitindo o carregamento dinâmico, a partir de determinada velocidade e irregularidade da superfície do pavimento passam pela determinação do carregamento dinâmico a forma como ele é aplicado sobre o pavimento. Em seguida é necessário, por meio de método numérico, aqui representado pelo método dos elementos finitos, calcular os esforços máximos na base da capa asfáltica e no topo do subleito, uma vez que as teorias dos modelos de fadiga utilizam-se desses dados para que sejam calculadas as vidas de fadiga. Em seguida tem-se o número de fadiga calculado, e esse valor é então comparado com o valor calculado convencionalmente admitindo o carregamento estático.

Ao fim desses procedimentos, tem-se a comparação dos resultados considerando a carga estática e dinâmica, apresentam-se as conclusões pertinentes e as possibilidades de aplicação da técnica desenvolvida nesta tese para outras análises.

## 6.1. CARREGAMENTO DINÂMICO

O procedimento necessário para que se calculem os esforços de tensão e deformação no pavimento asfáltico requer que sejam calculadas as forças dinâmicas aplicadas sobre o pavimento ao longo do tempo. Para isso, foram utilizadas as equações (5.9), (5.10) e (5.11), para determinar a força dinâmica máxima aplicada pelo ESP, dadas a velocidade do veículo e a irregularidade da superfície.

No caso de defeitos isolados (buracos ou elevações), com base na Equação de regressão (5.10) e admitindo valores de RI variando entre 1e 5 m/km, a cada 1m/km e velocidades variando entre 60 e 140 km/h, a cada 20km/h, obtêm-se os resultados apresentados na Tab. 6.1 para a relação entre a força dinâmica a ser aplicada e a força estática. Para uma análise de elementos finitos sob condições axissimétricas, deve-se usar apenas um pneu, ou seja, uma carga estática  $F_e=20,5$  kN. O segundo pneu será considerado por meio do princípio de superposição de efeitos no cálculo das tensões finais.

Tabela 6.1- Forças dinâmicas máximas para os perfis Buraco e Elevação

Perfil	RI (m/km)	v (km/h)	Fd/Fe	Força Estática (kN)
"Buraco" e "Elevação"	1,00	60,00	1,54	20,50
	2,00		2,25	
	3,00		2,95	
	4,00		3,65	
	5,00		4,36	
	1,00	80,00	2,12	
	2,00		2,82	
	3,00		3,52	
	4,00		4,23	
	5,00		4,93	
	1,00	100,00	2,69	
	2,00		3,39	
	3,00		4,10	
	4,00		4,80	
	5,00		5,51	
	1,00	120,00	3,27	
	2,00		3,97	
	3,00		4,67	
	4,00		5,38	
	5,00		6,08	

	1,00	140,00	3,84
	2,00		4,54
	3,00		5,25
	4,00		5,95
	5,00		6,66

Os resultados apresentados na Tabela 6.1 mostram que, aumentando a velocidade e a irregularidade, os valores de força dinâmica máxima podem magnificar em até 6,6 vezes a força estática, admitindo-se o caso extremo estudado de velocidade de 140 km/h e RI igual a 5 m/km. Entretanto, os valores mais comuns de RI no Brasil estão na faixa de 2 a 3, implicando em uma majoração dos esforços estáticos entre 2 e 5 vezes, dependendo da velocidade do veículo e da altura da elevação ou profundidade do buraco. Para o caso de perfis senoidais com ondas longas, fez-se uso da Equação de regressão (5.10) e os resultados são para os fatores de majoração da carga são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Forças dinâmicas máximas para os perfis Seno 1

Perfil	RI (m/km)	v (km/h)	Fd/Fe	Força Estática (kN)
<b>"Seno1"</b>	1,00	60,00	1,02	20,50
	2,00		1,08	
	3,00		1,14	
	4,00		1,19	
	5,00		1,25	
	1,00	80,00	1,08	
	2,00		1,13	
	3,00		1,19	
	4,00		1,24	
	5,00		1,30	
	1,00	100,00	1,13	
	2,00		1,18	
	3,00		1,24	
	4,00		1,30	
	5,00		1,35	
	1,00	120,00	1,18	
	2,00		1,24	
	3,00		1,29	
	4,00		1,35	
	5,00		1,40	
1,00	140,00	1,23		
2,00		1,29		
3,00		1,34		
4,00		1,40		
5,00		1,46		

Para esse perfil, embora ocorram aumentos de força dinâmica decorrentes do aumento dos valores de RI e velocidade quando comparados ao valor da força estática, observa-se que a proporção da força dinâmica diante da força estática é bem menor que para os perfis anteriores do tipo “Buraco” e “Elevação”. Para o perfil “Seno 1” têm-se aumentos máximos da ordem de até 46%. Para os perfis do tipo Seno 2, usou-se a Equação de regressão (5.11) e os resultados de fator de majoração de cargas para a análise dinâmica são apresentados na Tabela. 6.3.

Tabela. 6.3 - Forças dinâmicas máximas para os perfis Seno 2

Perfil	RI (m/km)	V (km/h)	Fd/Fe	Força Estática (kN)
<b>"Seno2"</b>	1,00	60,00	1,05	20,50
	2,00		1,15	
	3,00		1,24	
	4,00		1,34	
	5,00		1,44	
	1,00	80,00	1,15	
	2,00		1,25	
	3,00		1,35	
	4,00		1,44	
	5,00		1,54	
	1,00	100,00	1,26	
	2,00		1,35	
	3,00		1,45	
	4,00		1,55	
	5,00		1,64	
	1,00	120,00	1,36	
	2,00		1,46	
	3,00		1,55	
	4,00		1,65	
	5,00		1,75	
1,00	140,00	1,46		
2,00		1,56		
3,00		1,66		
4,00		1,75		
5,00		1,85		

Analisando os resultados da Tabela. 6.3, observa-se que o defeito do tipo “Seno 2” aumenta significativamente as forças dinâmicas, da ordem de até 85%, para irregularidades no pavimento dadas por ondas senoidais cujo comprimento de onda seja curto. Entretanto, tem-se que das três simulações, quais sejam, utilizando-se de perfis do tipo “Buraco e Elevação”, “Seno 1” e “Seno 2”, os maiores valores obtidos para força dinâmica são provenientes do

perfil “Buraco e Elevação”. Os valores de força dinâmica considerando as três análises serão utilizados como valores de entrada para as simulações no programa de elementos finitos, Mechsys.

## 6.2. ANÁLISE NUMÉRICA DE CARGAS MÓVEIS

Antes de dar início às simulações numéricas utilizando o Mechsys, é necessário que seja detalhada a forma como a força dinâmica máxima, calculada anteriormente usando os três perfis descritos no tópico 6.1, é aplicada ao longo do tempo. O método de aplicação da carga usada nesta pesquisa assume que a intensidade do carregamento varia no decorrer do tempo de acordo com uma função do tipo “*haversine*”, conforme descrito em Huang (2004). Esta função equivale à função seno ao quadrado e é muito utilizada em pavimentação rodoviária com base em observações empíricas de pistas instrumentadas. Para a utilização dessa função deve-se converter a posição relativa do veículo em relação a um ponto de interesse para o tempo de aproximação, com base na velocidade média do veículo e de uma distância de influência para uma carga uniformemente distribuída.

Tomando um ponto sobre a capa asfáltica como referência e nele medindo-se o carregamento atuante,  $q$ , conforme o pneu se aproxima desse ponto, tem-se que para uma dada distância superior à distância de influência, o veículo não gera tensões no ponto de referência. A partir de certa distância, contudo, quando o veículo se aproxima do ponto de referência, o valor do carregamento,  $q$ , aumenta gradativamente até atingir um valor de pico no momento em que o pneu do veículo está sobre o ponto de referência. A partir desse ponto o pneu volta a se distanciar do ponto de referência e com isso a carga,  $q$ , diminui gradativamente até que a distância seja tal que o carregamento não influencie mais o estado de tensões no ponto analisado, portanto, nesse instante  $q$  é zero.

Convertendo posição em período de tempo, a partir da explicação anterior, é possível definir a Equação da função “*haversine*”, designada como  $L(t)$ . Logo, para uma dada velocidade ( $v$ ), o veículo percorre certa distância total de influência ( $x$ ) no período de tempo de duração ( $d$ ). Para a simulação considera-se apenas a faixa de tempo ( $d$ ) durante a qual a carga pneu-pavimento influencia no ponto em análise, conforme ilustrado na Figura 6.1. Considerando a velocidade constante tem-se que a função  $L(t)$  é simétrica. Logo, admitindo-se que o ponto de referência seja alcançado no tempo zero, o início do carregamento deve ser calculado a partir

do tempo  $-d/2$ . Ao longo do tempo o valor de  $q$  aumenta até atingir o máximo em  $t=0$ , e em seguida o valor da carga pneu-pavimento decresce até zero no tempo  $t=d/2$ .

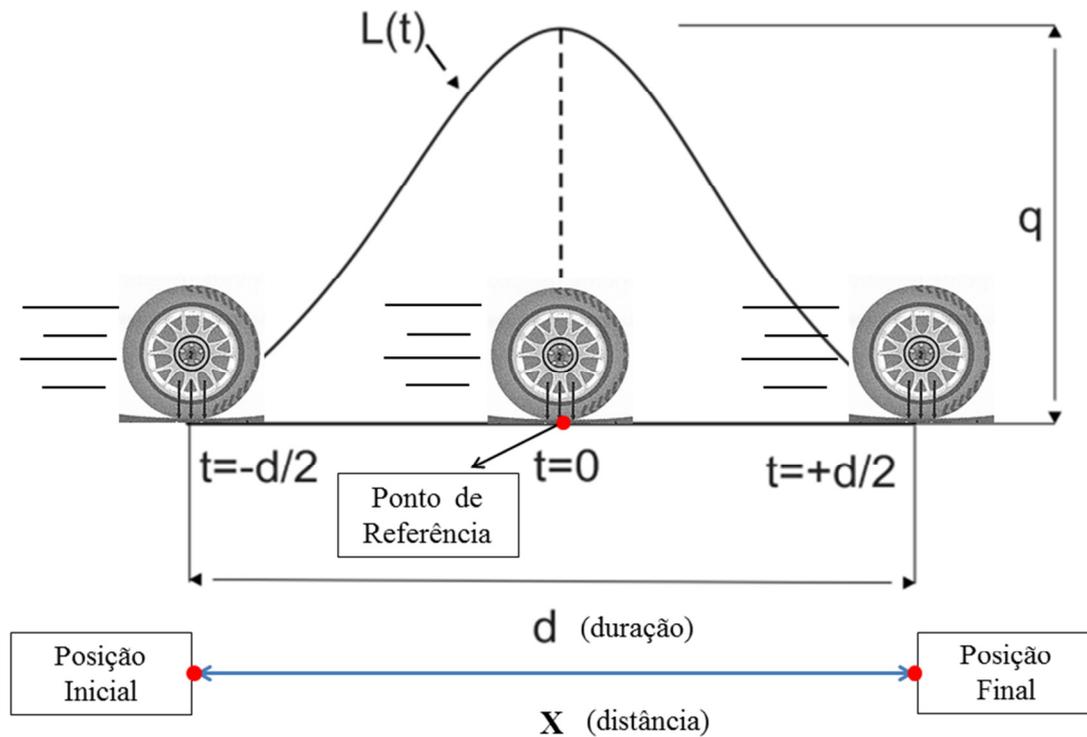


Figura 6.1 – Função haversine para simulação do carregamento dinâmico (Huang, 2004)

A função *haversine* é, portanto, representada da seguinte forma:

$$L(t) = q_{max} \text{sen}^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d}\right) \quad (6.1)$$

Sendo,  $d$  a duração da aplicação da carga e  $q_{max}$  o valor da carga máxima.

O tempo de duração,  $d$ , da aplicação da carga depende da velocidade do veículo,  $v$ , e do raio de contato do pneu,  $a$ . Em geral assume-se que o carregamento não tem efeito em um ponto, caso esse ponto esteja a uma distância de até  $6a$ , portanto, 3 vezes o diâmetro para ambos os lados. A duração,  $d$ , pode então ser calculada como:

$$d = \frac{12a}{v} \quad (6.2)$$

O desenvolvimento da formulação acima se encontra mais bem detalhado em Huang (2004). A função do tipo “*haversine*” será utilizada nas análises a seguir com o objetivo de simular o carregamento variável devido à passagem de veículos sobre os pavimentos rodoviários ao longo do tempo.

### 6.3. ANÁLISE NUMÉRICA DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO SOB CARGAS DINÂMICAS

A análise numérica realizada nesta tese para avaliação do estado de tensões e deformações geradas no pavimento em decorrência do tráfego de veículos pesados foi realizada pelo método dos elementos finitos, por meio do programa Mechsys. Para isso, foi utilizado o módulo do programa capaz de resolver problemas de equilíbrio do tipo dinâmico.

Para as análises a seguir foi arbitrada uma configuração de pavimento flexível simples, composto de um revestimento em concreto asfáltico e uma base de solo granular, assentes sobre o solo de subleito natural compactado. O esquema é típico de rodovias brasileiras sobre subleito com boa capacidade de suporte e é apresentado esquematicamente na Figura 6.2.

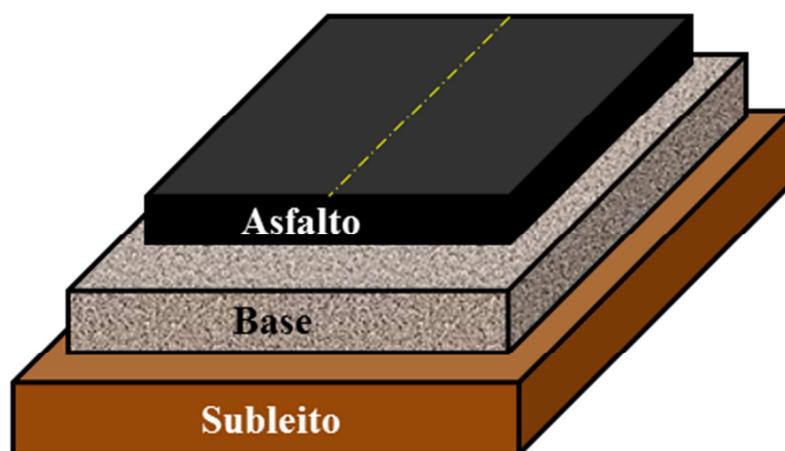


Figura 6.2 – Camadas do pavimento asfáltico flexível

No Brasil, as espessuras das camadas são calculadas tradicionalmente de acordo com o método de dimensionamento empírico prescrito pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, adaptado pelo professor Murilo Lopes (Souza, 1981) a partir do método americano desenvolvido pela AASHTO. Nesse método os dados de entrada são: o número previsto de passadas ( $N_p$ ) do eixo simples padrão durante o período de projeto (geralmente de 10 anos); e a capacidade de suporte do material de subleito, representada pelo Índice de Suporte Califórnia, ISC (ou CBR, *California Bearing Ratio*, em inglês). Para o caso em estudo adotou-se um tráfego de projeto equivalente a  $N_p=5 \times 10^7$  passadas de ESP, considerado como tráfego pesado, e um subleito com  $CBR=10\%$ , o que pode ser considerado bom, mas não incomum. Nesse caso, o método do DNIT prescreveria em um revestimento em concreto asfáltico denso do tipo CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) com espessura de 10 cm, sobre uma base de granular com CBR igual ou superior a 80% e espessura de 30 cm.

Ao contrário do método empírico, baseado em propriedades de suporte como o CBR, o método mecanicista faz uso de propriedades mecânicas de acordo com o comportamento dos materiais envolvidos, representados por modelos constitutivos considerados adequados para o tipo de problema em estudo. Quando se faz uso de soluções teóricas ou aproximadas, estas geralmente se baseiam na hipótese de camadas horizontais finitas de materiais elásticos (Burmister,1945). Neste caso é necessário fornecer os módulos de elasticidade ( $E$ ) e coeficientes de Poisson ( $\nu$ ) dos materiais. O modelo elástico linear é geralmente aceito como uma primeira aproximação para os materiais de subleito e base de pavimentos nos métodos de dimensionamento mecanicista. Entretanto, uma melhor representação do comportamento desses materiais é obtida com modelos elásticos não-lineares, em que se utiliza o Módulo de Resiliência ( $M_r$ ), obtido de ensaios triaxiais cíclicos, no lugar do módulo de elasticidade. Mesmo neste caso é possível encontrar um módulo equivalente para os materiais de base e subleito, a partir de um processo iterativo. Como o principal objetivo deste foca no comportamento a fadiga do revestimento asfáltico, e não nas camadas de solo, estes materiais serão considerados com o modelo elástico linear (Farias e Monteiro, 1996).

Embora em muitas análises também se adote um modelo elástico linear para a camada de revestimento, uma melhor representação do comportamento do concreto asfáltico deve considerar seu comportamento visco-elástico. Isto é feito na solução do problema via elementos finitos por meio dos coeficientes de amortecimento,  $\alpha_m$  e  $\alpha_k$ . Neste trabalho, o amortecimento é adotado apenas para a camada asfáltica, pois admite-se que nessa camada ocorra índice de amortecimento muito maior que nas demais. Os valores dos coeficientes adotados nesta pesquisa foram retirados dos estudos de Karlsson e Sorensse (2006), que obteve para o concreto asfáltico coeficientes  $\alpha_m$  e  $\alpha_k$  os valores de  $0,078s^{-1}$  e  $0,032s$ , respectivamente. Para isso, foram admitidos os valores de frequência igual a  $1,56$  Hz e de taxa de amortecimento,  $\xi$ , de  $5\%$  e utilizou-se a formulação descrita no capítulo 3. Devido à dificuldade de se encontrar valores de referência para os coeficientes de amortecimento, haja vista a pequena quantidade de pesquisas experimentais voltadas ao tema, adotaram-se os valores descritos acima para  $\alpha_m$  e  $\alpha_k$ . Entende-se, contudo, que são necessários mais testes experimentais para melhor definição dos valores dos coeficientes a serem utilizados nas simulações numéricas.

Os valores das espessuras das camadas, massas específicas ( $\rho$ ), coeficientes Poisson ( $\nu$ ), Módulo de elasticidade ( $E$ ) e os coeficientes de amortecimento ( $\alpha_k$  e  $\alpha_m$ ), utilizados na

simulação numérica são apresentados na Tabela 6.4. Para as análises a seguir o problema foi assumido do tipo axissimétrico. A partir dos dados descritos anteriormente e dos valores de pressão atuante sobre o eixo traseiro de roda dupla, são realizadas as simulações via método dos elementos finitos. Destaca-se que o módulo de elasticidade da camada de revestimento é apresentado na Tabela a seguir em duas unidades, kPa e psi, pois kPa é a unidade do sistema internacional e psi é a unidade em que o módulo de elasticidade deve ser introduzido na formulação empírica que calcula o número de fadiga da camada, admitindo a formulação usada nesta tese.

Tabela 6.4 - Parâmetros utilizados nas análises de elementos finitos.

Camada	Altura da Camada (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$E$ (kPa) (E em psi)	$\alpha_k$ (s)	$\alpha_m$ (s <sup>-1</sup> )
Revestimento	0,10	23,0	0,30	3.000.000,0 (435.113,213)	0,032	0,078
Base	0,30	20,0	0,35	300.000,0	0,0	0,0
Subleito	0,60	20,0	0,40	60.000,0	0,0	0,0

A Figura 6.3 apresenta as configurações do problema onde se aplicam as condições de contorno e a divisão das camadas que compõem o pavimento. Observam-se também dois pontos destacados, A e B, esses pontos serão utilizados nas análises numéricas para a avaliação da relação tensão-deformação ao longo do tempo.

As camadas do pavimento, divididas em revestimento, base e subleito, seguem os parâmetros descritos na Tabela 6.4. As condições de contorno aplicadas simulam o eixo simples de roda dupla, eixo padrão, trafegando sobre o pavimento. As cargas aplicadas sobre o pavimento obedecem à função do tipo “haversine” para as duas rodas. Nesse caso simula-se apenas uma das rodas do eixo traseiro de um quarto de caminhão, em que o centro da roda é o eixo de simetria do problema. Ao rotacionar 360° o carregamento, ao redor do eixo de simetria tem-se a representação da aplicação da carga sobre o pavimento em três dimensões, logo, optou-se por uma análise do tipo axissimétrica. Os elementos que compõem a geometria do problema são determinados a seguir, sendo eles, as restrições de movimentação verticais e horizontais do pavimento, as dimensões das camadas, a aplicação da carga e a representação do eixo de simetria.

Destaca-se na Figura 6.3 a apresentação do carregamento estático sobre os pneus. Contudo, como a análise é do tipo axissimétrica a carga utilizada na simulação,  $q$ , corresponde apenas a um pneu do eixo traseiro. Os outros valores são apresentados apenas para que se compreenda que o eixo do tipo simples de rodagem dupla é utilizado, 82kN e calibração dos pneus a 560 kPa. Considerando a pressão de enchimento do pneu  $q = 560\text{kPa}$  (80 psi) e a força de  $F=20,5$  kN por pneu, e assumindo-se uma área de contato pneu-pavimento circular, determina-se um raio de aplicação  $a = 10,8$  cm ( $a = \sqrt{F / (\pi \cdot q)}$ ).

Entretanto, como visto anteriormente, as cargas aplicadas correspondem ao carregamento dinâmico e não estático. Assim, os valores de carregamento estático são importantes para se definir os valores de carregamento dinâmico máximo e para que posteriormente sejam avaliados os resultados das simulações de vida de fadiga comparativamente, para carregamento estático e dinâmico. A carga dinâmica máxima em kPa será  $q_{max} = 560 \cdot F_d / F_e$  e será aplicada como uma variável no tempo de acordo com a função *heaversine* na Equação (6.1). Nesta Equação, considerando o raio do pneu  $a = 10,8$  cm (0,108 m) e a velocidade do veículo de 80 km/h (22,2 m/s), tem-se um tempo de duração total da carga  $d$  igual 0,058 segundos de acordo com a Equação (6.2)

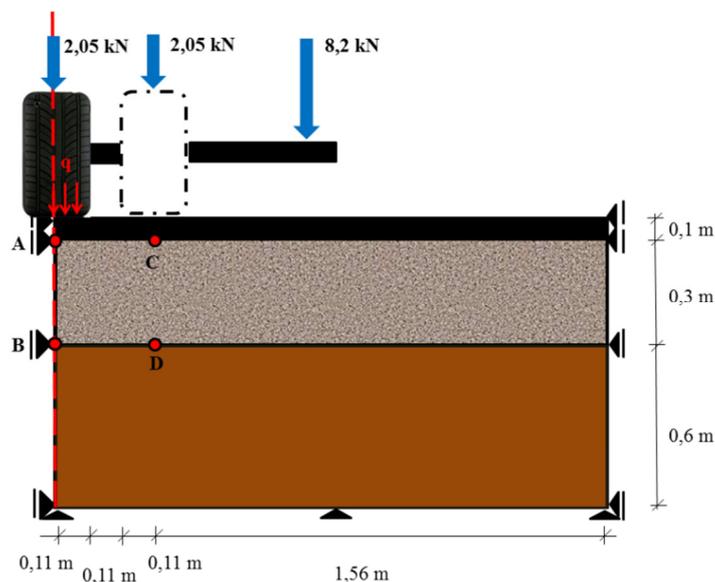


Figura 6.3 – Descrição da geometria e condições de contornos do problema

Os resultados de tensões e deformações serão avaliados a partir dos pontos A, B, C e D, dados na Figura 6.3. Os pontos A e C foram escolhidos para que se avaliem as deformações e tensões de tração na base da fibra inferior do revestimento, que são parâmetros de entrada

para os modelos de fadiga. O ponto A está localizado no eixo de simetria, na interface das camadas de revestimento e base, local onde se avaliam as deformações e tensões horizontais. O ponto C está localizado verticalmente no eixo de simetria correspondente ao segundo pneu do ESP, o qual fica a uma distância de 30 cm do centro do primeiro pneu (ponto A), conforme observado na Figura 6.3. As tensões e deformações neste ponto C têm a função de mostrar qual a influência do carregamento,  $q$ , para fins de superposição de efeitos.

Essa informação é importante, pois a partir dela é possível saber qual seria o acréscimo ou decréscimo de deformação ou de tensão horizontal no ponto A decorrente do carregamento gerado por outro pneu do quarto de caminhão. Esse artifício é utilizado, pois a análise do tipo axissimétrica não aceita que se aplique o carregamento dos dois pneus do eixo traseiro. Logo, a fim de que o resultado calculado seja mais real, optou-se pelo uso desse artifício.

O mesmo artifício é utilizado para avaliar as deformações e tensões verticais no ponto B, correspondente ao topo do subleito, onde é verificado o critério de projeto quanto a deformações permanentes. Nesse caso, os resultados de tensão vertical no ponto B são somados ao do ponto D, para considerar a superposição do efeito devido ao outro pneu.

Na Figura 6.4 apresenta-se a discretização do domínio, por meio de elementos quadráticos de oito nós. Apresentam-se também as dimensões de cada camada do pavimento, o ponto de aplicação de carga e os nós onde se realizam as análises do estado de tensão deformação.

A espessura do subleito é teoricamente infinita, mas no MEF deve-se fixar um domínio finito. Portanto, adotou-se uma espessura de 60 cm para o subleito. Considerando-se que o raio da área carregada é de 10 cm, a espessura total do modelo (100 cm) é suficiente para minimizar problemas de contorno.

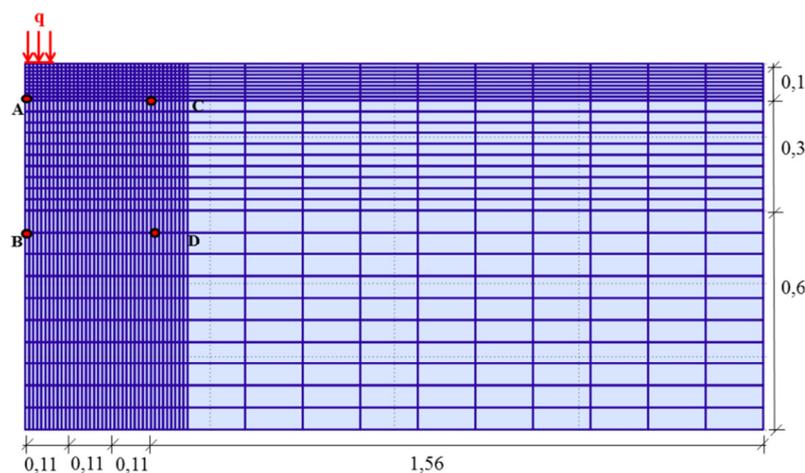


Figura 6.4 – Discretização do domínio via método dos elementos finitos

Após a descrição da aplicação das condições de contorno, da discretização do domínio, do método numérico utilizado, bem como dos nós de interesse para a análise do estado de tensão-deformação de onde se calculam o número de fadiga para as camadas de revestimento e subleito, tem-se a partir dos valores de magnificação de cargas estáticas dados nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 os resultados das análises numéricas quanto às tensões e deformações verticais e horizontais.

Para análise dos resultados a seguir é necessário que o leitor conheça a convecção de sinais do programa Mechsyst, utilizado nesta pesquisa. Ele segue a convecção da mecânica dos sólidos, em que os valores positivos se referem à tração e negativos à compressão, portanto, contrária à convenção adotada na mecânica dos solos. É necessário informar também que os resultados apresentados são para sobrecarga dinâmica onde o veículo trafegou a 80 km/h e os valores apresentados são para o instante em que a sobrecarga é máxima,  $q_{max}$ , no eixo de simetria do carregamento.

A Figura 6.5 apresenta a distribuição das deformações horizontais no maciço. Para as Figuras apresentadas, 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7 admitiu-se  $RI = 1$ ,  $F_d/F_e = 1,05$ , perfil do tipo Seno 2 e velocidade de 60km/h. Verifica-se que os valores de deformação são da ordem de  $10^{-4}$ , com valores maiores de tração na região entre a fibra inferior do revestimento. Em especial para a camada de revestimento asfáltico esse valor é importante para que se calcule a sua vida de fadiga.



Figura 6.5 – Deformações na direção x, tração representada por valores positivos

O modelo de fadiga considera também a possibilidade de cálculo a partir da tensão de tração na fibra inferior do revestimento. Por isso, apresenta-se na Figura 6.6 a distribuição das tensões horizontais no maciço, onde novamente se percebe que para a região inferior do revestimento ocorrem os maiores valores de tração.



Figura 6.6 – Tensão normal horizontal, direção x ,tração representada por valores positivos.

Assim como foi apresentado o estado de deformação e tensão horizontal para o maciço com vista ao estudo da vida de fadiga da camada de revestimento, apresentam-se as deformações e tensões verticais atuantes no maciço. Na Figura 6.7 observa-se a distribuição das deformações verticais. Aqui as deformações com valores negativos representam compressão. Observa-se que a região próxima ao topo do subleito tem os maiores valores de deformação em compressão. Como a camada do subleito é mais compressível e mais espessa que as demais, os valores de deformação nessa região são estudados de forma a avaliar o seu impacto na superfície do pavimento, por meio de um modelo de previsão de deformação permanente.

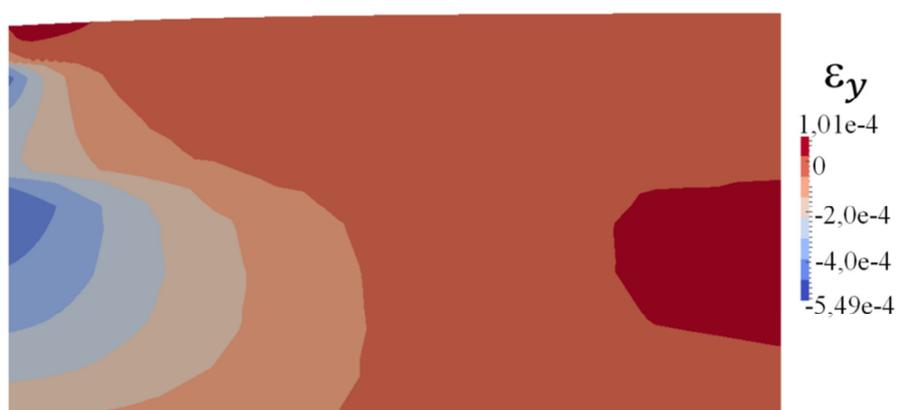


Figura 6.7 – Deformações verticais, compressão representada por valores negativos

A deformação permanente da camada de subleito pode ser calculada a partir da deformação vertical ou da tensão vertical, dependendo do modelo adotado. Por isso, apresenta-se na Figura 6.8 a distribuição da tensão vertical no maciço, em que os maiores valores ocorrem no topo do revestimento e são dissipadas com a profundidade.



Figura 6.8 – Tensão vertical, compressão representada por valores negativos

As Figuras anteriores apresentam os estados de deformações e tensões verticais e horizontais em um instante de tempo quando uma dada configuração de perfil, velocidade e carregamento foram admitidas. A seguir apresentam-se para a configuração descrita os valores de  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  ao longo do tempo. Para cada caso, o tempo total é equivalente ao período de tempo que a roda do veículo leva para passar sobre o ponto de referência, dada uma velocidade, conforme explicado no tópico que descreve o comportamento das cargas móveis. Além disso, apresenta-se o comportamento dos pontos no tempo para as condições em que se considerou ou não o efeito do amortecimento.

Na Figura 6.9 apresenta-se a relação  $\varepsilon_x$  versus tempo. Os resultados estão plotados nos pontos A e C, descritos na Figura 6.4, conforme explicado anteriormente. Esses pontos estão localizados na fibra inferior do revestimento, no eixo das rodas que compõem um quarto do eixo traseiro do veículo. Os valores correspondem a um único pneu, mas a superposição dos efeitos dos dois pneus no ponto A pode ser obtida diretamente pela soma dos valores de  $\varepsilon_x$ , calculados nos pontos A e C, em que os valores positivos representam tração e os negativos representam compressão.

Na Figura 6.9 mostram-se também os valores de deformação horizontal, em que se considerou o amortecimento,  $\varepsilon_{xd}$ , para os pontos A e C, o que permite verificar a defasagem de tempo e magnitude da deformação horizontal máxima considerando e desconsiderando o amortecimento. Além disso, é possível comparar os valores com a deformação horizontal obtida com uma análise estática.

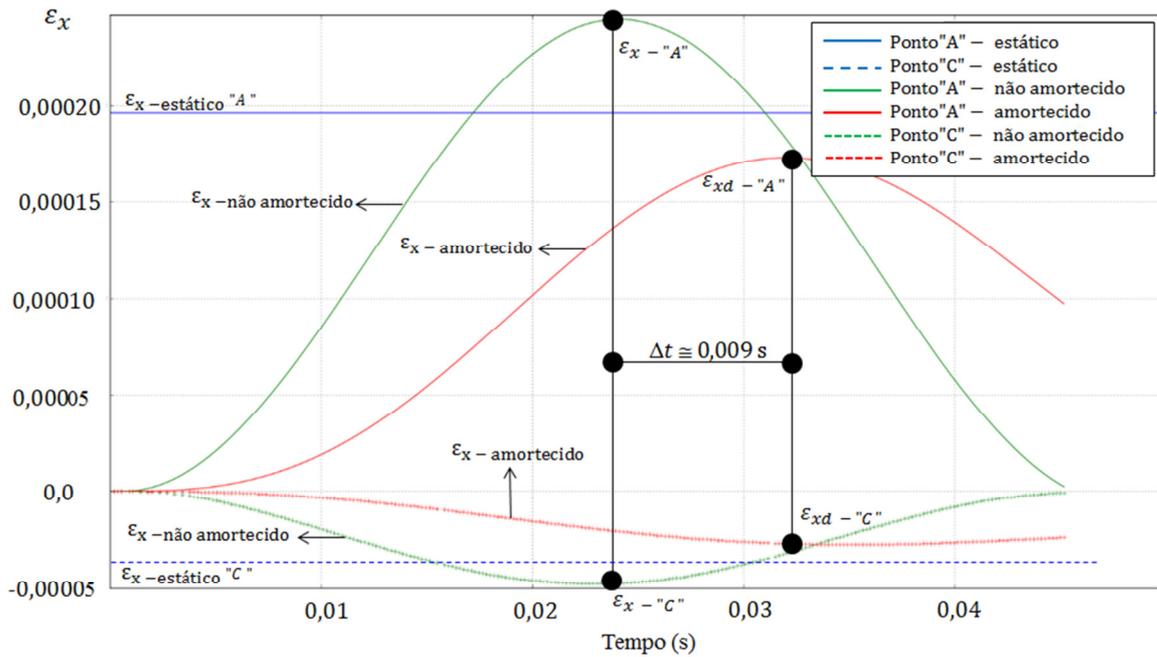


Figura 6.9 – Deformação horizontal nos pontos “A” e “B” ao longo do tempo

Após analisar os resultados da deformação horizontal ao longo do tempo, avaliou-se a tensão horizontal para os pontos A e C. A Figura 6.10 apresenta a relação  $\sigma_x$  versus tempo, considerando e desconsiderando o amortecimento e comparando os resultados das análises dinâmicas à estática e entre si. Dessas análises tem-se que os comportamentos amortecidos e não amortecido dos pontos são qualitativamente semelhantes, incluindo o tempo de defasagem entre as análises dinâmicas, quando se considera tensões ou deformações.

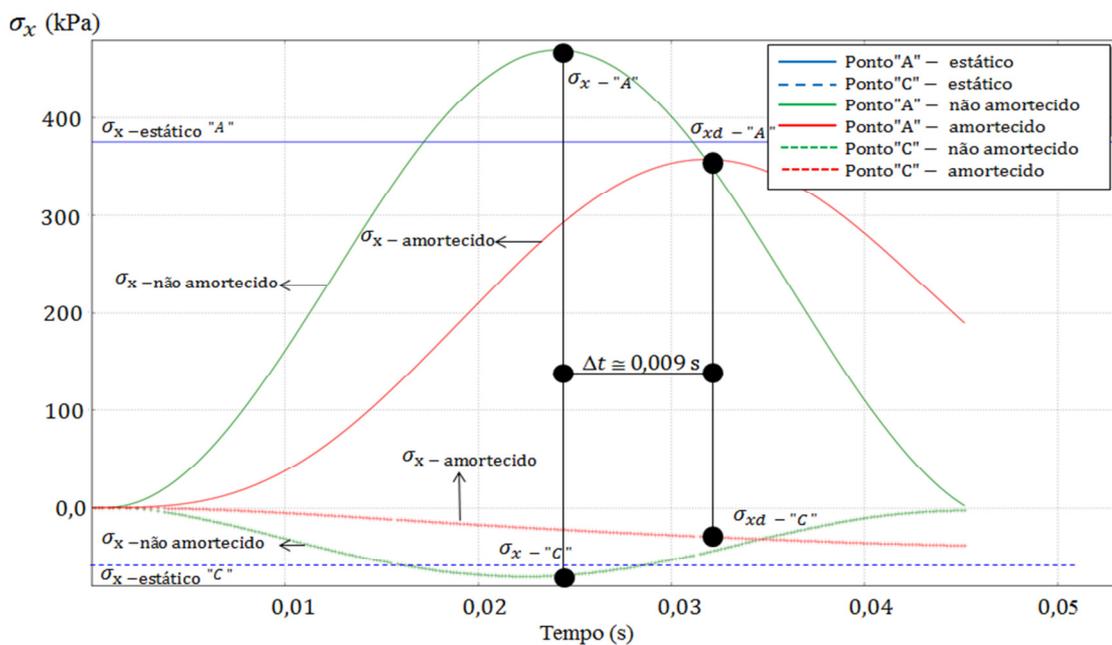


Figura 6.10 – Tensão horizontal nos pontos “A” e “B” ao longo do tempo

A partir dos dados anteriores é possível calcular a vida de fadiga do revestimento, já que se têm os valores de deformação e tensão horizontal, estática e dinâmica com e sem amortecimento. Para calcular o consumo de deformação permanente da camada mais compressível do pavimento, subleito, é necessário que sejam avaliados os resultados das análises numéricas dos pontos B e D, localizadas sob o eixo das rodas que compõem o quarto de carro do caminhão de eixo padrão, conforme apresentado na Figura 6.3. Das análises dos pontos, obtêm-se os comportamentos de deformação vertical,  $\varepsilon_y$ , e tensão vertical,  $\sigma_y$ .

Na Figura 6.11 apresentam-se resultados de deformação vertical,  $\varepsilon_y$ , versus o tempo. Nesta análise apresenta-se a deformação vertical sem amortecimento ( $\varepsilon_y$ ) e com amortecimento ( $\varepsilon_{yd}$ ) da camada de revestimento, além do valor de deformação vertical para carregamento estático. Os valores negativos apresentados, em formato de uma gaussiana invertida, representam a compressão do ponto B ao longo do tempo, de forma que quanto mais próximo do ponto B a carga dinâmica se aproxima, maior é a compressão da camada e maior é o deslocamento do ponto. À medida que a roda ultrapassa o ponto B e se afasta, o ponto passa a retornar ao local original.

Assim, como para a análise anterior, a superposição dos efeitos dos dois pneus é obtida pela soma direta dos valores de deformação vertical nos pontos C e D. Logo, têm-se os valores a serem utilizados no modelo de deformação permanente, de forma que se possa entrar com os valores de deformação vertical estática e dinâmica, de forma comparativa. O resultado da defasagem entre as análises dinâmicas, amortecida e não amortecida, para deformação vertical é menor que a apresentada para os resultados de deformação horizontal.

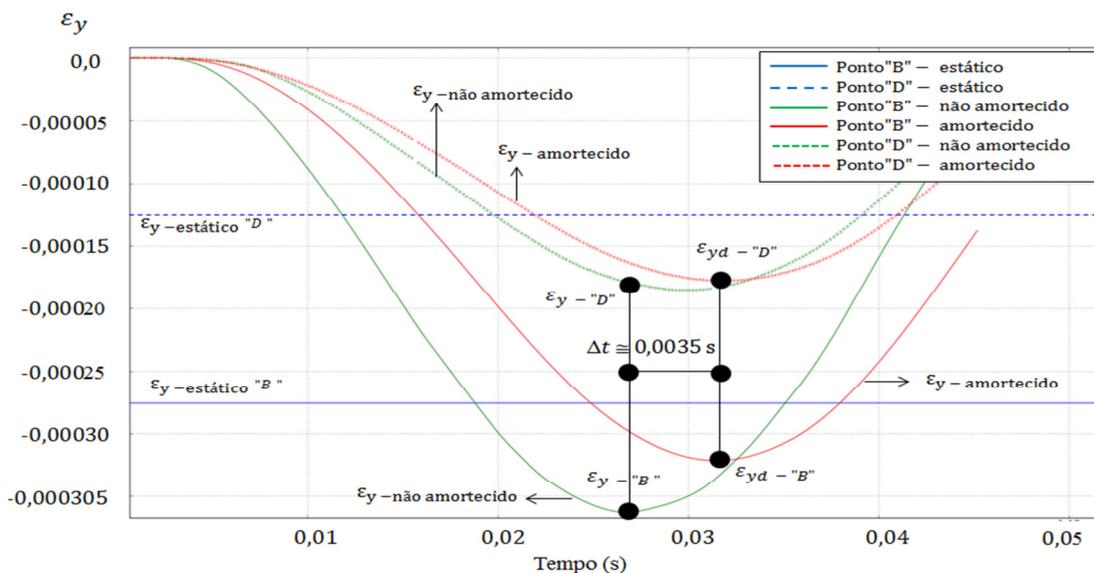


Figura 6.11 – Deformação vertical nos pontos B e D ao longo do tempo

Na Figura 6.12 apresentam-se os resultados obtidos para a relação tensão vertical,  $\sigma_y$ , versus tempo. Comparando a ordem de grandeza da tensão horizontal, apresentada pela Figura 6.10, à tensão vertical, apresentada pela Figura 6.12, tem-se que a tensão horizontal é aproximadamente 17 vezes maior que a vertical, para a mesma carga atuante sobre o pavimento. Logo, tem-se que os danos causados ao revestimento asfáltico, camada em que ocorre tração, são muito maiores que os causados ao subleito do pavimento, em que ocorre compressão, admitindo a configuração de pavimento estudada.

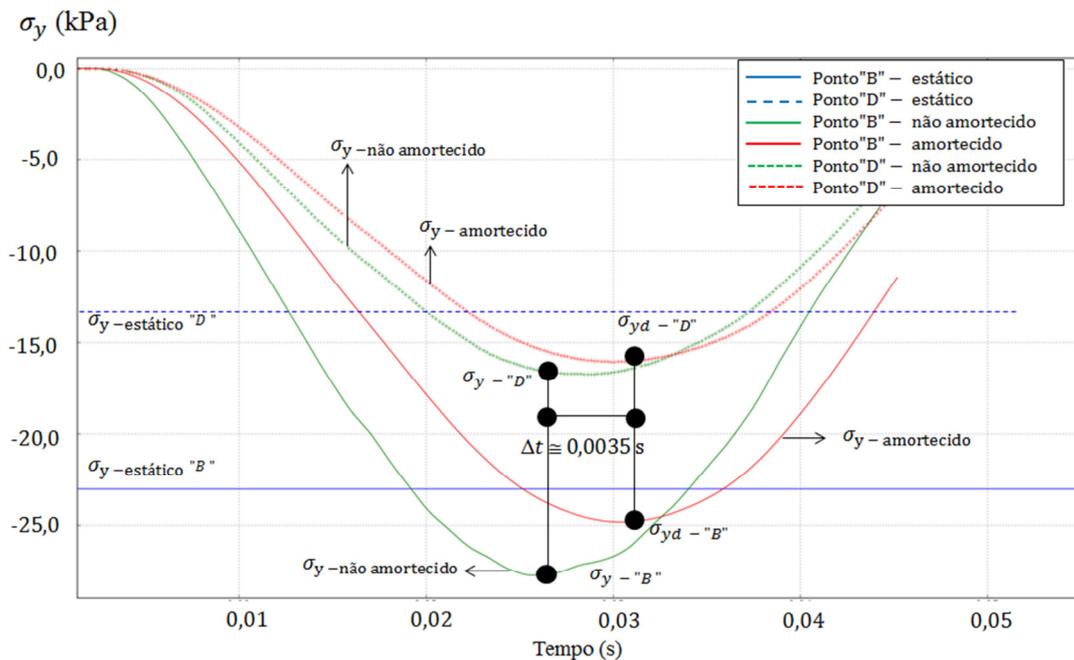


Figura 6.12 – Tensão vertical nos pontos B e D ao longo do tempo

Os resultados apresentados anteriormente são parte do conjunto das análises realizadas nesta tese e têm como objetivo ilustrar a gama de informações que foram obtidas. O objetivo principal desta tese, contudo, é a avaliação do comportamento do pavimento submetido a cargas dinâmicas atuantes sobre perfis para diferentes configurações de pavimentos, velocidades de tráfego e perfis longitudinais. Essa avaliação se dá por meio de análises dos resultados, como vista nas Figuras 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12, assim como pela avaliação da vida de fadiga da camada de revestimento e da deformação do subleito.

A seguir apresentam-se, de forma esquemática, a partir da Figura 6.13, os condicionantes envolvidos em uma avaliação de vida de fadiga do pavimento. A partir dessa Fig. é possível verificar a metodologia utilizada nesta tese para o cálculo do dimensionamento do pavimento. Ordenou-se de 1 a 5 variáveis necessárias para que se calcule a vida de fadiga das camadas de revestimento, utilizando-se para isso ferramentas numéricas apresentadas no capítulo anterior.

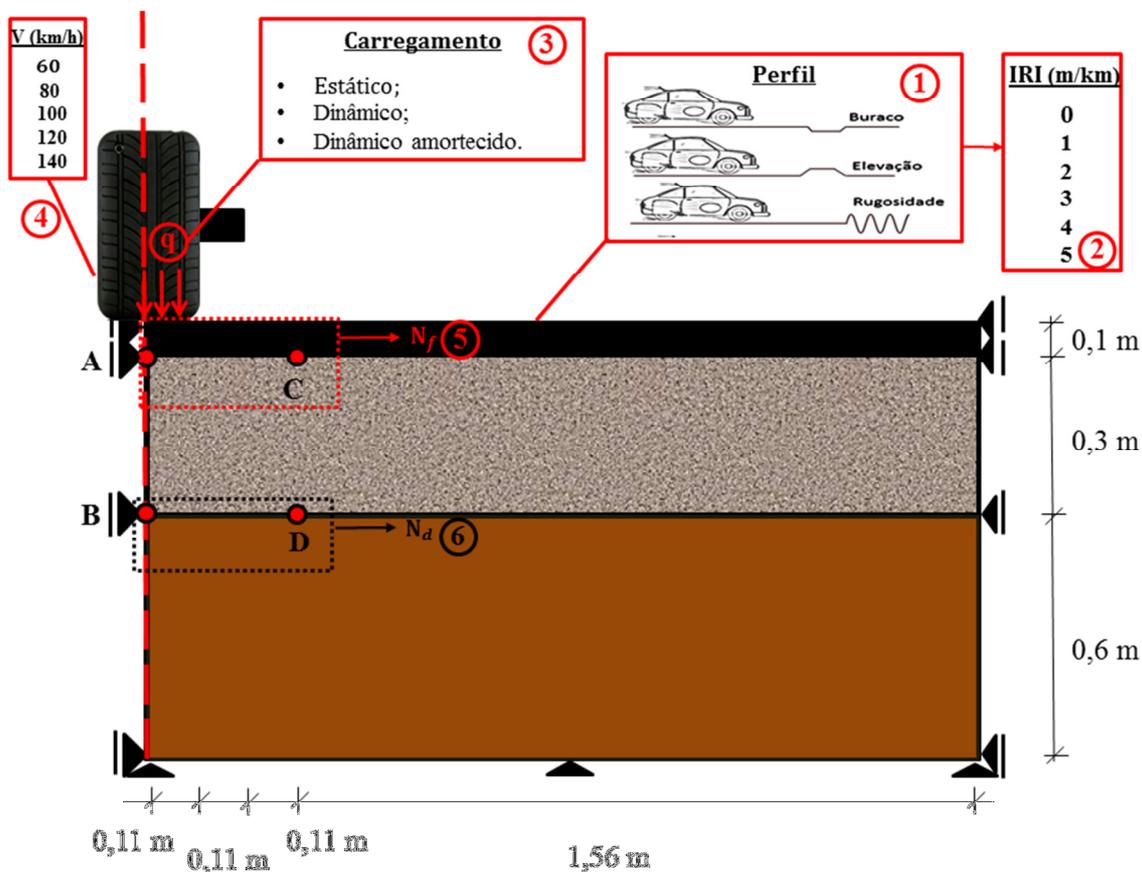


Figura 6.13 – Condicionantes para avaliação da vida de fadiga das camadas do pavimento

Resumidamente, pode-se dizer que para as análises realizadas utilizaram-se os condicionantes apresentados pela Figura 6.13 e as análises numéricas via SIMULINK e MECHSYS. O primeiro produziu para diversos perfis valores de RI e de força dinâmica. O segundo utilizou-se dos resultados do SIMULINK como dados de entrada para calcular os valores de deformação e tensão nos pontos “A”, “B”, “C” e “D”. Esses resultados são apresentados para cada um dos perfis a partir das Tabelas a seguir, em que as deformações de mesma direção foram somadas entre os pontos “A” e “C”, para o revestimento, e entre “B” e “D”, para o subleito.

Destaca-se nas Tabelas abaixo que a deformação horizontal calculada para carregamento estático é representada por  $\varepsilon_{x\text{est.}}$ , para o carregamento dinâmico por  $\varepsilon_x$  e o resultado de deformação horizontal em que a camada de revestimento é amortecida é dado por  $\varepsilon_{xd}$ . O mesmo ocorre para as deformações verticais, quando o carregamento é estático, têm-se,  $\varepsilon_{y\text{est.}}$ , dinâmico,  $\varepsilon_y$  e para o carregamento dinâmico amortecido pelo revestimento tem-se,  $\varepsilon_{yd}$ . Nas

Tabelas a seguir os valores das tensões horizontais e verticais são omitidos, já que a vida de fadiga é calculada utilizando apenas os valores de deformação.

Os resultados apresentados na Tabela 6.5 contemplam a variação dos valores de deformação horizontal e vertical, dados os valores de RI e velocidade para os perfis do tipo “Buraco” e “Elevação”. Observa-se que os resultados de deformação horizontal de maiores valores são para o carregamento dinâmico em que se considera o amortecimento. Esses valores têm influência direta sobre os valores de vida de fadiga.

Para os resultados das deformações verticais observou-se que a maior magnitude ocorre quando a camada de revestimento do pavimento não é amortecida e se submete o carregamento dinâmico. Em se tratando da comparação entre os efeitos do carregamento dinâmico e dinâmico quando a carga aplicada é amortecida, tem-se que as deformações possuem valores muito próximos, porém os valores de deformação onde o carregamento é dinâmico e não há amortecimento nas camadas de pavimento geram deformações verticais maiores.

Tabela 6.5- Parâmetros utilizados nas análises via MEF, perfis “Buraco” e “Elevação”

Perfil	RI (m/km)	v (km/h)	REVESTIMENTO			SUBLEITO		
			$\epsilon_{xest.}$	$\epsilon_x$	$\epsilon_{xd}$	$\epsilon_{yest.}$	$\epsilon_y$	$\epsilon_{yd}$
"Buraco" e "Elevação"	1,00	60,00	1,57E-04	2,48E-04	2,61E-04	-4,04E-04	-7,12E-04	-6,77E-04
	2,00			3,61E-04	3,80E-04		-1,04E-03	-9,86E-04
	3,00			4,74E-04	4,99E-04		-1,36E-03	-1,30E-03
	4,00			5,87E-04	6,18E-04		-1,69E-03	-1,60E-03
	5,00			6,99E-04	7,36E-04		-2,01E-03	-1,91E-03
	1,00	80,00		3,41E-04	3,68E-04		-9,76E-04	-9,19E-04
	2,00			4,54E-04	4,91E-04		-1,30E-03	-1,23E-03
	3,00			5,68E-04	6,14E-04		-1,63E-03	-1,53E-03
	4,00			6,81E-04	7,36E-04		-1,95E-03	-1,84E-03
	5,00			7,95E-04	8,59E-04		-2,28E-03	-2,14E-03
	1,00	100,00		4,35E-04	4,80E-04		-1,20E-03	-1,10E-03
	2,00			5,48E-04	6,05E-04		-1,51E-03	-1,39E-03
	3,00			6,62E-04	7,31E-04		-1,82E-03	-1,68E-03
	4,00			7,76E-04	8,56E-04		-2,13E-03	-1,96E-03
	5,00			8,90E-04	9,82E-04		-2,45E-03	-2,25E-03
	1,00	120,00		5,27E-04	5,91E-04		-1,40E-03	-1,24E-03
	2,00			6,41E-04	7,19E-04		-1,70E-03	-1,51E-03
	3,00			6,28E-04	6,89E-04		-1,67E-03	-1,78E-03
	4,00			8,69E-04	9,74E-04		-2,31E-03	-2,05E-03

	5,00			9,83E-04	1,12E-03		-2,61E-03	-2,02E-03
	1,00	140,00		6,22E-04	7,06E-04		-1,61E-03	-1,37E-03
	2,00			7,36E-04	8,36E-04		-1,91E-03	-1,62E-03
	3,00			8,50E-04	9,65E-04		-2,20E-03	-1,87E-03
	4,00			9,64E-04	1,10E-03		-2,50E-03	-2,12E-03
	5,00			1,08E-03	1,22E-03		-2,79E-03	-2,37E-03

A seguir apresentam-se os resultados de deformações horizontais e verticais para o perfil do tipo “senoidal” com ondas longas, considerando o carregamento estático, dinâmico e dinâmico com amortecimento do revestimento asfáltico. Os resultados são apresentados na Tabela 6.6 e obedecem à mesma lógica identificada para a Tabela 6.5 em que para o carregamento dinâmico com efeito do amortecimento as deformações horizontais são maiores. Já para as deformações verticais, os maiores valores são percebidos para o carregamento do tipo dinâmico sem amortecimento. Percebeu-se também que a ordem da magnitude das deformações horizontais e verticais para os perfis “Buraco” e “Elevação” são em torno de dez vezes maiores que para o perfil “seno 1”.

Tabela 6.6 - Parâmetros utilizados nas análises via MEF, perfis Seno1 ondas longas

Perfil	IRI (m/km)	v (km/h)	REVESTIMENTO			SUBLEITO		
			$\epsilon_{xest.}$	$\epsilon_x$	$\epsilon_{xd}$	$\epsilon_{yest.}$	$\epsilon_y$	$\epsilon_{yd}$
"Seno 1"	1,00	60,00	1,57E-04	1,64E-04	1,73E-04	-4,04E-04	-4,72E-04	-4,49E-04
	2,00			1,73E-04	1,82E-04		-4,97E-04	-4,72E-04
	3,00			1,83E-04	1,93E-04		-5,26E-04	-5,01E-04
	4,00			1,92E-04	2,02E-04		-5,51E-04	-5,24E-04
	5,00			2,00E-04	2,11E-04		-5,76E-04	-5,48E-04
	1,00	80,00		1,73E-04	1,87E-04		-4,97E-04	-4,68E-04
	2,00			1,82E-04	1,97E-04		-5,21E-04	-4,91E-04
	3,00			1,87E-04	2,02E-04		-5,36E-04	-5,14E-04
	4,00			2,01E-04	2,17E-04		-5,76E-04	-5,42E-04
	5,00			2,10E-04	2,27E-04		-6,00E-04	-5,66E-04
	1,00	100,00		1,82E-04	2,01E-04		-5,01E-04	-4,62E-04
	2,00			1,91E-04	2,11E-04		-5,25E-04	-4,83E-04
	3,00			1,99E-04	2,20E-04		-5,49E-04	-5,05E-04
	4,00			2,10E-04	2,32E-04		-5,78E-04	-5,32E-04
	5,00			2,19E-04	2,41E-04		-6,01E-04	-5,54E-04
	1,00	120,00		1,91E-04	2,14E-04		-5,07E-04	-4,50E-04
	2,00			2,00E-04	2,24E-04		-5,30E-04	-4,70E-04
	3,00			2,08E-04	2,33E-04		-5,52E-04	-4,91E-04
	4,00			2,19E-04	2,45E-04		-5,81E-04	-5,15E-04

	5,00			2,27E-04	2,55E-04		-6,03E-04	-5,36E-04
	1,00	140,00		2,00E-04	2,27E-04		-5,18E-04	-4,39E-04
	2,00			2,08E-04	2,37E-04		-5,40E-04	-4,58E-04
	3,00			2,17E-04	2,47E-04		-5,62E-04	-4,77E-04
	4,00			2,26E-04	2,56E-04		-5,85E-04	-4,96E-04
	5,00			2,36E-04	2,68E-04		-6,12E-04	-5,19E-04

Na Tab. 6.7 apresentam-se os valores das deformações horizontais e verticais para o perfil “Seno 2”. Para esse perfil têm-se valores maiores de deformação quando comparado ao perfil anterior e menor quando comparado ao perfil do tipo “Buraco” e “Elevação”.

Tabela 6.7- Parâmetros utilizados nas análises via MEF, perfis “Seno 2”

Perfil	IRI (m/km)	v (km/h)	REVESTIMENTO			SUBLEITO		
			$\epsilon_{xest.}$	$\epsilon_x$	$\epsilon_{xd}$	$\epsilon_{yest.}$	$\epsilon_y$	$\epsilon_{yd}$
"Seno 2"	1,00	60,00	1,57E-04	1,69E-04	1,78E-04	-4,04E-04	-4,85E-04	-4,62E-04
	2,00			1,83E-04	1,93E-04		-5,27E-04	-5,02E-04
	3,00			2,00E-04	2,10E-04		-5,74E-04	-5,46E-04
	4,00			2,14E-04	2,26E-04		-6,16E-04	-5,86E-04
	5,00			2,30E-04	2,43E-04		-6,62E-04	-6,30E-04
	1,00	80,00		1,87E-04	2,02E-04		-5,35E-04	-5,04E-04
	2,00			2,01E-04	2,18E-04		-5,77E-04	-5,43E-04
	3,00			2,18E-04	2,35E-04		-6,23E-04	-5,87E-04
	4,00			2,32E-04	2,51E-04		-6,65E-04	-6,27E-04
	5,00			2,49E-04	2,69E-04		-7,12E-04	-6,71E-04
	1,00	100,00		2,03E-04	2,24E-04		-5,58E-04	-5,13E-04
	2,00			2,19E-04	2,42E-04		-6,03E-04	-5,55E-04
	3,00			2,34E-04	2,58E-04		-6,43E-04	-5,92E-04
	4,00			2,50E-04	2,76E-04		-6,88E-04	-6,33E-04
	5,00			2,65E-04	2,92E-04		-7,28E-04	-6,70E-04
	1,00	120,00		2,20E-04	2,47E-04		-5,84E-04	-5,19E-04
	2,00			2,35E-04	2,63E-04		-6,23E-04	-5,53E-04
	3,00			2,51E-04	2,82E-04		-6,66E-04	-5,92E-04
	4,00			2,66E-04	2,98E-04		-7,05E-04	-6,26E-04
	5,00			2,82E-04	3,16E-04		-7,49E-04	-6,65E-04
1,00	140,00	2,38E-04	2,70E-04	-6,16E-04	-5,23E-04			
2,00		2,52E-04	2,87E-04	-6,54E-04	-5,55E-04			
3,00		2,69E-04	3,05E-04	-6,97E-04	-5,91E-04			
4,00		2,83E-04	3,22E-04	-7,34E-04	-6,23E-04			
5,00		2,88E-04	3,26E-04	-7,46E-04	-6,59E-04			

A partir dos valores de deformações horizontais e verticais, apresentadas nas Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7, foi calculado o número máximo de passadas do eixo simples padrão sobre o pavimento. Para isso, utilizaram-se das formulações discutidas no capítulo 3, optando-se pelo uso dos coeficientes determinados pelo “ASPHALT INSTITUTE”, em que  $N_f$  representa o número de passadas de um caminhão padrão até que o revestimento asfáltico sofra fadiga, perdendo suas propriedades mecânicas. Onde  $\varepsilon_t$  é a deformação de tração (adimensional) e  $M_r$  é módulo de resiliência do revestimento (em psi), logo,  $N_f$  pode ser calculado por:

$$N_f = 0,0796 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,291} \cdot \left(\frac{1}{M_r}\right)^{0,854} \quad (6.3)$$

Na camada de subleito é calculado o número crítico de passadas no eixo simples padrão ( $N_d$ ) de forma que o pavimento esteja protegido contra deformações excessivas, responsáveis por formar trilhas de roda na superfície do pavimento. Novamente utilizaram-se os coeficientes empíricos determinados pelo “ASPHALT INSTITUTE” e a Equação é dada por:

$$N_d = 1,365 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_c}\right)^{4,477} \quad (6.4)$$

Os resultados apresentados nas Tabelas abaixo seguem as designações, dadas as deformações horizontais e verticais, separadas pelo tipo de perfil e pelo tipo de carregamento. Tem-se, portanto, resultados dos números de passadas críticas para fadiga e deformação permanente,  $N_f$  e  $N_d$  para os perfis do tipo “Buraco”, “Elevação”, “senoidal”. Cada uma das colunas apresenta os números críticos, de acordo com o tipo de carregamento, quais sejam estáticos  $N_{f\_est}$  e  $N_{d\_est}$ , dinâmico não amortecido,  $N_{f\_dn}$  e  $N_{d\_dn}$ , e dinâmico amortecido pela camada de revestimento,  $N_{f\_da}$  e  $N_{d\_da}$ .

Antes de apresentar os resultados obtidos para os casos estudados deve-se reforçar que a utilização dos modelos de fadiga são limitados e devem ser melhor estudados. Os coeficientes utilizados não são devem ser utilizados indiscriminadamente, podendo ser obtido em pistas de testes ou em laboratório para diferentes condições e configurações de pavimento.

Para o perfil do tipo “Buraco” e “Elevação” os resultados são apresentados na Tabela 6.8. Os valores calculados do número de passadas críticas para as camadas de revestimento e de subleito são maiores para o carregamento estático, em que ocorreram menores deformações horizontais e verticais que para o carregamento dinâmico.

O número máximo de passadas calculado para a camada de revestimento considerando a carga estática supera os valores calculados para solicitações dinâmicas amortecidas e não amortecidas de 10 vezes a 10.000 vezes, dependendo das configurações aplicadas à simulação.

O resultado mais elevado do número máximo de passadas para a camada de subleito é decorrente da simulação utilizando o carregamento estático, que é da ordem de 1.000.000 de passadas. Esse valor supera os valores calculados para carregamentos dinâmicos amortecidos e não amortecidos de 10 vezes a 100.000 vezes, dependendo das configurações aplicadas à simulação.

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que os valores de número de passadas estimados, usando-se a metodologia atual, em que apenas a carga estática é admitida, tem-se a superestimação do número máximo de passadas sobre um pavimento, que eventualmente considerando-se as imperfeições naturais ao processo executivo e ao uso do pavimento, sofrem a ação dos carregamentos dinâmicos.

Tabela 6.8- Número máximo de passadas sobre perfis Buraco e Elevação

Perfil	RI (m/km)	v (km/h)	REVESTIMENTO			SUBLEITO		
			$N_{f\_est}$	$N_{f\_dn}$	$N_{f\_da}$	$N_{d\_est}$	$N_{d\_dn}$	$N_{d\_da}$
<b>"Buraco" e "Elevação"</b>	1,00	60,00	4,02E+06	8,97E+05	7,57E+05	2,14E+06	1,69E+05	2,11E+05
	2,00			2,61E+05	2,20E+05		3,13E+04	3,92E+04
	3,00			1,06E+05	8,96E+04		9,26E+03	1,16E+04
	4,00			5,26E+04	4,43E+04		3,55E+03	4,44E+03
	5,00			2,96E+04	2,49E+04		1,62E+03	2,03E+03
	1,00	80,00		3,14E+05	2,43E+05		4,10E+04	5,36E+04
	2,00			1,22E+05	9,45E+04		1,13E+04	1,48E+04
	3,00			5,85E+04	4,53E+04		4,17E+03	5,46E+03
	4,00			3,21E+04	2,49E+04		1,85E+03	2,41E+03
	5,00			1,93E+04	1,50E+04		9,26E+02	1,21E+03
	1,00	100,00		1,41E+05	1,02E+05		1,65E+04	2,39E+04
	2,00			6,56E+04	4,75E+04		5,84E+03	8,46E+03
	3,00			3,53E+04	2,55E+04		2,51E+03	3,64E+03
	4,00			2,09E+04	1,52E+04		1,23E+03	1,79E+03
	5,00			1,34E+04	9,66E+03		6,69E+02	9,70E+02
	1,00	120,00		7,46E+04	5,12E+04		8,16E+03	1,39E+04
	2,00			3,92E+04	2,69E+04		3,40E+03	5,79E+03
	3,00			4,20E+04	3,10E+04		3,74E+03	2,79E+03
	4,00			1,44E+04	9,90E+03		8,73E+02	1,49E+03

	5,00	140,00	9,62E+03	6,31E+03	5,03E+02	1,57E+03
	1,00		4,34E+04	2,85E+04	4,35E+03	9,10E+03
	2,00		2,50E+04	1,64E+04	2,05E+03	4,28E+03
	3,00		1,55E+04	1,02E+04	1,07E+03	2,25E+03
	4,00		1,03E+04	6,74E+03	6,12E+02	1,28E+03
	5,00		7,10E+03	4,67E+03	3,71E+02	7,75E+02

Para o perfil do tipo “Seno 1”, os resultados de números de passadas de ESP críticas para o revestimento ( $N_f$ ) e para o subleito ( $N_d$ ) são apresentados na Tabela 6.9. Os maiores valores para as camadas de revestimento e de subleito ocorrem para carregamento estático, uma vez que este produz menores deformações horizontal e vertical. No caso em que se têm defeitos desconcentrados no perfil longitudinal, composta por ondas senoidais com comprimento de onda longos (20m) e amplitudes proporcionalmente pequenas (40mm), as forças dinâmicas superam as forças estáticas em até aproximadamente 40% e conseqüentemente os valores de deformação vertical e horizontal calculados com carga dinâmica são maiores aos calculados para o carregamento estático. Entretanto, o número máximo de passadas críticas para o revestimento ( $N_f$ ) é da mesma ordem de grandeza ( $10^6$ ) para os dois tipos de carregamentos, embora ainda seja praticamente até quatro vezes maior para cargas estáticas. Entretanto, a variação do número máximo de passadas críticas para que ocorra a deformação permanente excessiva ( $N_d$ ) do subleito é de até nove vezes maior quando se admite a carga estática ou dinâmica amortecida ao invés da carga dinâmica sem amortecimento.

Tabela 6.9 - Número máximo de passadas para carregamentos sobre perfis Seno 1

Perfil	RI (m/km)	v (km/h)	REVESTIMENTO			SUBLEITO		
			$N_{f\_est}$	$N_{f\_dn}$	$N_{f\_da}$	$N_{d\_est}$	$N_{d\_dn}$	$N_{d\_da}$
"Seno 1"	1,00	60,00	4,02E+06	3,47E+06	2,93E+06	2,14E+06	1,06E+06	1,33E+06
	2,00			2,94E+06	2,48E+06		8,45E+05	1,06E+06
	3,00			2,43E+06	2,05E+06		6,52E+05	8,15E+05
	4,00			2,09E+06	1,76E+06		5,31E+05	6,64E+05
	5,00			1,81E+06	1,52E+06		4,37E+05	5,46E+05
	1,00	80,00		2,90E+06	2,25E+06		8,46E+05	1,11E+06
	2,00			2,47E+06	1,92E+06		6,80E+05	8,89E+05
	3,00			2,26E+06	1,77E+06		6,02E+05	7,23E+05
	4,00			1,78E+06	1,38E+06		4,36E+05	5,70E+05
	5,00			1,55E+06	1,20E+06		3,61E+05	4,72E+05
	1,00	100,00		2,46E+06	1,78E+06		8,09E+05	1,17E+06
	2,00			2,12E+06	1,53E+06		6,58E+05	9,54E+05

	3,00		1,83E+06	1,32E+06	5,40E+05	7,83E+05
	4,00		1,55E+06	1,12E+06	4,30E+05	6,23E+05
	5,00		1,35E+06	9,80E+05	3,59E+05	5,20E+05
	1,00	120,00	2,12E+06	1,45E+06	7,72E+05	1,31E+06
	2,00		1,83E+06	1,25E+06	6,34E+05	1,08E+06
	3,00		1,59E+06	1,09E+06	5,25E+05	8,93E+05
	4,00		1,35E+06	9,28E+05	4,20E+05	7,16E+05
	5,00		1,19E+06	8,17E+05	3,54E+05	6,02E+05
	1,00		140,00	1,82E+06	1,20E+06	7,02E+05
	2,00	1,58E+06		1,04E+06	5,81E+05	1,21E+06
	3,00	1,39E+06		9,11E+05	4,85E+05	1,01E+06
	4,00	1,22E+06		8,02E+05	4,07E+05	8,52E+05
	5,00	1,05E+06		6,90E+05	3,32E+05	6,93E+05

Para o perfil “Seno 2” têm-se comprimentos de ondas curtas e as mesmas amplitudes utilizados no perfil de ondas longas. Logo, a magnitude das forças dinâmicas é maior, atingindo aumentos da ordem de 85% sobre o valor da força estática. Assim, os resultados apresentados apontam que tanto para a camada de revestimento quanto para a camada de subleito o número máximo de passadas, quando se admite o carregamento estático, ultrapassa em até 10 vezes o número máximo de passadas quando se utiliza o carregamento dinâmico ou dinâmico amortecido, conforme apresentado na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Número máximo de passadas para carregamentos sobre perfis Seno 2

Perfil	RI (m/km)	v (km/h)	REVESTIMENTO			SUBLEITO		
			$N_{f\_est}$	$N_{f\_dn}$	$N_{f\_da}$	$N_{d\_est}$	$N_{d\_dn}$	$N_{d\_da}$
"Seno 2"	1,00	60,00	4,02E+06	3,17E+06	2,67E+06	2,14E+06	9,39E+05	1,17E+06
	2,00			2,41E+06	2,03E+06		6,47E+05	8,09E+05
	3,00			1,83E+06	1,54E+06		4,43E+05	5,54E+05
	4,00			1,45E+06	1,22E+06		3,23E+05	4,04E+05
	5,00			1,14E+06	9,61E+05		2,33E+05	2,92E+05
	1,00	80,00		2,28E+06	1,76E+06		6,07E+05	7,94E+05
	2,00			1,77E+06	1,37E+06		4,33E+05	5,66E+05
	3,00			1,37E+06	1,06E+06		3,06E+05	3,99E+05
	4,00			1,11E+06	8,59E+05		2,28E+05	2,98E+05
	5,00			8,86E+05	6,87E+05		1,68E+05	2,20E+05
	1,00	100,00		1,74E+06	1,26E+06		5,03E+05	7,30E+05
	2,00			1,35E+06	9,74E+05		3,56E+05	5,16E+05
	3,00			1,09E+06	7,87E+05		2,66E+05	3,86E+05
	4,00			8,71E+05	6,30E+05		1,97E+05	2,85E+05

	5,00	120,00	7,23E+05	5,23E+05	1,53E+05	2,21E+05
	1,00		1,33E+06	9,09E+05	4,09E+05	6,96E+05
	2,00		1,07E+06	7,36E+05	3,07E+05	5,22E+05
	3,00		8,59E+05	5,89E+05	2,27E+05	3,86E+05
	4,00		7,13E+05	4,89E+05	1,76E+05	3,00E+05
	5,00	5,85E+05	4,02E+05	1,35E+05	2,29E+05	
	1,00	140,00	1,03E+06	6,75E+05	3,22E+05	6,73E+05
	2,00		8,45E+05	5,55E+05	2,47E+05	5,16E+05
	3,00		6,86E+05	4,51E+05	1,86E+05	3,88E+05
	4,00		5,77E+05	3,79E+05	1,47E+05	3,07E+05
5,00	5,47E+05		3,64E+05	1,37E+05	2,38E+05	

Os resultados apresentados nas Tabelas 6.8, 6.9 e 6.10 demonstram que para todos os casos estudados, em que se variou a velocidade de tráfego, tipo de perfil e conseqüentemente os valores de RI, a carga dinâmica produziu deformações horizontais e verticais superiores aos valores produzidos pela carga estática. Logo, o número crítico de passadas de ESP para as camadas de revestimento e do subleito é maior para o carregamento estático, que gera menor deformação, e menor para carregamento dinâmico que produz maiores deformação. Entretanto, para que se saiba quanto as cargas estáticas elevam o número de passadas de um caminhão padrão sobre o pavimento, admitindo as configurações simuladas, dividiram-se os resultados de vida de fadiga para carregamento estático para cada um dos valores calculados,  $N_{f_x}$ ,  $N_{d_y}$ ,  $N_{f_d}$  e  $N_{d_d}$ . Dessa relação, tem-se a quantidade de vezes que o número de fadiga é aumentado, considerando-se o carregamento estático ao invés do carregamento dinâmico.

Para o perfil do tipo “Buraco” e “Elevação” observou-se que o número de passadas de um caminhão padrão admitindo-se o carregamento do tipo estático é significativamente maior que quando se admite carregamento dinâmico, conforme apresentado na Tabela 6.11. O acréscimo dado em porcentagem elucidada as diferenças encontradas.

Tabela 6.11- Número máximo de passadas para carregamentos sobre perfis Buraco e Elevação

Perfil	RI (m/km)	v (km/h)	REVESTIMENTO		SUBLEITO	
			$N_{f\_est}/N_{f\_dn}$	$N_{f\_est}/N_{f\_da}$	$N_{d\_est}/N_{d\_dn}$	$N_{d\_est}/N_{d\_da}$
"Buraco" e "Elevação"	1,00	60,00	4,5	5,3	12,7	10,1
	2,00		15,4	18,3	68,2	54,6
	3,00		37,8	44,8	231,0	184,8
	4,00		76,5	90,7	602,0	481,6
	5,00		136,0	161,3	1.317,1	1.053,7

	1,00	80,00	12,8	16,5	52,1	39,9
	2,00		33,0	42,6	188,7	144,4
	3,00		68,7	88,7	512,2	391,9
	4,00		125,2	161,5	1.157,9	886,0
	5,00		207,9	268,2	2.308,5	1.766,4
	1,00	100,00	28,5	39,4	129,5	89,3
	2,00		61,3	84,7	366,3	252,7
	3,00		113,9	157,5	851,8	587,6
	4,00		191,9	265,3	1.731,5	1.194,6
	5,00		301,1	416,2	3.194,6	2.204,0
	1,00	120,00	53,9	78,6	262,0	153,9
	2,00		102,5	149,4	628,4	369,1
	3,00		95,7	129,6	572,0	767,1
	4,00		278,6	406,1	2.448,7	1.438,1
	5,00		417,7	636,8	4.249,3	1.365,6
	1,00	140,00	92,6	140,9	491,2	235,0
	2,00		161,1	245,3	1.043,8	499,4
	3,00		258,8	394,0	1.989,1	951,7
	4,00		391,7	596,3	3.495,3	1.672,3
	5,00		565,9	861,5	5.765,3	2.758,5

No perfil tipo Seno 1 a relação do número de fadiga para carga estática e dinâmica foi calculada e os resultados são mostrados na Tabela 6.12. Comparando os resultados desta Tab. com aquela, tem-se que os valores apresentados aqui são bem modestos, entretanto produzem considerável diferença para o dimensionamento do pavimento. Os expoentes das deformações nas equações (6.3) e (6.4) são 3,291 e 4,477, respectivamente, justificando porque até pequenas variações de deformação podem ter um grande impacto no número crítico de passadas.

Tabela 6.12 - Número máximo de passadas para carregamentos sobre perfis Seno 1

Perfil	RI (m/km)	v (km/h)	REVESTIMENTO		SUBLEITO	
			$N_{f\_est}/N_{f\_dn}$	$N_{f\_est}/N_{f\_da}$	$N_{d\_est}/N_{d\_dn}$	$N_{d\_est}/N_{d\_da}$
"Seno 1"	1,00	60,00	1,2	1,4	2,0	1,6
	2,00		1,4	1,6	2,5	2,0
	3,00		1,7	2,0	3,3	2,6
	4,00		1,9	2,3	4,0	3,2
	5,00		2,2	2,6	4,9	3,9
	1,00	80,00	1,4	1,8	2,5	1,9
	2,00		1,6	2,1	3,1	2,4

	3,00		1,8	2,3	3,6	3,0
	4,00		2,3	2,9	4,9	3,8
	5,00		2,6	3,3	5,9	4,5
	1,00	100,00	1,6	2,3	2,6	1,8
	2,00		1,9	2,6	3,2	2,2
	3,00		2,2	3,0	4,0	2,7
	4,00		2,6	3,6	5,0	3,4
	5,00		3,0	4,1	6,0	4,1
	1,00	120,00	1,9	2,8	2,8	1,6
	2,00		2,2	3,2	3,4	2,0
	3,00		2,5	3,7	4,1	2,4
	4,00		3,0	4,3	5,1	3,0
	5,00		3,4	4,9	6,0	3,6
	1,00	140,00	2,2	3,4	3,0	1,5
	2,00		2,5	3,9	3,7	1,8
	3,00		2,9	4,4	4,4	2,1
	4,00		3,3	5,0	5,2	2,5
	5,00		3,8	5,8	6,4	3,1

Para o perfil tipo Seno 2 a relação do número crítico de passadas do ESP considerando a carga estática versus a dinâmica, conforme apresentado na Tabela 6.13, é maior que os mostrados na Tabela 6.12, porém menores que os apresentados pela Tabela 6.11.

Tabela 6.13 - Número máximo de passadas para carregamentos sobre perfis Seno 2

Perfil	RI (m/km)	v (km/h)	REVESTIMENTO		SUBLEITO	
			$N_{f\_est}/N_{f\_dn}$	$N_{f\_est}/N_{f\_da}$	$N_{d\_est}/N_{d\_dn}$	$N_{d\_est}/N_{d\_da}$
"Seno 2"	1,00	60,00	1,3	1,5	2,3	1,8
	2,00		1,7	2,0	3,3	2,6
	3,00		2,2	2,6	4,8	3,9
	4,00		2,8	3,3	6,6	5,3
	5,00		3,5	4,2	9,2	7,3
	1,00	80,00	1,8	2,3	3,5	2,7
	2,00		2,3	2,9	4,9	3,8
	3,00		2,9	3,8	7,0	5,4
	4,00		3,6	4,7	9,4	7,2
	5,00		4,5	5,9	12,7	9,7
	1,00	100,00	2,3	3,2	4,2	2,9
	2,00		3,0	4,1	6,0	4,1
	3,00		3,7	5,1	8,0	5,5
	4,00		4,6	6,4	10,9	7,5

	5,00		5,6	7,7	14,0	9,7
	1,00	120,00	3,0	4,4	5,2	3,1
	2,00		3,7	5,5	7,0	4,1
	3,00		4,7	6,8	9,4	5,5
	4,00		5,6	8,2	12,1	7,1
	5,00		6,9	10,0	15,9	9,3
	1,00	140,00	3,9	6,0	6,6	3,2
	2,00		4,8	7,2	8,7	4,1
	3,00		5,9	8,9	11,5	5,5
	4,00		7,0	10,6	14,6	7,0
	5,00		7,3	11,0	15,6	9,0

Os resultados apresentados nas Tabelas 6.11, 6.12 e 6.13 demonstram que para cada tipo de configuração, pavimento, velocidade e irregularidade são gerados carregamentos que permitem, utilizando-se de ferramentas numéricas, calcular o estado de tensão e deformação e então calcular o número crítico de passadas do eixo padrão para as camadas do pavimento.

Além disso, tem-se que, diante desses cálculos realizados, a previsão do número máximo de passadas utilizando-se carregamento estático é muito superior ao que de fato ocorre na prática, quando se estima esse número a partir do carregamento dinâmico. Assim, dimensionar pavimentos utilizando-se fatores de equivalência dinâmica ou simplesmente o carregamento estático pode fazer com que o projetista incorra erro subdimensionando o pavimento.

# Capítulo 7

## CONCLUSÕES

Este trabalho buscou avaliar, comparativamente, o comportamento estrutural do pavimento diante do carregamento estático e dinâmico com vista a avaliar a vida de fadiga do pavimento. Investigou-se a influência da utilização de cargas dinâmicas no lugar de cargas estáticas, as quais são utilizadas no dimensionamento de pavimentos. Além disso, investigou-se a influência de diferentes perfis longitudinais, com defeitos concentrados e desconcentrados, e diferentes velocidades de tráfego na durabilidade do pavimento.

Os capítulos de revisão bibliográfica e de fundamentação teórica mostraram que as teorias, metodologias e ferramentas computacionais disponíveis não preenchiam completamente os requisitos para o estudo do tema pesquisado nesta tese. Os programas computacionais, teorias e metodologias que envolvem o estudo de fenômenos da dinâmica são desenvolvidos e recorrentemente pesquisados em temas diversos que não o pesquisado aqui, como exemplos têm-se os casos em que se estudam as tensões nos componentes veiculares ou aeronáuticos. Assim, embora, as teorias, metodologias e ferramentas computacionais fossem adaptáveis a essa pesquisa, foi necessário desenvolver parte delas com vista ao tema pesquisado. Diante disso utilizaram-se as formulações desenvolvidas para problemas dinâmicos apresentados em trabalhos como de Zienkiewicz, (2000). Para atender as necessidades desta pesquisa optou-se por implementar rotina, via método dos elementos finitos, para solucionar problemas de equilíbrio dinâmico. Para isso utilizou-se a plataforma do programa Mechsys, que já possuía o módulo estático desenvolvido. Além disso, desenvolveu-se modelo do tipo quarto de carro, a partir do programa Simulink, o qual retornava valores de forças atuantes sobre o pavimento e o correspondente índice de irregularidade. Nas simulações foram admitidos diferentes perfis, com defeitos concentrados e desconcentrados ao longo de seu comprimento sobre o qual trafegava o veículo padrão simples. A fim de inserir o carregamento dinâmico e os defeitos do pavimento na metodologia de dimensionamento do pavimento criou-se também nova

metodologia de dimensionamento de pavimento. Aplicada à metodologia desenvolvida nesta tese, por meio de ferramentas numéricas e modelos de quarto de carro e quarto de caminhão, a uma série de testes obteve-se os seguintes resultados:

Para forças calculadas no modelo quarto de carro para os perfis do tipo buraco e elevação, com defeitos concentrados com profundidades/alturas de 30, 60 e 100mm, observou-se que, ao se admitir o carregamento dinâmico a diferentes velocidades e a irregularidade, os valores de forças dinâmicas produzidas foram 6,6 vezes maiores que a produzida devido à força estática. Especificamente, para valores de RI entre 2 e 3, valores mais comumente observados, a majoração das forças estáticas varia entre 1,5 e 5,0 vezes, dependendo da velocidade do veículo e da altura da elevação ou profundidade do buraco.

Para o perfil “Seno 1” onde os defeitos são desconcentrados, ao longo do perfil longitudinal estudado, compostos por ondas senoidais com amplitudes de 10, 20 e 40mm e comprimentos de onda de 10m a 120m calculou-se as forças produzidas para diferentes velocidades e diferentes RI. Observou-se que os valores pneu pavimento calculados a partir do carregamento dinâmico superaram o valor produzido pela força estática em até 46%.

O perfil “Seno 2”, onde os defeitos também são desconcentrados, o aumento da força pneu-pavimento produzido pela força dinâmica quando comparada à força estática foi de até 85%.

Esses resultados mostram a relevância desse estudo, uma vez que diante do aumento da carga atuante esperam-se maiores valores de deslocamento nas camadas do pavimento e, por conseguinte, o pavimento suportará menor número de passadas de veículo de eixo padrão simples, contrariando o dimensionamento inicial.

Os resultados apresentados no capítulo 6 mostram que o número máximo de passadas de um veículo de eixo padrão simples, considerando os perfis dos tipos buraco e elevação, é 1.000 vezes menor que para o caso onde se considera o carregamento estático, para o revestimento. Para o subleito tem-se uma diminuição do número de passadas em até 10.000 vezes.

Os resultados do perfil do tipo Seno 1, mostram que as diferenças foram menores, porém relevantes. Para o revestimento o número de passadas foi diminuído em 4 vezes, para o subleito em 10 vezes.

No perfil do tipo seno 2, a redução do número de passadas em função da atuação da carga dinâmica foi de 10 vezes para a camada de revestimento e de aproximadamente 20 vezes para a camada do subleito.

Os resultados apresentados no capítulo 6 mostram também que predominantemente, devido à proximidade do carregamento dinâmico que ocorre na superfície do pavimento, portanto próximo à camada de revestimentos, os efeitos da variação do número de passadas de um caminhão, considerando os valores de carregamento dinâmico e estático, são mais críticos e prejudiciais à vida da camada de revestimento do que à do subleito.

Ao considerar o carregamento dinâmico com o amortecimento da camada de revestimento, os valores obtidos mostraram que a ordem de grandeza dos resultados considerando-se ou não amortecimento é a mesma. Observa-se, contudo, que para a camada de revestimento em que o carregamento dinâmico é amortecido o número de passadas é maior do que quando se considera o carregamento dinâmico atuante não amortecido. Para a camada de subleito, entretanto, a situação se inverte.

Comparando novamente os efeitos dos carregamentos dinâmicos amortecidos e não amortecidos, observaram-se defasagem do comportamento dos deslocamentos e tensões ao longo do tempo. Ao se considerar o carregamento não amortecido, tem-se resposta imediata para o crescimento de carregamento em relação ao aumento de deformação de um ponto, para o carregamento amortecido observa-se que não ocorre aumento das deformações ou tensões de forma imediata ao crescimento do carregamento, tampouco do valor máximo, que para os casos estudados foram diferentes dos calculados para o carregamento dinâmico não amortecido.

As simulações duraram em média três segundos para o Simulink e um minuto e trinta segundos para as análises via método dos elementos finitos, realizadas no Mechsys. Para as simulações utilizou-se um microprocessador Intel Core I5, 2,53GHZ e 4GB de memória RAM.

As ferramentas numéricas, assim como a metodologia aplicada, foram eficazes na investigação realizada. Logo, tem-se que a não consideração dos carregamentos dinâmicos e as irregularidades no pavimento provocam erro de dimensionamento, subdimensionando o pavimento ou superestimando o número de passadas de veículos sobre o pavimento. Assim a deterioração vista na Figura 2.1 ocorrerá antes até do tempo considerado ótimo para intervenção da manutenção do pavimento, considerando que o planejamento de manutenção

tenha sido feita com as condições de carregamento estáticas, quando o pavimento, entretanto, sofrera a ação de cargas dinâmicas.

Assim, os resultados calculados demonstram que a qualidade do dimensionamento passa compulsoriamente pela utilização dos elementos reais que afetam o pavimento, como o carregamento dinâmico e defeitos concentrados e desconcentrados no perfil longitudinal.

## **7.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Sugerem-se como possibilidade de pesquisas futuras tópicos complementares que não foram abordados aqui, como:

O estudo da influência das cargas dinâmicas para pavimentos ferroviários, especialmente para trechos onde ocorrem emendas de trilhos ou pontes e passagem em nível, pois nesses pontos pode ocorrer solavancos aos vagões, fato que pode, assim como visto para o pavimento rodoviário, influenciar no dimensionamento da linha férrea.

Outra variação desse estudo seria a aplicação da formulação e metodologia aqui desenvolvidas para dimensionamento de pistas de pousos de aeronaves, pois nessa situação ocorrem fortes impactos, os quais devem ser previstos no dimensionamento das pistas.

Deve-se considerar a presença de água no pavimento. Embora as obras de pavimentação utilizem-se de elementos de drenagem profundas e superficiais, ocorrem em vários pontos a infiltração de água em camadas dos pavimentos. Diante disso, admitir que o material do pavimento asfáltico, principalmente a camada de subleito, contenha água é plausível.

Pesquisar a influência do uso de modelos mais elaborados capazes de simular amplamente os fenômenos dinâmicos, sem a necessidade de modelos de fadiga, substituídos por modelos elastoplástico do tipo Camclay ou Subloading. Contudo, sabe-se que o grande número de análises requeridas para que o modelo de fadiga fosse trocado por modelos elastoplástico, torna a substituição inviável para o momento, pois o número de análises necessárias seria a partir de  $10^7$ , logo seria necessária grande quantidade de máquinas trabalhando em paralelo para a realização das simulações.

Por fim, sugere-se que materiais alternativos que possuam grande capacidade de amortecimento sejam avaliados na construção de pavimentos rodoviários, uma vez que eles possuem alta capacidade de amortecimento e podem suportar melhor as cargas de impactos que matérias de alta rigidez, conforme apontam os resultados apresentados pelas Figs. 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12.

# Capítulo 8

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (1986). Design Procedure Guide.

AASHTO (2002). Standard Specification for Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Edition

ALBANO, J.F.(1998). Efeitos da variação da carga por eixo, pressão e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento. Porto Alegre, RS, Engenharia de produção, Universidade Federal do Rio Grande o Sul - UFRGS, 145p.

AL-QADI, I. L. (2007). Pulse Loading Response: Measure vs. 3D Finite Element Analysis. Apresentação realizada na Reunião do Expert Task Group – Fundamental Properties and Advanced Models, Phoenix, Arizona, EUA.

ANTONIO, D. S. F. (2005). Estudo da Sobrecarga Dinâmica em Caminhões por Meio de Medições Diretamente no Veículo. Universidade Estadual De Campinas Faculdade De Engenharia Mecânica Comissão De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica Departamento De Projeto Mecânico, Mestre em Engenharia Mecânica. Campinas, 2005 S.P. – Brasil 153p.

BALBO, J. T. (2007). Pavimentação Asfáltica - materiais, projeto e restauração. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. v. 1. 558 p.

BARBOSA, R. E. (1999). Efeitos das cargas dinâmicas dos veículos rodoviários no desempenho dos pavimentos e pontes. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 168p.

BHATTI, M. A. (2005). Fundamental Finite Element Analysis and Applications: with Mathematica and Matlab Computations, John Wiley & Sons, 720p.

Brademeyer (1988), B. VESYS Modification. Final Report DTFH61-87-P00441 to FHWA, BURMISTER, D. M. (1945). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. Journal of Applied Physics, vol. 16.

CAREY JR., W. N.; IRICK, P. E.(1960) The pavement serviceability: performance concept.

CHATTI, K., MONISMITH, C.L, AND MOHONEY ,J.P. (1995) Investigation of Asphalt Concrete Pavement Cracking from Heavy Vehicles, Phase 2: Investigation of Dynamic Loading of Truck Suspensions Report on Project F89TL29, RTA-65K237, California Departament of Transportation.

CHIU, J. (2008). A SimulinkModel For Vehicle Rollover Prediction And prevention a Thesis Submitted to the Faculty of Purdue University In Partial Fulfillment of the Requirements for

the Degree of Master of Science in Aeronautics and Astronautics. Purdue University West Lafayette, Indiana 84p

CHOPRA, A. K. (2000). Dynamics of Structures: theory and applications to earthquake engineering, 2nd Edition. *Prentice Hall*, Upper Saddle River, New Jersey.

CLAUSSEN, A., J. M. EDWARDS, P. SOMMER, AND P. UGE, (1977). "Asphalt Pavement Design -The Shell Method," Proceedings of 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 39-74.

DARTER, M. I., B. F. McCULLOUGH, and J. L. BROWN, (1973b) . "Reliability Concepts Applied to the Texas Flexible Pavement System," Highway Research Record 407, pp. 180-190 ; Highway Research Board. FHWA, 1978;

DESAI, C.S., ABEL, J.F.(1972). Introduction to The Finite Element Method a numerical method for engineering analysis, Van Nostrand Reinhold Company.

DNIT (2006) Manual de Pavimentação. 3.ed. – Rio Janeiro, 274p. (IPR. Publ.719)

DNIT (2011) Manual de Gerência de pavimentos – Rio de Janeiro, 189p. (IPR. Publ. 745)

DURAND, R.D.(2008). Análise Tridimensional de Estruturas Geotécnicas Submetidas a Reforço e Drenagem. Tese de doutorado, Publicação GTD 054/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153p.

FARIAS, M. M., MONTEIRO, S. A. (1996). Utilização de Modelos Elásticos Lineares e Não-Lineares Na Retroanálise de Propriedades de Pavimentos. In: 30o Reunião Anual de Pavimentação, 1996, Salvador, BA. Anais da 30o Reunião Anual de Pavimentação, 1996. v. 2. p. 791-809.

FERREIRA, H.T.(2003). Determinação das frequências naturais e modos de vibrar de um veículo de dois eixos através de um programa computacional em MatLab-Simulink, Publicação GTD 039/06, Departamento de Materiais, Aeronáutica e Automotilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 86p.

FISH, J., BELYTSCHKO, T (2009). Um primeiro curso em elementos finitos, primeira edição, editora John Wiley & Sons, Inc.

FRESAR (2009). [www.fresar.com.br](http://www.fresar.com.br).

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

GILLESPIE, T. D. *et. al.* (1980). Calibration and Correlation of Response Type Road Roughness Measuring Systems. National Cooperative Highway Research Program Report 228. Transportation Research Board. Washington.

GÖKTAN, A., MITSCHKE, M.(1995) Road Damage Caused by Heavy Duty Vehicles Journal of Vehicle Design, v.16, p.54-70.

GRIFFITHS, D. V. e SMITH, I. M. (2006) Programming the finite element method 2nd edn, Wiley, Chichester.

GUSTAVSSON I (2002). Remote Laboratory Experiments in Electrical Engineering Education. Fourth IEEE International Conference on Devices, Circuits and Systems, Caracas, I025/1-I025/5

- HAAS R., HUDSON, W.R., AND ZANIEWSKI, J. (1994). *Modern Pavement Management*, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1994, pp. 76-107
- Highway Research Board - Bulletin 250, p. 40-58. Washington, D.C.
- HUANG, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. , Second edition, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- HWANG, D., and M. W. WITCZAK, (1979) . *Program DAMA (Chevron), User's Manual* ; Department of Civil Engineering, University of Maryland .
- INMAN, D. J. (2007). *Engineering vibration*, 2nd ed, Prentice Hall, 785p.
- JAMES. B. (1998).*The student edition of Simulink: dynamic system simulation for MATLAB : user's guide*, [version 2] Upper Saddle River : Prentice Hall.
- JORDAHL, P. R., and J . B. RAUHUT,(1983) . *Flexible Pavement Model VESYS IV-B*, Report prepared for Federal Highway Administration under Contract DTFH61-C-00175
- KARLSSON, H., SORENSSE.(2006). “Definition of the damping ABAQUS/Standard”. *Getting started with ABAQUS*, Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence RI USA: ABAQUS, Inc.
- KENIS, W. J., (1977) . "Predictive Design Procedures, a Design Method for Flexible Pavements Using the VESYS Structural Subsystem," *Proceedings, 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol .1, pp. 101-147.Finn *et al.*, 1986
- KERKHOVEN, R. E., and DORMON G. M. (1953). *Some Considerations on the California Bearing Ratio Method for the Design of Flexible Pavement*, Shell Bitumen Monograph No. 1
- KIM, C, RO, P.I, KIM, H.(1990). Effect of the suspension structure on equivalent suspension parameters, *Journal of Automobile Engineering*, v.213, p.457-470.
- KIM, C.; RO, P.I.;KIM, H. (1999). Effect of the suspension structure on equivalent suspension parameters, *Journal of Automobile Engineering*, v. 213, p.457-470.
- LEMER, A. C., and F. MOAVENZADEH, (1971) . "Reliability of Highway Pavements," *HighwayResearch Record* 362, pp. 1-8; Highway Research Board .
- LOIZOS, A. e PLATI, C. (2008). *Evolutional Process of Pavement Roughness Evaluation benefiting from sensor Technology*. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems* Vol.1, N. 2.
- MEDINA, J. D.(1997). *Mecânica dos pavimentos*. 1 ed., Rio de Janeiro, Editora UFRJ.
- MELIS, M., RIO, R.C. (1992) *Cálculo del IRI de una carretera a partir de su perfil longitudinal. El IRI una vez más. Ecuación del IRI de um perfil sinusoidal. Cuaderno AEPO No 1. AEPO Ingenieros Consultores. Madrid, España.*
- MELLO, L.G.R.(2008). *O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas*. Tese de doutorado, Publicação GTD 055/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 263p.
- MOAVENZADEH, F., J . E. SOUSSOU, H. K. FINDAKLY, and B . BRADEMEYER, (1974). *Synthesis for Rationa Design of Flexible Pavements, Part 3, Operating Instructions and Program Documentation* , Reports prepared for Federal Highway Administration under Contract FH 11-776 .

- MOLENAAR, A. A. A. (2007). Prediction of Fatigue Cracking in Asphalt Pavements: Do We Follow the Right Approach? Proceedings of Transportation Research Board Annual Meeting–TRB, Washington, EUA.
- OWEN, D.R.J., HINTON, E. (1980) Finite elements in plasticity: theory and practice. Swansea: Pineridge Press Ltd.
- PEDROSO, D.M.(2006). Representação Matemática do Comportamento Mecânico Cíclico de Solos Saturados e não Saturados. Tese de doutorado, Publicação GTD 039/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 224p.
- RABIZADEH, R. O., e SHORE, S. , (1974) Dynamic Analysis of Curved Box a Ginder Bridges, Journal Strutural Division, ASCE, Vol, 110, No.9, pp. 1899-1912.
- RIO, R. C., D.(1999). Jornadas sobre la calidad en el proyecto y la construcción de carreteras, Tread quality, Barcelona : AEPO Ingenieros Consultores.
- SAAL, R. N. J., and P. S . PELL, (1960) . Kolloid-Zeitschrift MI, Heft 1, pp . 61-71 .
- SAYERS, M. W., T. D. GILLESPIE, and W. D. PATERSON, (1986a) . Guidelines for the Conduct and Calibration of Road Roughness Measurements, Technical Paper 46 ; The World Bank, Washington, DC. Shook *et al.*, 1982
- SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M. (1997). The Little Book of Profiling – Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles; UMTRI – The University of Michigan Transportation Research Institute; Ann Arbor/MI.
- SOUZA, M. L. (1966). Método de projeto de pavimentos flexíveis. MVPO/DNER, 1. ed., Rio de Janeiro.
- SOUZA, R. O. (2002). Influência da Irregularidade Longitudinal na Avaliação de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, Publicação TU.DM-001A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 215p.
- TAYEBALI, A. A., DEACON, J. A., COPLANTZ, J. S., HARVEY, J. T., MONISMITH, C.L. (1994a). Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes. Part I – Test Method Selection. Strategic Highway Research Program – SHRP-A-404, National research Council.
- ULLIDTZ, P,(1988). Pavement Analysis; Elsevier Science, New York.
- VON QUINTUS, H. L., F. N. FINN, W. R. HUDSON, and F. L. ROBERTS, (1980). Flexible and Composite Structures for Premium Pavements, Report Nos. FHWA-RD-81-154 and -155 Vols . 1 and 2 Federal Highway Administration . Warren e Diekmann, 1963
- ZAFIR Z, SIDDHARTHAN R. V., SEBAALY P.E. (1994). Dynamic Pavement Strains from moving traffic loads. J. of Transportation., Vol. 120(5), ASCE, pp. 821-842.
- ZIENKIEWICZ ,O.C., TAYLOR, R.L.(2000). The Finite Element Method. Vol. I. 5th ed, Butterworth-Heinemann.