

OK

São Paulo  
2003

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia.

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE  
MÉTODOS COMPUTACIONAIS DE  
OTIMIZAÇÃO APLICADOS AO  
PROBLEMA DO CONFORTO VEICULAR**

**DANIEL VILELA**

**DANIEL VILELA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE  
MÉTODOS COMPUTACIONAIS DE  
OTIMIZAÇÃO APLICADOS AO  
PROBLEMA DO CONFORTO VEICULAR**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

Orientador:

Prof. Dr. Edilson Hiroshi Tamai

São Paulo

2003

# Agradecimentos

À minha família pelo incentivo que recebo quando estamos juntos.

Ao Prof. Dr. Edilson Tamai pela orientação na execução do trabalho.

Ao Dr. Gabriel Gueler e toda equipe do grupo de análise e simulação da General Motors do Brasil que tanto me auxiliaram neste período no qual estou trabalhando com eles.

À General Motors do Brasil, em especial a todos aqueles que contribuíram de uma forma ou de outra, propiciando as ferramentas para a conclusão deste trabalho.

(anônimo)

*“Aquele que somente segue os outros está sempre atrás”*

**Mensagem**

# Sumário

SUMÁRIO.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIII
LISTA DE SíMBOLOS.....	XIV
RESUMO.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	I
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1. MODELOS PARA SIMULAÇÃO DINÂMICA DO VEÍCULO.....	5
2.2. AVALIAÇÃO OBJETIVA DE CONFORTO.....	6
2.3. METODOLOGIAS DE OTIMIZAÇÃO.....	10
CAPÍTULO 3 - FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DINÂMICA DO VEÍCULO.....	14
3.1. PRINCÍPIOS DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DINÂMICA.....	14
3.2. EXEMPLOS DE OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES DINÂMICAS.....	23
3.3. CORRELAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	28
CAPÍTULO 4 - CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS OBJETIVOS DE CONFORTO.....	32
4.1. MÉTODO EMPREGADO.....	32
4.2. VARIAÇÃO NAS AVALIAÇÕES SUBJETIVAS E PRECISÃO DOS RESULTADOS.....	41
CAPÍTULO 5 - MÉTODO SIMPLEX DESCENDENTE (DOWNHILL SIMPLEX METHOD).....	46

5.1. EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....49

**CAPÍTULO 6 - MÉTODO DA ENGENHARIA ROBUSTA (MÉTODO DE TAGUCHI).....55**

6.1. DEFINIÇÃO DO PARÂMETRO DE RUÍDO.....57

6.2. MATRIZ DE EXPERIMENTOS .....58

6.3. ESTIMAÇÃO DO EFEITO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE .....61

6.4. CONSIDERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUÍDO .....62

6.5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....63

**CAPÍTULO 7 - MODELO ESTUDADO .....67**

**CAPÍTULO 8 - RESULTADOS .....81**

8.1. RESULTADOS – MÉTODO DO SIMPLEX DESCENDENTE .....82

8.2. RESULTADOS – MÉTODO DA ENGENHARIA ROBUSTA (TAGUCHI).....84

8.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS – MÉTODO DA ENGENHARIA ROBUSTA X MÉTODO DO SIMPLEX DESCENDENTE .....91

**CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES .....96**

REFERÊNCIAS .....100

**ANEXO 1 – EXTREMIDADES DO SIMPLEX NO MÉTODO DO SIMPLEX DESCENDENTE.....103**

**APÊNDICE A – CÓDIGO DO PROGRAMA DO MÉTODO DOWNHILL .....111**

**APÊNDICE B – CÓDIGO DO PROGRAMA DO MÉTODO TAGUCHI .....134**

## Lista de Figuras

Figura 3.1 – Estados de uma Massa e um Momento de Inércia.....	15
Figura 3.2 – Sistema com Dois Graus de Liberdade e Matriz de Influência	
Correspondente.....	17
Figura 3.3 – Sistema com Quatro Graus de Liberdade Incluindo Rotações .....	19
Figura 3.4 – Sistema Simplificado de um Veículo.....	20
Figura 3.5 – Fluxograma Geral da Simulação Dinâmica do Veículo.....	22
Figura 3.6 – Sistema Linear com Excitação e Matriz de Influência Respectiva.....	24
Figura 3.7 – Sistema Linear + Rotacional e Matriz de Influência Respectiva.....	26
Figura 3.8 – Forças Medidas na Torre do Amortecedor Dianteiro .....	29
(Azul – medido / Vermelho – simulado).....	29
Figura 3.9 - Espectro de Frequência das Forças Medidas na Torre do Amortecedor	
Dianteiro (Azul – medido / Vermelho – simulado) .....	30
Figura 3.10 – Acelerações Verticais Medidas na Junta Estérica do Braço de Controle	
(Azul – medido / Vermelho – simulado).....	30
Figura 3.11 – Espectro de Frequência das Acelerações Verticais Medidas na Junta	
Estérica do Braço de Controle (Azul – medido / Vermelho – simulado).....	31
Figura 4.1 – Trecho de Pista de Paralelepípedos (Simulação de Asperza) .....	34
Figura 4.2 – Trecho de Pista com Olhos de Gato (Simulação de Capacidade de	
Absorção).....	34
Figura 4.3 – Trechos de Pista com Buracos de Maior Amplitude (Simulação de	
Entrada de Bate).....	35
Figura 4.4 – Trecho de Pista com Vala de Chuva (Simulação de Balanço).....	36
Figura 4.5 – Esquema Geral de Funcionamento - Virtual Ride .....	37
Figura 4.6 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados	
Avaliados em Campo de Provas Para Asperza .....	38
Figura 4.7 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados	
Avaliados em Campo de Provas Para Capacidade de Absorção .....	39

Figura 4.8 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Entrada de Bateante .....	39
Figura 4.9 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Balanço .....	40
Figura 4.10 – Correlação Geral de Conforto Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas .....	41
Figura 4.11 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Aspeza .....	43
Figura 4.12 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Capacidade de Absorção .....	43
Figura 4.13 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Entrada de Bateante .....	44
Figura 4.14 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Balanço .....	44
Figura 4.15 – Correlação Geral de Conforto Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas .....	45
Figura 5.1 – Movimentos possíveis para um simplex (PRESS, 1992) .....	48
Figura 5.2 – Função usada para estudo de simplex descendente .....	51
Figura 5.3 – Ampliação da função usada para estudo do método de simplex descendente na área de mínimo global .....	52
Figura 5.4 – Convergência do Método do Simplex Descendente para o Exemplo Criado .....	53
Figura 5.5 – Detalhe do Gráfico de Convergência do Método do Simplex Descendente para o Exemplo Criado .....	53
Figura 6.1 – Gráfico de Influência dos Diversos Parâmetros de Controle nos Níveis Considerados para a Otimização .....	62
Figura 6.2 – Representação Gráfica da Relação S/R dos Parâmetros de Controle .....	65
Figura 7.1 – Suspensão Dianteira do Tipo <i>Mc Pherson</i> com Componentes Dinâmicos Modelados .....	69
Figura 7.2 – Perna da Suspensão Dianteira do Tipo <i>Mc Pherson</i> com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados .....	70



Figura 7.3 – Braço de Controle da Suspensão Dianteira do Tipo <i>McPherson</i> com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados.....	70
Figura 7.4 – Bateante da Suspensão Dianteira do Tipo <i>McPherson</i> com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados.....	71
Figura 7.5 – Barra Estabilizadora da Suspensão Dianteira do Tipo <i>McPherson</i> com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados.....	71
Figura 7.6 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) da Mola Dianteira Base do Estudo.....	73
Figura 7.7 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) do Bateante Dianteiro Base do Estudo.....	73
Figura 7.8 – Gráfico de Força (N) x Velocidade (m/s) do Amortecedor Dianteiro Base do Estudo.....	74
Figura 7.9 – Suspensão Traseira do Tipo Semi-Independente com Barra de Torção com Componentes Dinâmicos Modelados.....	75
Figura 7.10 – Vista Lateral da Suspensão Traseira do Tipo Semi-Independente com Barra de Torção com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados.....	76
Figura 7.11 – Vista Longitudinal da Suspensão Traseira do Tipo Semi-Independente com Barra de Torção com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados.....	76
Figura 7.12 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) da Mola Traseira Base do Estudo.....	78
Figura 7.13 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) do Bateante Dianteiro Base do Estudo.....	78
Figura 7.14 – Gráfico de Força (N) x Velocidade (m/s) do Amortecedor Dianteiro Base do Estudo.....	79
Figura 7.15 – Gráfico de Força (N) x Deflexão Radial (mm) dos Pneus Dianteiro e Traseiro Base do Estudo.....	79
Figura 8.1 – Resultados das Iterações do Simplex Descendente para Variação de $\pm 10\%$ .....	82
Figura 8.2 – Resultados das Iterações do Simplex Descendente para Variação de $\pm 20\%$ .....	83

Figura 8.3 – Resultados das Iterações do Simplex Descendente para Variação de $\pm 30\%$ .....	83
Figura 8.4 – Gráficos dos Resultados em Termos de Relação S/R para os Parâmetros de Otimização, para o Estudo de $\pm 10\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização.....	88
Figura 8.5 – Gráficos dos Resultados em Termos de Relação S/R para os Parâmetros de Otimização, para o Estudo de $\pm 20\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização.....	89
Figura 8.6 – Gráficos dos Resultados em Termos de Relação S/R para os Parâmetros de Otimização, para o Estudo de $\pm 30\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização.....	90

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Organização da Matriz de Influência.....	16
Tabela 3.2 – Matriz de Influência do Sistema com Dois Graus de Liberdade com Coluna de Excitação Preenchida .....	17
Tabela 3.3 – Matriz de Influência do Sistema com Dois Graus de Liberdade com Coluna de Excitação e Linha do Sistema de Ligação 2 Preenchidas .....	18
Tabela 3.4 – Matriz de Influência Completa do Sistema com Dois Graus de Liberdade .....	18
Tabela 3.5 – Matriz de Influência Completa do Sistema com Quatro Graus de Liberdade Incluindo Rotações .....	19
Tabela 3.6 – Matriz de Influência Completa do Sistema Simplificado de um Veículo ..	20
Tabela 4.1 – Variação Observada nas Avaliações Subjetivas.....	42
Tabela 6.1 – Matriz ortogonal para uma otimização de 4 parâmetros a 3 níveis cada.....	59
Tabela 6.2 – Arranjo Ortogonal $L_4(2^3)$ .....	63
Tabela 6.3 – Matriz de experimentos do $L_4$ com 1 fator de ruído de 2 níveis distintos.....	64
Tabela 6.4 – Resultados das simulações .....	64
Tabela 6.5 – S/R dos parâmetros de controle .....	64
Tabela 6.6 – Identificação do Resultado Ótimo .....	66
Tabela 7.1 – Dados Gerais do Veículo Modelado.....	67
Tabela 7.2 – Dados do Conjunto Motor/Transmissão.....	68
Tabela 7.3 – Modelagem dos Pontos Geométricos da Suspensão Dianteira do Tipo <i>Mc Pherson</i> .....	72
Tabela 7.4 – Modelagem dos Pontos Geométricos da Suspensão Traseira do Tipo Semi-Independente com Barra de Torgão .....	77
Tabela 8.1 – Tempos de Processamento Computacional e Resultados da Rotina do Simplex Descendente.....	84
Tabela 8.2 – Matriz Ortogonal para Estudo de Variação de $\pm 10\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização.....	85

Tabela 8.3 – Matriz Ortogonal para Estudo de Variação de $\pm 20\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização.....	85
Tabela 8.4 – Matriz Ortogonal para Estudo de Variação de $\pm 30\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização.....	86
Tabela 8.5 – Resultados para Estudo de Variação de $\pm 10\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização.....	86
Tabela 8.6 – Resultados para Estudo de Variação de $\pm 20\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização.....	87
Tabela 8.7 – Resultados para Estudo de Variação de $\pm 30\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização.....	87
Tabela 8.8 – Parâmetros Ótimos das Otimizações com Variação de $\pm 10\%$ , $\pm 20\%$ e $\pm 30\%$ .....	90
Tabela 8.9 – Resultados das Otimizações com Variação de $\pm 10\%$ , $\pm 20\%$ e $\pm 30\%$ .....	91
Tabela 8.10 – Tempos de Processamento Computacional das Rotinas dos Métodos do Simplex Descendente e da Engenharia Robusta.....	92
Tabela 8.11 – Parâmetros Ótimos e Resultados das Rotinas dos Métodos do Simplex Descendente e da Engenharia Robusta (Taguchi).....	92
Tabela 8.12 – Diferenças Percentuais na Relação S/R dos Parâmetros de Otimização para o Caso de Variação de $\pm 10\%$ .....	93
Tabela 8.13 – Diferenças Percentuais na Relação S/R dos Parâmetros de Otimização para o Caso de Variação de $\pm 20\%$ .....	93
Tabela 8.14 – Diferenças Percentuais na Relação S/R dos Parâmetros de Otimização para o Caso de Variação de $\pm 30\%$ .....	93
Tabela 8.15 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Inferior a 2% para o Caso de Variação de $\pm 10\%$ .....	94
Tabela 8.16 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Inferior a 2% para o Caso de Variação de $\pm 20\%$ .....	94
Tabela 8.17 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Inferior a 2% para o Caso de Variação de $\pm 30\%$ .....	94
Tabela 8.18 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Superior a 2% para o Caso de Variação de $\pm 10\%$ .....	95

Tabela 8.19 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Superior a 2% para o Caso de Variação de $\pm 20\%$ .....	95
Tabela 8.20 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Superior a 2% para o Caso de Variação de $\pm 30\%$ .....	95
Tabela A1.1 – Valores das Extremidades do Simplex ( $Z_1$ a $Z_9$ ) e Valor de Cada Iteração ( $Z_{it}$ ) para Estudo de Variação de $\pm 10\%$ .....	104
Tabela A1.2 – Valores das Extremidades do Simplex ( $Z_1$ a $Z_9$ ) e Valor de Cada Iteração ( $Z_{it}$ ) para Estudo de Variação de $\pm 20\%$ .....	106
Tabela A1.3 – Valores das Extremidades do Simplex ( $Z_1$ a $Z_9$ ) e Valor de Cada Iteração ( $Z_{it}$ ) para Estudo de Variação de $\pm 30\%$ .....	109

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

- ADAMS® – *Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems*  
CPCA – *Campo de Provas de Cruz Alta*  
GMB – *General Motors do Brasil*  
RMS – *Root Mean Square, ou Média Quadrática*  
SUV – *Sport Utility Vehicle*  
VPG – *Virtual Proving Ground*

## Lista de Símbolos

- $\beta$  – Posição angular
- $\beta$  – Velocidade angular
- $\eta$  – Resultado individual de experimento da matriz ortogonal
- $\lambda$  – Constante característica do simplex
- $\mu E$  – Micro-deformação (micro-strain)
- $V$  – Resultado logarítmico de um experimento individual da matriz ortogonal
- $V^m$  – Resultado logarítmico médio de uma matriz ortogonal
- CG – Centro de gravidade
- e – Vetor unitário do simplex
- exc – Excitação
- F – Força
- F<sub>AMORT</sub> – Força de amortecimento
- F<sub>MOLA</sub> – Força de mola
- ftol – Tolerância de valor mínimo do simplex
- I – Momento de inércia
- L – Braço
- L – Soma balanceada dos resultados dos experimentos da matriz ortogonal
- m – Massa
- N – Número de dimensões do simplex
- n – Número de experimentos da matriz ortogonal
- P – Ponto da extremidade do simplex
- S/R – Relação sinal/ruído
- SL – Sistema de ligação
- t – Tempo
- tol – Tolerância de convergência do simplex
- w – Peso de balanceamento da matriz ortogonal
- x – Posição linear

$\dot{x}$  – Velocidade linear

$\ddot{x}$  – Aceleração linear

Z – Valor do resultado da função objetivo numa extremidade do simplex



## Resumo

O trabalho proposto tem como objetivo principal estudar metodologias de otimização de suspensão para veículos de passeio e comerciais leves, baseando-se em parâmetros de conforto veicular, através do uso de simulação numérica computacional. São apresentados os critérios atualmente utilizados para a avaliação de um veículo a despeito de sua desempenho com relação ao conforto do ocupante – critérios estes ligados a grandezas dinâmicas que podem ser observadas no veículo tanto por meio de medições em campo quanto por simulações numéricas. Por focar a área de simulação, é apresentada no trabalho a modelagem dinâmica que possibilita a obtenção de tais grandezas relacionadas ao conforto – esta modelagem não é porém desenvolvida aqui no trabalho e é utilizada tão somente para se obter os resultados necessários à otimização em si.

A seguir, duas ferramentas de otimização são apresentadas e estudadas para que se possa estabelecer qual delas melhor se enquadra no problema proposto. Através de uma análise dos resultados proporcionados por cada uma, levando-se em consideração diversos fatores, tais como desempenho computacional, praticidade de uso e precisão de resultados, é mostrado onde cada uma destas técnicas mais se adequa ao problema de seleção dos parâmetros de suspensão visando a otimização do conforto veicular.

# Abstract

The proposed work has the main objective of studying methodologies for optimization of passenger cars and pick-ups, based on ride comfort parameters, using computational numeric simulation. The current criteria used to evaluate vehicles concerning their ride comfort properties to the occupant are shown – these criteria are related to dynamic variables that may be both measured in the physical vehicle or calculated through computational numeric simulation. As this work is more devoted to the simulation field, the dynamic modeling that allows the obtention of such dynamic variables related to the ride comfort is shown – however, as the modeling is not the main purpose of this work, it is used here more as a mean to obtain the necessary results for the optimization process.

Following this, two distinct optimization tools are shown and studied to make possible to establish which is the most suitable for the proposed problem. Through an analysis of the results offered by each of these tools, it is shown where each one is more adequate for the task of selecting the suspension parameters that optimize the ride comfort properties of the vehicle. This analysis is based on factors such as computational performance, usage and precision.

# Capítulo 1 – Introdução

A otimização de um veículo com relação ao conforto veicular é ainda hoje uma tarefa que demanda bastante tempo e recursos durante o desenvolvimento do projeto de um novo veículo, devendo-se isto em muito ao fato desta otimização ser essencialmente baseada em análises de campo que demandam protótipos representativos dos veículos que, além de terem alto custo para as empresas, por vezes somente estão disponíveis nos ciclos finais de um projeto. Soma-se a isso o fato de que o próprio processo iterativo inerente a qualquer tipo de otimização é neste caso penalizado com os atrasos gerados pelos prazos necessários à obtenção de componentes protótipos que possam ser avaliados. Este processo experimental acaba então por demandar muitos recursos durante o desenvolvimento e pode acabar deixando mais longo o próprio ciclo de lançamento de um novo produto, o que não é desejável nos dias de hoje, onde existe uma alta demanda por novidades no setor por parte dos consumidores e todas empresas competem entre si para chegar mais cedo com novos produtos ao mercado.

Por outro lado, existem hoje disponíveis diversas técnicas de simulação computacional que permitem a obtenção das grandezas dinâmicas de um veículo quando submetido a alguma determinada condição de excitação (aqui se pode subentender condição de excitação como sendo o perfil que a pista impõe ao veículo). Estas ferramentas utilizam-se para isto de um modelo matemático que seja adequado e representativo para a obtenção destas grandezas dinâmicas, sendo que estas variáveis são passíveis de serem confrontadas com medições num veículo real instrumentado para tal. Com esta confrontação entre os valores calculados e experimentais, é possível se escolher a ferramenta mais adequada para um determinado problema através da precisão demonstrada nos seus resultados e outros fatores, tais como velocidade de processamento e facilidade de uso.

Tendo-se claros os diversos critérios de avaliação de um veículo com relação ao conforto, é possível se eleger um grupo destas grandezas dinâmicas que, ponderadas

e combinadas entre si, permitam realizar a ordenação de diversas configurações de um veículo, ou mesmo de veículos distintos, com relação ao conforto. Com relação às vantagens apresentadas pela utilização da simulação, podem ser citadas:

- Dispensa a necessidade do veículo protótipo, deixando a construção deste apenas para o final do projeto, com o único intuito de confirmação dos resultados previstos através da simulação e realização de ajustes finos;
- Reduz drasticamente o tempo necessário à execução das iterações durante o processo de otimização pois, além de dispensar a construção de componentes físicos durante este processo, deve-se levar em consideração de modo geral as ferramentas de simulação hoje disponíveis são extremamente mais rápidas que a avaliação em campo de um protótipo;

- Permite uma avaliação bastante objetiva do conforto veicular, eliminando-se uma subjetividade que pode deturpar um processo mais refinado de otimização;

- Leva os engenheiros e técnicos envolvidos no desenvolvimento a um conhecimento mais profundo do funcionamento e influência dos diversos componentes do veículo, considerando-se que os mesmos deverão desenvolver modelos que sejam capazes de representar fielmente o comportamento do veículo em campo.

A respeito de alguns argumentos que possam ser considerados como desvantagens na decisão de se utilizar a simulação neste caso, poderiam ser citados:

- Torna-se necessária a aquisição inicial de um hardware (no caso computadores, periféricos e infra-estrutura para o funcionamento dos mesmos) que seja compatível com a ferramenta de simulação a ser utilizada, tendo-se em mente que quanto maior a demanda computacional da ferramenta de simulação escolhida, mais oneroso se torna o equipamento necessário;

- Desenvolvimento e/ou aquisição de uma ferramenta de simulação que permita um satisfatório nível de correlação com os testes de campo para que se torne possível a utilização da mesma no processo de desenvolvimento. Deve-se levar em conta que, numa primeira etapa, isto envolve a utilização de veículos

- Instrumentados que permitam a realização de correlações entre os resultados obtidos em campo com os obtidos através dos modelos computacionais;

- Treinamento de pessoal para a utilização destas ferramentas, bem como a construção dos modelos matemáticos para representação dos veículos de interesse.

Desta forma, considerando-se que as vantagens apresentadas na utilização da simulação são plenamente justificáveis em favor desta, este trabalho se propõe a explorar uma maneira eficaz de utilizá-la no processo de otimização de parâmetros de componentes de suspensão para a melhoria do conforto veicular como um todo.

Para se atingir este objetivo, são utilizados alguns resultados de desenvolvimentos anteriores que permitam alcançar os requisitos básicos para o prosseguimento do trabalho, sendo estes:

- O modelo matemático utilizado para a obtenção das grandezas dinâmicas necessárias ao entendimento do fenômeno, tais como forças provenientes da suspensão e acelerações atuantes nos diversos pontos do veículo aqui apresentado baseia-se na técnica de sistemas de ligação. Esta técnica de modelagem será brevemente descrita neste trabalho, sendo a mesma foi trabalhada por Gueler (1992). Softwares baseados nesta técnica foram desenvolvidos pela General Motors do Brasil e são hoje extensivamente utilizados na própria GMB e em outras unidades da companhia, como o Centro de Engenharia nos Estados Unidos e o Centro de Desenvolvimento Tecnológico Internacional na Alemanha. No presente momento, a maior utilização dos mesmos é para a obtenção de esforços provenientes de pista e utilização dos mesmos para cálculo de vida em fadiga de componentes;

- Os resultados obtidos pelo trabalho descrito por Franceschini, Villela e Mesquita Jr. (2002), que trata da correlação obtida entre grandezas dinâmicas simuladas e resultados avaliações subjetivas de conforto em campo são aqui utilizados como base para a ferramenta de otimização. São apresentados os resultados deste

desenvolvimento, cuja ferramenta de simulação se baseia na mesma técnica de sistemas de ligação citada anteriormente.

Considerando os métodos de otimização existentes na literatura, aqueles que trabalham analiticamente o problema da otimização não se adequam muito bem ao problema aqui exposto, por dois motivos em especial:

- A maioria dos métodos de otimização existentes tenta abordar o problema através do estudo dos gradientes das funções a serem estudadas. Como não existe aqui uma formulação analítica relativamente simples do problema de conforto, existe um grande problema ao se tentar avaliar os gradientes da função de conforto. No atual estágio, a avaliação dos gradientes desta função em torno de um ponto passaria necessariamente pela necessidade de um mapeamento da própria função em torno deste ponto com uma resolução adequada – este mapeamento seria então muito oneroso numericamente falando, uma vez que cada ponto utilizado para este mapeamento demandaria uma rodada completa de simulação;

- Novamente, uma considerável parte dos métodos disponíveis na literatura trata os problemas de forma linear. As não-linearidades aqui presentes no problema de conforto são tão amplas (a começar pela própria modelagem não-linear dos componentes da suspensão do veículo), que uma tentativa de se realizar uma linearização poderia levar a uma representação distorcida do problema físico real e, por conseguinte, a resultados de baixa credibilidade.

Finalmente, após todas as considerações expostas anteriormente, dois métodos de otimização existentes e passíveis de serem aplicados neste problema foram adaptados e implementados computacionalmente. Após a realização de testes com vista a avaliá-los com relação à sua eficiência computacional, precisão nos resultados apresentados e facilidade de uso, é selecionado aquele que melhor atende às necessidades do trabalho aqui proposto.

## Capítulo 2 - Revisão da Literatura

### 2.1. Modelos para Simulação Dinâmica do Veículo

A modelagem através do método de multicorpos é amplamente utilizada para a avaliação dinâmica de veículos terrestres. Conforme relatado por Prado (2003), a dinâmica de sistemas multicorpos é baseada na mecânica clássica, sendo que o elemento mais simples de um sistema multicorpos é a partícula livre das equações de Newton, cuja publicação data de 1686. O conceito de corpo rígido foi introduzido por Euler em 1775, sendo que este utilizou o princípio do corpo livre com forças resultantes para modelar os vínculos entre os corpos rígidos. As equações obtidas por Euler são conhecidas como equações de Newton-Euler.

Um sistema de corpos rígidos vinculados foi trabalhado por D'Alembert em 1743, onde ele distingue as forças de aplicação e reação. Coube a Lagrange a fundamentação da formulação matemática de D'Alembert utilizando o princípio do trabalho virtual, obtendo um conjunto de equações diferenciais ordinárias de segunda ordem.

Durante a década de 60, devido basicamente às características dos projetos espaciais e do aumento da complexidade necessária ao desenvolvimento destes projetos, teve início o desenvolvimento de uma nova área da mecânica: a dinâmica de sistemas multicorpos (COSTA NETO, 1991 apud PRADO, 2003). Vários formalismos foram então desenvolvidos para a modelagem de mecanismos com um número grande de corpos rígidos interconectados entre si e a década de 70 presenciou o surgimento de programas de simulação numérica baseados nesta abordagem de multicorpos – um exemplo bastante conhecido é o ADAMS<sup>®</sup> (sigla em inglês para “Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems”, ou Análise Dinâmica Automática para Sistemas Mecânicos). O ADAMS<sup>®</sup> é um programa de simulação de sistemas tri-dimensionais que utiliza técnicas de matrizes esparsas para a resolução de equações

algébricas lineares e o método de Gear para a integração das equações diferenciais. O ADAMS<sup>®</sup> descreve as equações dinâmicas do sistema como equações de Lagrange e os vínculos são descritos por multiplicadores de Lagrange.

A técnica abordada neste trabalho, da descrição dos sistemas multícorpos através de matrizes de influência, é utilizada por Gueler (1992) na modelagem de sistemas de suspensão automotiva. De construção bastante similar com aquela empregada na modelagem por elementos finitos, esta abordagem, apesar de ser menos genérica que a utilização das equações de Lagrange (o que a princípio dificulta a construção de programas comerciais para mecanismos genéricos baseados nesta metodologia, como acontece com o ADAMS<sup>®</sup>), torna bem mais simples o equacionamento de mecanismos definidos, como é o caso das suspensões utilizadas em veículos comerciais e de passageiros.

A técnica de multícorpos por matrizes de influência foi empregada dentro da GMB (General Motors do Brasil) na elaboração dos programas VPG (sigla em inglês para *Virtual Proving Ground*, ou Campo de Provas Virtual), utilizado para determinação de carregamentos dinâmicos em componentes para cálculos de durabilidade em fadiga, e do Virtual Ride, que é o software utilizado para avaliação de conforto, cuja modelagem dinâmica do veículo é idêntica àquela utilizada pelo VPG.

Outras abordagens de modelagem são encontradas na literatura, como o desenvolvimento de um modelo de veículo completo com 10 graus de liberdade mostrado por Greco, Barcellos e Rosa Neto (2001), onde o equacionamento do modelo é trabalhado no ambiente de programação Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>.

## 2.2. Avaliação Objetiva de Conforto

A avaliação de conforto em termos vibracionais é em geral estudada para frequências de excitação até aproximadamente 25 Hz (GILLESPIE, 1992). Existem na literatura as mais diversas abordagens para a parte relacionada à avaliação objetiva de



conforto. Apesar das diferenças encontradas em termos de implementação, todas têm alguns objetivos em comum, sendo entre eles os mais importantes:

- Eliminar e/ou reduzir sensivelmente a subjetividade do processo de desenvolvimento de um veículo em termos de conforto vibracional, deixando as avaliações subjetivas apenas como auxiliar durante a fase de refino final de componentes de suspensão;

- Utilização de técnicas de avaliação objetiva em conjunto com técnicas de simulação, objetivando uma otimização do processo de desenvolvimento tanto em termos de tempo, como de recursos financeiros (através da eliminação de protótipos físicos).

Amódio (1995) mostra na sua tese de mestrado o desenvolvimento de parâmetros objetivos de conforto baseados na norma ISO 2631, que é uma norma genérica para conforto vibracional e analisa frequências de excitação até 80 Hz, tendo um escopo mais amplo do que somente a área automotiva. Esta norma considera o aspecto de como o corpo humano reage a vibrações verticais e longitudinais em diferentes frequências, sendo baseada numa pesquisa onde foram avaliados vários tipos de pessoas aptas a suportarem um trabalho normal diário de oito horas. Ela define para a avaliação diferentes limites, variáveis com a frequência de excitação, sendo estes limites:

- Preservação de conforto: limite de conforto (permite aos passageiros comer, beber, ler, etc);
- Preservação da eficiência do trabalho: limite de fadiga associado à eficiência com que uma pessoa consegue efetuar tarefas e trabalhos;
- Preservação da saúde: limites de exposição.

No desenvolvimento do seu trabalho, Amódio considera a utilização das técnicas de avaliação objetiva de conforto para veículos militares, sendo que a norma ISO 2631 é bastante interessante para este caso. Para a avaliação de conforto em veículos de passageiros aqui utilizada, a aplicação direta desta norma torna-se mais difícil, pela

necessidade de se adaptar a mesma aos diversos critérios de avaliação empregados através da correlação de resultados objetivos com os avaliados subjetivamente em testes de avaliação no campo de provas. Outra dificuldade de implementação dos conceitos da ISO 2631 é que, ao fazer uma avaliação que é função da frequência, ela não se preocupa necessariamente em estabelecer um valor escalar único para conforto, que é de extrema importância quando se cogita utilizar métodos de otimização para o problema – este fator poderia ser contornado pela aplicação de uma integral na resposta em frequência, o que levaria a um valor único escalar para uma determinada faixa de frequências de interesse – novamente porém, existiria a dificuldade de correlacionar estes valores com os as avaliações subjetivas em campo de provas.

Ainda no mesmo trabalho, Amódio demonstra a utilização do conceito de Potência Absorvida (PA). Desenvolvido por Pradko-Lee (1967) para o exército americano, tem a vantagem de resumir o critério de conforto para um único valor escalar, que a princípio é excelente para a utilização em conjunto com métodos de otimização. Novamente aqui, o problema é que o critério foi criado para utilização em faixas mais amplas de conforto – para um veículo militar fora-de-estrada, é de se esperar que o mesmo seja desenvolvido para atingir uma robustez maior em termos de durabilidade e que os critérios de conforto vibracional para os ocupantes sejam relegados a um plano um pouco inferior, concentrando-se no problema de preservação de eficiência de trabalho e limites de exposição do que numa faixa mais refinada, como é o que se espera de veículos comerciais e de passageiros. De toda forma, este conceito poderia a princípio ser utilizado, desde que se criassem faixas diferentes de valores que representassem o problema adequadamente.

Arvidson, Schmechtig e Lennartsson (2000) descrevem em seu trabalho uma avaliação objetiva totalmente baseada na movimentação de artagem do veículo (rotação em torno do eixo lateral do veículo) – a base desta avaliação é bastante semelhante àquela empregada neste trabalho para a avaliação da característica de balanço do veículo (que avalia justamente o comportamento de artagem do mesmo, quando passando por obstáculos como lombadas ou valetas). Apesar deste fato, o

desenvolvimento mostrado neste trabalho não foi em nenhum momento baseado no trabalho de Arvidsson, Schmectig e Lennartsson.

Alguns trabalhos na área de avaliação objetiva de conforto trabalham diretamente com protótipos físicos e medições experimentais, como é o caso dos trabalhos publicados por Se-jin Park (1998 e 2001), onde são demonstrados métodos de instrumentação (através de acelerômetros) de pontos específicos do corpo do motorista e passageiro para avaliação dos sinais medidos em um trecho determinado da pista. Este tipo de avaliação tem como característica principal (além do fato óbvio de necessitar de protótipos físicos) o fato de que avalia o conforto vibracional proveniente de fatores não só da suspensão, como também do próprio assento (banco) no qual o motorista e passageiro estão sentados. Sabe-se que o assento tem um papel importante no conforto vibracional, mas para alguns estudos (como a otimização de parâmetros de suspensão, ao qual este trabalho de dissertação se propõe), torna-se interessante eliminar a variável assento do estudo, porque a princípio pode-se dizer que a vibração que chega ao assento é a variável de entrada de um outro sistema mecânico distinto, e que esta vibração na entrada do assento é o que se deseja minimizar.

Hanada (2002) vai um pouco mais a fundo no aspecto médico e fisiológico do problema de conforto, desenvolvendo experimentalmente um equipamento que, segundo ele, é capaz de reproduzir mecanicamente a estrutura da espinha dorsal, com a vantagem de que neste equipamento é possível realizar uma instrumentação interna, o que refletiria exatamente aquilo que incomoda as pessoas no tocante às vibrações às quais estão submetidas.

A metodologia utilizada no presente trabalho foi desenvolvida pela GMB nos últimos anos (FRANCESCINI, VILELA E MESQUITA JR., 2002), sendo que ela se adequa aos parâmetros já utilizados para a avaliação subjetiva de conforto vibracional empregados pela GMB. Basicamente ela determina alguns parâmetros para avaliação e correlaciona algumas variáveis físicas (que podem ser medidas ou

simuladas) com o resultado da avaliação subjetiva feita por especialistas – os detalhes desta metodologia serão apresentados no capítulo 4.

## 2.3. Metodologias de Otimização

Existem inúmeros métodos de otimização computacional descritos na literatura (PRESS, 1992), porém o grande detalhe que acaba por impedir a implementação da maioria destes mesmos métodos no problema proposto é que eles, em sua grande maioria, utilizam-se do conceito da derivada da função objetivo de otimização. Como estes métodos necessitam de uma função analítica explícita da função objetivo para que, a partir desta, se possa obter uma expressão explícita da função derivada, eles acabam por não ser aplicáveis ao problema aqui proposto, tendo-se em vista que, com a utilização da técnica de multicorpos aliada ao conceito de matrizes de transferência, não se dispõe de uma função objetivo analítica e explícita já para o modelo dinâmico do veículo – quando se pensa na aplicação do método de correlação de conforto vibracional em cima dos resultados deste modelo dinâmico, percebe-se que fica ainda mais distante a possibilidade de se trabalhar com funções explícitas para a otimização do conforto veicular (cujas variáveis em teoria deveriam ser os próprios parâmetros de otimização: curvas de mola, amortecedores, etc.).

Uma possibilidade de se obter a derivada da função objetivo de otimização neste caso seria mapeá-la (discretizando-se) por todo o intervalo de interesse para os parâmetros de otimização – este processo não se torna viável quando são muitos os parâmetros de otimização e muito refinada a discretização desejada. Além do mais, se fosse necessário mapear a função em todo intervalo de interesse para a otimização, não seria necessária a aplicação de nenhuma metodologia de otimização, bastando armazenar os parâmetros que levam ao mínimo neste intervalo.

O que resta então é trabalhar com métodos de otimização que não necessitem trabalhar o conceito de derivada da função, ou seja, aqueles que buscam o ponto ótimo da função objetivo dentro do intervalo de interesse fazendo avaliações somente dos resultados da função objetivo principal, não importando se a mesma é

analticamente explícita ou não. Existe ainda uma outra categoria de técnicas de otimização que fazem o mapeamento numérico da derivada da função somente na direção de interesse dentro de um processo iterativo (não exigindo assim o mapeamento da função derivada em todo o intervalo de interesse) e que não foram objeto de estudo deste trabalho devido à maior simplicidade de aplicação das técnicas que não necessitam da derivada.

A metodologia do simplex descendente (PRESS, 1992) consiste de um algoritmo que, baseado num conceito que pode ser explicado em termos geométricos para um problema com duas ou três variáveis de otimização, realiza uma otimização contínua para os parâmetros de otimização utilizando-se apenas da avaliação da função principal que se deseja otimizar. Uma característica deste método é que ele trabalha somente com fatores lineares sobre os parâmetros de otimização (um multiplicador aplicado a uma curva de força x deflexão por exemplo) – estas variáveis porém não tem necessidade alguma de serem lineares (novamente, pode-se utilizar um exemplo de uma curva totalmente não-linear de força x deflexão de um batedor de borracha). Outro ponto a ser mencionado é que o método por si só não delimita o espaço de trabalho para os parâmetros de otimização, sendo que algumas técnicas devem ser introduzidas para forçar o método a convergir dentro de limites especificados para estes parâmetros de otimização.

O método do simplex descendente foi aplicado por Römer (2000) na otimização de componentes e pontos de articulação de suspensões, tendo em vista minimizar a diferença entre as curvas de geometria de suspensão desejadas (cambagem, caster e convergência) e as obtidas com o auxílio do método para um determinado veículo. Algumas variações do método do simplex aplicadas a problemas variados (não necessariamente de engenharia) também são mostradas por Sousa (2000) na sua dissertação de mestrado.

Outra técnica encontrada na literatura é a da engenharia robusta, ou técnica de Taguchi, em homenagem ao criador da mesma, Genichi Taguchi. Esta técnica,

inicialmente criada para abordar problemas de qualidade em manufatura industrial, mostrou-se também adequada à otimização para uma classe razoavelmente abrangente de problemas, que está enquadrada nas considerações e hipóteses da mesma.

Ross (1998) e Padke (1989) mostram aplicações da metodologia e alguns conceitos importantes para o entendimento da mesma, em termos da descrição matemática necessária à compreensão dos conceitos envolvidos, enquanto a maioria dos autores sobre o tema se concentram apenas em trabalhar sobre as aplicações práticas da técnica. Montgomery (1996), apesar de trabalhar a técnica apenas do ponto de vista de projeto e análise de experimentos, faz algumas críticas relevantes a respeito de problemas que violam as hipóteses básicas para aplicação da engenharia robusta.

Em termos práticos, a técnica de Taguchi trabalha os parâmetros de otimização em níveis discretos, o que pode ser particularmente desejável num problema de otimização para a indústria automotiva, onde se deseja otimizar o comportamento de um veículo utilizando-se componentes ditos “de prateleira”, cujo desenvolvimento já foi feito e o volume de produção é maior, possibilitando uma redução significativa nos futuros custos de produção do veículo como um todo. Esta característica, apesar de não garantir necessariamente uma configuração ótima caso a mesma não se encontre nos valores discretos escolhidos para os parâmetros de otimização, permite o emprego de valores discretos não-lineares, i.e. não existe a princípio nenhuma ligação entre um valor discreto para um parâmetro e outro valor discreto para este mesmo parâmetro (tomando-se a curva de força x deflexão do batente de borracha como exemplo novamente, pode-se trabalhar com curvas completamente distintas para os vários níveis discretos a serem analisados, ao invés de multiplicadores, como no caso do simplex descendente).

Não foi encontrada na literatura nenhuma menção à aplicação da metodologia de engenharia robusta no problema do conforto veicular, além dos trabalhos desenvolvidos pelo próprio autor com Franceschini e Mesquita Jr. (2002) e com Tamai (2003).

Existem ainda trabalhos publicados que fazem uma modelagem mais simplificada do veículo, porém chegam a uma função objetivo analítica explícita e permitem a aplicação de métodos por derivada, como no trabalho publicado por Koulucheris, Vrazopoulos e Dertimmanis (2002). Ainda no ramo de modelagens mais simplificadas, Rodi (1991) mostra a aplicação da teoria de controle ótimo para a obtenção de curvas características de amortecimento em tração e compressão que otimizem um índice que faz a composição de parâmetros de conforto e dirigibilidade.

## Capítulo 3 - Ferramenta de Simulação

### Dinâmica do Veículo

#### 3.1. Princípios da Ferramenta de Simulação Dinâmica

Este capítulo tem por objetivo descrever o funcionamento básico da ferramenta de simulação dinâmica do veículo na qual se baseia a ferramenta de simulação de conforto, que por sua vez é a base das rotinas de otimização estudadas neste trabalho. Esta ferramenta é descrita em mais detalhes por Gueler (1992).

Trata-se de uma ferramenta que aplica a metodologia de multicorpos, i.e. simulação da dinâmica do veículo através da discretização do mesmo em vários corpos rígidos interligados por componentes elásticos (molas, batentes, etc.) e de amortecimento (amortecedores, amortecimento de componentes de borracha, etc.), sendo que não existe nenhuma restrição que impeça que estes componentes de ligação sejam não-lineares; de fato, a maioria dos componentes de suspensões automotivas atualmente tem um comportamento não-linear que não pode ser desprezado na simulação, como os amortecedores, batentes e molas progressivas. Além disto são aplicadas no modelo as excitações externas (no caso, excitações de pista) para as quais se pretende estudar o comportamento dinâmico do veículo.

Os corpos rígidos que são definidos para a simulação são caracterizados pelas suas respectivas massas e momentos de inércia, sendo que as massas estão relacionadas aos movimentos lineares destes corpos e os momentos de inércia aos movimentos angulares dos mesmos. Devido ao fato dos principais corpos rígidos definidos para um veículo (conjunto de motor + transmissão e carroçaria) terem produtos de inércia desprezíveis em relação aos momentos de inércia principais, estes produtos de inércia são desprezados na modelagem do problema (os produtos de inércia são em torno de 2 ordens de grandeza menores que os principais, o que acaba deixando-os na



mesma ordem de grandeza da precisão com que se consegue obter o valor dos últimos). Define-se também como **estado** de uma massa ou momento de inércia a sua posição e velocidade em uma determinada direção (linear ou angular). A cada direção na qual um corpo rígido pode se movimentar denomina-se **grau de liberdade**, sendo que o número de graus de liberdade de um corpo rígido é o número de direções nas quais ele tem liberdade de se movimentar. A figura 3.1 mostra a representação dos estados de uma massa e um momento de inércia.

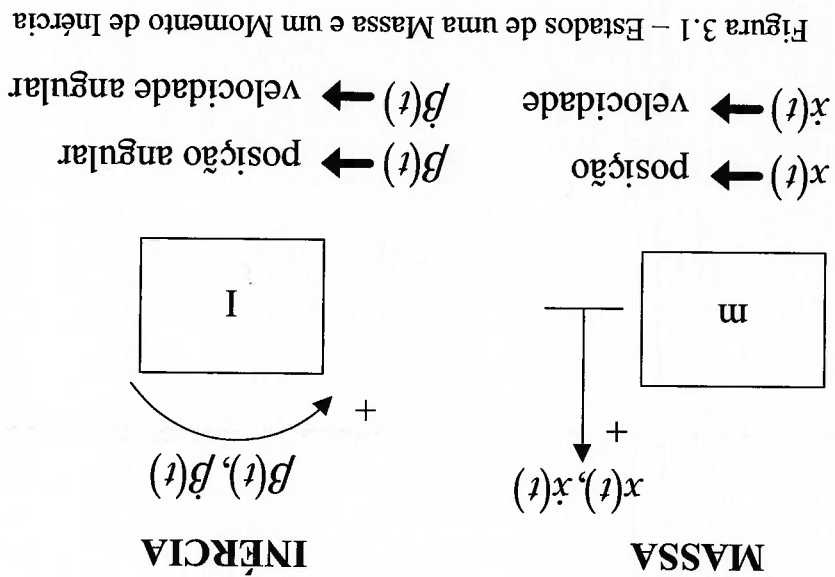


Figura 3.1 – Estados de uma Massa e um Momento de Inércia

O número de graus de liberdade do sistema completo é a soma do número de graus de liberdade que cada corpo rígido tem individualmente – os modelos aqui utilizados para a análise de conforto possuem cerca de 20 graus de liberdade.

As massas e/ou momentos de inércia do sistema dinâmico (neste caso, o veículo) são interligadas entre si por meio de sistemas de ligação que, na metodologia neste caso empregada, são descritos pela chamada **matriz de influência**. A matriz de influência é uma matriz numérica cuja dimensão é:

$$n^{\circ} \text{ linhas} = n^{\circ} \text{ sist. de ligação} + n^{\circ} \text{ elementos de restrição}$$

$$n^{\circ} \text{ colunas} = n^{\circ} \text{ massas} + n^{\circ} \text{ momentos de inércia} + n^{\circ} \text{ excitações}$$

A organização da matriz é ilustrada na tabela 3.1.

A convergência de sinais utilizada estabelece que cada sistema de ligação tem um valor negativo numa de suas extremidades e um valor positivo na extremidade oposta, e como não são definidos sistemas de ligação com mais de duas extremidades ou portos, não existe problema algum em se utilizar esta convergência. Estabelece-se também que as extremidades dos sistemas de ligação ligadas às excitações externas têm valores negativos. A figura 3.2 ilustra um exemplo de como montar uma matriz de influência para um sistema com dois graus de liberdade, onde a sigla  $m_1$  e  $m_2$  referem-se às duas massas do sistema,  $SL_1$  e  $SL_2$  aos dois sistemas de ligação e  $exci_1$  e  $exci_2$  a excitação do sistema.

Os valores da matriz de influência nas colunas das massas são os cossenos diretores dos sistemas de coordenadas relativos dos sistemas de ligação e/ou elementos de restrição envolvidos e adquirem valores +1, -1 ou 0 quando se trabalha com o sistema global para todos os componentes. Os valores das colunas dos momentos de inércia estão relacionados aos braços que os sistemas de ligação têm em relação ao CG do corpo rígido em questão para a rotação específica da coluna – esses valores também são multiplicados pelos cossenos diretores dos sistemas de coordenadas relativos dos sistemas de ligação envolvidos quando estes últimos estão definidos fora do sistema global. Por fim, as excitações também refletem apenas os cossenos diretores dos sistemas de coordenadas relativos dos sistemas de ligação excitados.

Massas (kg)	Sistemas de Ligação				Restrição de Elementos
	Valores (kg)	Inércias (kg.m <sup>2</sup> )	Excitações		

Tabela 3.1 – Organização da Matriz de Influência

## SISTEMA COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE

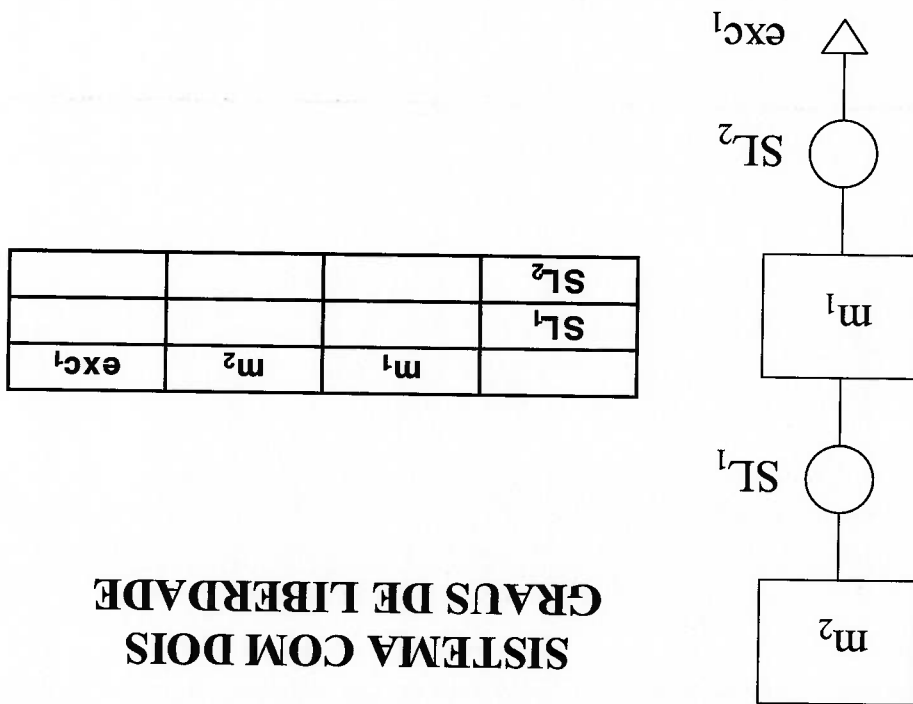


Figura 3.2 – Sistema com Dois Graus de Liberdade e Matriz de Influência Correspondente

Inicia-se a montagem da matriz pelas excitações. Aqui a excitação externa atua no sistema de ligação 2 – como por definição esta extremidade do sistema de ligação ligada à excitação externa tem valor negativo e como os sistemas de ligação estão no sistema global adotado (uniaxial vertical), a posição da matriz referente (coluna da excitação 1 e linha do sistema de ligação 2) fica com valor  $-1$ . A posição referente à coluna da excitação 1 e linha do sistema de ligação 1 fica com valor nulo, tendo-se em vista que a excitação 1 não atua no sistema de ligação 1. Assim obtêm-se:

Tabela 3.2 – Matriz de Influência do Sistema com Dois Graus de Liberdade com Coluna de Excitação Preenchida

$m_1$	$m_2$	$exc_1$
$SL_1$		0
$SL_2$		$-1$

O próximo passo é seguir a ordem dos sistemas de ligação: a outra extremidade do sistema de ligação 2 (que recebe a excitação externa 1) está ligada na massa 1, desta

forma, o valor nesta posição da tabela é +1, e na coluna da massa 2 este valor é nulo, tendo-se em vista que o sistema de ligação 2 não está conectado à massa 2. Tem-se então:

Tabela 3.3 – Matriz de Influência do Sistema com Dois Graus de Liberdade com Coluna de Excitação e Linha do Sistema de Ligação 2 Preenchidas

	$m_1$	$m_2$	$exc_1$
$SL_1$			0
$SL_2$	1	0	-1

Segundo a mesma convenção de sinais do sistema de ligação 2, tem-se que a linha referente ao sistema de ligação 1 fica com valor -1 na coluna da massa 1 (extremidade inferior) e +1 na coluna da massa 2 (extremidade superior). Assim, a matriz completa fica:

Tabela 3.4 – Matriz de Influência Completa do Sistema com Dois Graus de Liberdade

	$m_1$	$m_2$	$exc_1$
$SL_1$	-1	1	0
$SL_2$	1	0	-1

A figura 3.3 ilustra um sistema que possui modelado o movimento de rotação também.

# SISTEMA COM ROTAÇÃO

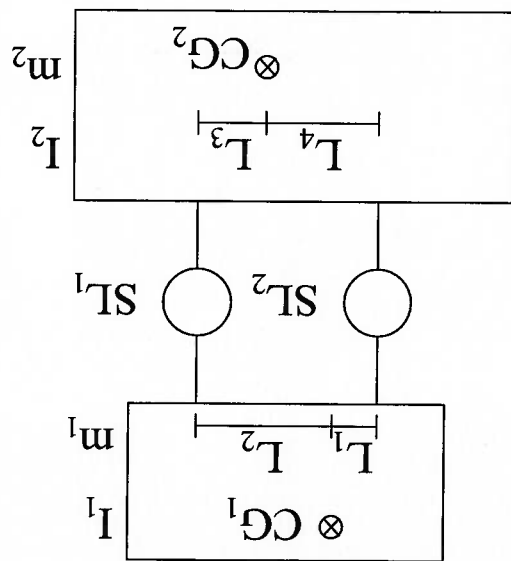


Figura 3.3 – Sistema com Quatro Graus de Liberdade Incluindo Rotações

Tabela 3.5 – Matriz de Influência Completa do Sistema com Quatro Graus de

Liberdade Incluindo Rotações

	$m_1$	$m_2$	$I_1$	$I_2$
$SL_1$	1	-1	$L_2$	$-L_3$
$SL_2$	1	-1	$-L_1$	$L_4$

Abaixo se encontra, a título de ilustração, um modelo simplificado de um veículo com 1 graus de liberdade:

## SISTEMA SIMPLIFICADO DE AUTOMÓVEL COM BARRA ESTABILIZADORA DIANTEIRA

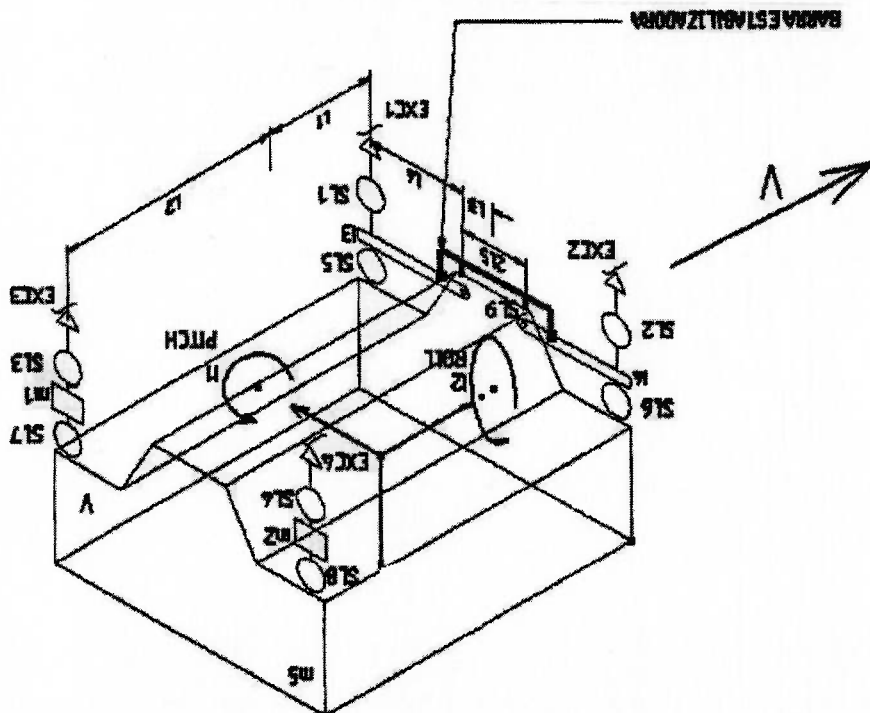


Figura 3.4 – Sistema Simplificado de um Veículo

Tabela 3.6 – Matriz de Influência Completa do Sistema Simplificado de um Veículo

	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$exc_1$	$exc_2$	$exc_3$	$exc_4$
SL <sub>1</sub>	0	0	1	-L <sub>1</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	0	-1	0	0	0
SL <sub>2</sub>	0	0	1	-L <sub>1</sub>	-L <sub>3</sub>	0	-L <sub>4</sub>	0	-1	0	0
SL <sub>3</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
SL <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
SL <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	L <sub>4</sub>	0	0	0	0	0
SL <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	0	L <sub>4</sub>	0	0	0	0
SL <sub>7</sub>	-1	0	1	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub> +L <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	0
SL <sub>8</sub>	0	-1	1	L <sub>2</sub>	-L <sub>3</sub> -L <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	0
SL <sub>9</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SL <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	0	L <sub>4</sub> /L <sub>5</sub>	0	0	0	0
SL <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	0	-L <sub>4</sub> /L <sub>5</sub>	0	0	0	0
SL <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SL <sub>8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SL <sub>9</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Vale lembrar que o modelo base para o estudo neste trabalho é mais detalhado que o modelo mostrado acima, contemplando outros parâmetros como a movimentação dos componentes das suspensões dianteira e traseira, os sistemas de coordenadas locais

dos componentes tais como molas, amortecedores e batentes, etc., o que torna o sistema mais complexo e custoso computacionalmente, porém este nível de detalhamento é necessário para se atingir a precisão requerida para a análise. No final deste capítulo serão mostrados exemplos de correlações obtidos com o modelo atualmente empregado.

Como visto anteriormente, cada movimento do veículo contemplado pelo modelo está associado a um grau de liberdade, este último sendo representado pela sua posição  $x(t)$  e pela sua velocidade  $\dot{x}(t)$ .

Para o sistema completo, em um determinado instante  $t$ , são conhecidos o seu estado (estado de todos os graus de liberdade) e também são conhecidas todas excitações aplicadas ao sistema neste mesmo instante  $t$ . Dado o estado do sistema em conjunto com as excitações aplicadas ao mesmo, é possível calcular os deslocamentos relativos nas extremidades de cada sistema de ligação – com estes deslocamentos e velocidades relativas é possível obter os esforços atuantes nos elementos de rigidez e amortecimento de cada sistema de ligação. Por sua vez, de posse destes valores dos esforços atuantes nos sistemas de ligação, podem ser calculados as forças e os momentos resultantes em cada massa e momento de inércia modelados. Levando-se em consideração o fato de que a Segunda Lei de Newton é válida para cada grau de liberdade:

$$m \cdot \ddot{x}(t) = F(t) \quad (3.1)$$

pode-se então calcular as acelerações  $\ddot{x}(t)$  atuantes nas massas e momentos de inércia (Newton-Euler neste caso, por se tratar de movimento rotacional) através da divisão das forças resultantes em cada grau de liberdade pelo valor de massa ou momento de inércia respectivo.

O estado no instante seguinte  $(t+dt)$  é obtido então através da integração a partir dos valores de velocidade e aceleração conhecidos no instante  $t$ .

Em cada instante, as variáveis de interesse podem ser armazenadas para análise posterior. O fluxograma geral da simulação dinâmica está mostrado na figura 3.5.

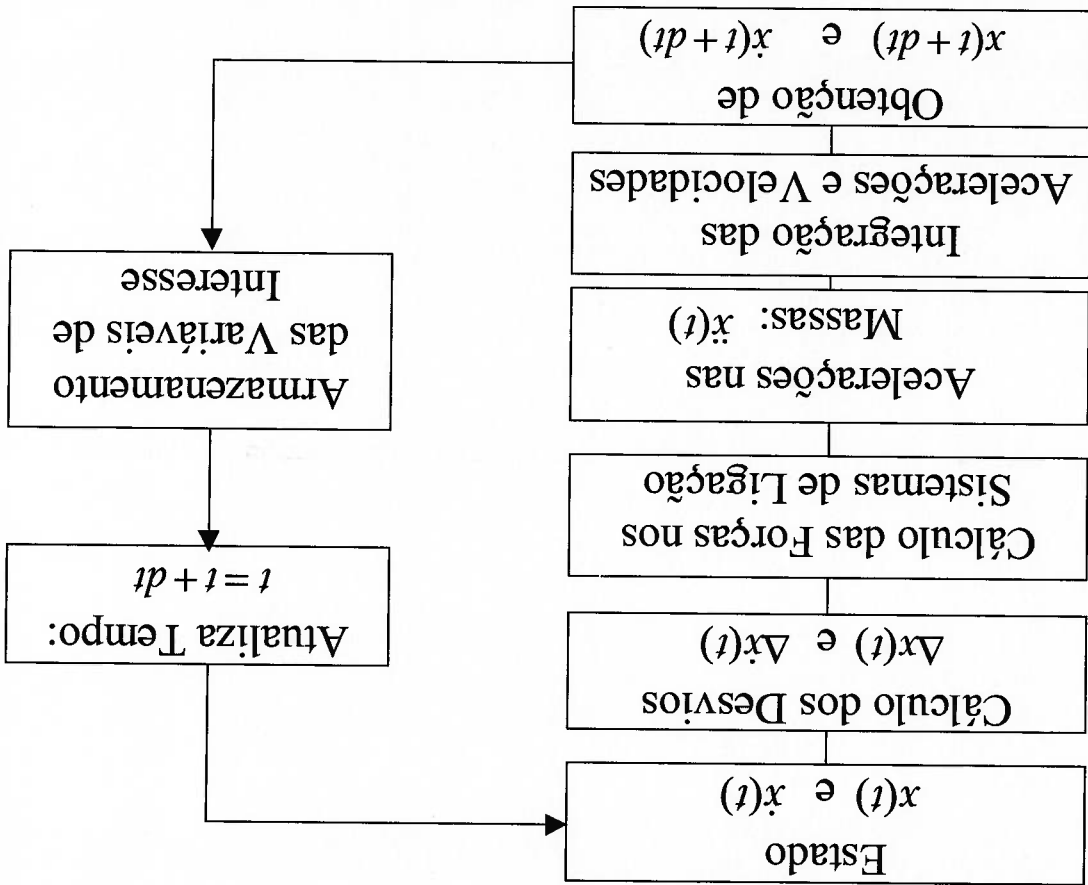


Figura 3.5 – Fluxograma Geral da Simulação Dinâmica do Veículo

A matriz de influência montada da maneira como ela é idealizada facilita a implementação do algoritmo de cálculo dos deslocamentos relativos e esforços nos sistemas de ligação. As equações abaixo mostram como fica o cálculo dos deslocamentos relativos num sistema de ligação de índice i:

$$\Delta x[i] = \sum_{j=1}^{N_m+N_l+N_{ex}} (Inf[i, j][x[j]]) \quad (3.2)$$

$$\Delta \dot{x}[i] = \sum_{j=1}^{N_m+N_l+N_{ex}} (Inf[i, j][\dot{x}[j]]) \quad (3.3)$$



onde  $Inf$  é a matriz de influência e  $N_M$ ,  $N_I$  e  $N_{EX}$  referem-se ao número de massas, momentos de inércia e excitações externas respectivamente. A equação a seguir mostra como fica o cálculo de força (ou momento) atuando numa massa (ou momento de inércia) de índice  $k$ :

$$F[k] = \sum_{l=1}^{N_{SISTLG}} [-Inf[l, k] (F^{MOLA}[l] + F^{AMORT}[l])] \quad (3.4)$$

onde  $N_{SISTLG}$  refere-se ao número de sistemas de ligação.

### 3.2. Exemplos de Obtenção das Equações Dinâmicas

A título de demonstração da utilização prática da metodologia de cálculo dinâmico aqui descrita, dois exemplos são apresentados: o primeiro lida com um sistema linear com excitação e o segundo demonstra a obtenção das equações dinâmicas para um sistema com graus de liberdade rotacionais envolvidos.

A figura 3.6 mostra basicamente o mesmo sistema já mostrado na figura 3.2, utilizando-se molas de rigidez constante para os sistemas de ligação.

## SISTEMA LINEAR COM EXCITAÇÃO

$exc_1$	$m_2$	$m_1$	
0	1	-1	$SL_1$
-1	0	1	$SL_2$

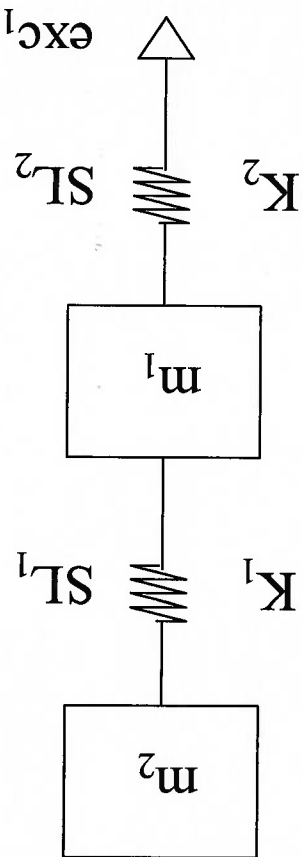


Figura 3.6 – Sistema Linear com Excitação e Matriz de Influência Respektiva

Segundo-se os passos mostrados na seção 3.1, obtêm-se o seguinte para os deslocamentos:

$$\begin{aligned} \Delta x[1] &= Inf[1,1]x[1] + Inf[1,2]x[2] + Inf[1,3]exc[1] \\ \Delta x[1] &= (-1)x[1] + 1x[2] + 0exc[1] \\ \Delta x[1] &= -x[1] + x[2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta x[2] &= Inf[2,1]x[1] + Inf[2,2]x[2] + Inf[2,3]exc[1] \\ \Delta x[2] &= 1x[1] + 0x[2] + (-1)exc[1] \\ \Delta x[2] &= x[1] - exc[1] \end{aligned} \tag{3.5}$$

Da mesma forma, as velocidades resultam em:

$$\Delta x[1] = -\dot{x}[1] + \dot{x}[2]$$

$$\Delta x[2] = \dot{x}[1] - \text{exc}[1]$$

(3.6)

As forças nos sistemas de ligação ficam:

$$F_{sl}[1] = K_1 \cdot \Delta x[1]$$

(3.7)

$$F_{sl}[2] = K_2 \cdot \Delta x[2]$$

E as forças nas massas:

$$F^m[1] = -(Inf[1,1] \cdot F_{sl}[1] + Inf[2,1] \cdot F_{sl}[2])$$

$$F^m[1] = -((-1) \cdot F_{sl}[1] + 1 \cdot F_{sl}[2])$$

$$F^m[1] = K_1 \cdot \Delta x[1] - K_2 \cdot \Delta x[2]$$

$$F^m[2] = -(Inf[1,2] \cdot F_{sl}[1] + Inf[2,2] \cdot F_{sl}[2])$$

$$F^m[2] = -(1 \cdot F_{sl}[1] + 0 \cdot F_{sl}[2])$$

$$F^m[2] = -K_1 \cdot \Delta x[1]$$

(3.8)

O que leva às seguintes acelerações nas massas:

$$\ddot{x}[1] = \frac{F^m[1]}{K_1 \cdot \Delta x[1] - K_2 \cdot \Delta x[2]}$$

$$\ddot{x}[1] = \frac{m_1}{K_1 \cdot (x[2] - x[1]) - K_2 \cdot (x[1] - \text{exc}[1])}$$

$$\ddot{x}[2] = \frac{F^m[2]}{-K_1 \cdot \Delta x[1]}$$

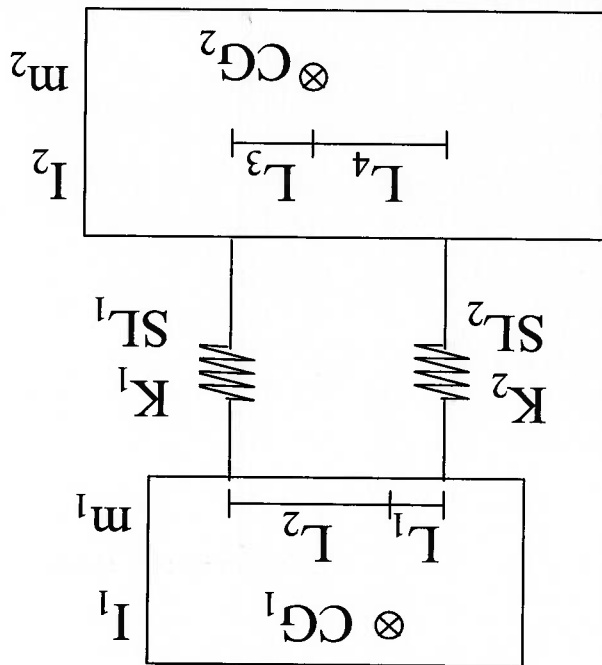
$$\ddot{x}[2] = \frac{m_2}{-K_1 \cdot (-x[1] + x[2])} = \frac{m_2}{K_1 \cdot (x[1] - x[2])}$$

(3.9)

Os resultados obtidos são, como se espera, idênticos àqueles obtidos quando se resolve o sistema analiticamente.

A figura 3.7 mostra novamente o sistema mostrado na figura 3.3 com a sua respectiva matriz de influência, utilizando-se molas de rigidez constante para os sistemas de ligação.

## SISTEMA COM ROTAÇÃO



	$m_1$	$m_2$	$l_1$	$l_2$
$SL_1$	1	-1	$L_2$	$-L_3$
$SL_2$	1	-1	$-L_1$	$L_4$

Figura 3.7 – Sistema Linear + Rotacional e Matriz de Influência Respektiva

Novamente, seguindo-se os passos mostrados na seção 3.1, obtêm-se os seguintes resultados:

$$\begin{aligned}
T'_1[2] &= -(Inf[1,4][F^{st}[1] + Inf[2,4][F^{st}[2]]) \\
T'_1[2] &= -(L_3 - L_2)(F^{st}[1] + L_4 F^{st}[2]) \\
T'_1[2] &= L_3 K_1 \Delta x[1] - L_4 K_2 \Delta x[2]
\end{aligned}
\tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
T'_1[1] &= -(Inf[1,3][F^{st}[1] + Inf[2,3][F^{st}[2]]) \\
T'_1[1] &= -(L_1)(F^{st}[1] + L_1 F^{st}[2]) \\
T'_1[1] &= -L_2 K_1 \Delta x[1] + L_1 K_2 \Delta x[2]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F^M[2] &= -(Inf[1,2][F^{st}[1] + Inf[2,2][F^{st}[2]]) \\
F^M[2] &= -(1)(F^{st}[1] + (-1)F^{st}[2]) \\
F^M[2] &= K_1 \Delta x[1] + K_2 \Delta x[2]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F^M[1] &= -(Inf[1,1][F^{st}[1] + Inf[2,1][F^{st}[2]]) \\
F^M[1] &= -(1)(F^{st}[1] + 1 F^{st}[2]) \\
F^M[1] &= -K_1 \Delta x[1] - K_2 \Delta x[2]
\end{aligned}$$

$$F^{st}[2] = K_2 \Delta x[2]
\tag{3.12}$$

$$F^{st}[1] = K_1 \Delta x[1]$$

$$\begin{aligned}
\Delta x[1] &= x[1] - x[2] + L_2 \beta[1] - L_3 \beta[2] \\
\Delta x[2] &= x[1] - x[2] - L_1 \beta[1] + L_4 \beta[2]
\end{aligned}
\tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
\Delta x[1] &= Inf[1,1][x[1] + Inf[1,2][x[2] + Inf[1,3][\beta[1] + Inf[1,4][\beta[2]] \\
\Delta x[1] &= 1 \cdot x[1] + (-1)x[2] + L_2 \beta[1] + (-L_3)\beta[2] \\
\Delta x[1] &= x[1] - x[2] + L_2 \beta[1] - L_3 \beta[2] \\
\Delta x[2] &= Inf[2,1][x[1] + Inf[2,2][x[2] + Inf[2,3][\beta[1] + Inf[2,4][\beta[2]] \\
\Delta x[2] &= 1 \cdot x[1] + (-1)x[2] + (-L_1)\beta[1] + L_4 \beta[2] \\
\Delta x[2] &= x[1] - x[2] - L_1 \beta[1] + L_4 \beta[2]
\end{aligned}
\tag{3.10}$$

Esta metodologia de simulação multiconcorpos aqui utilizada, apesar de ser relativamente simples do ponto de vista da teoria envolvida, é bastante poderosa no que se refere à precisão com que podem ser simulados sistemas reais quando corretamente aplicada (precisão necessária para o tipo de aplicação aqui utilizada). Os gráficos das figuras 3.8 a 3.11 mostram um exemplo de correlação de valores simulados e medidos para grandezas de força e aceleração em um veículo de passageiros. Os valores aqui mostrados são frutos da medição em um equipamento de laboratório (*four-post*) que excita verticalmente cada roda do veículo de maneira independente através da base dos pneus – a utilização de um equipamento de laboratório para esta correlação se deve principalmente ao fato de que este

### 3.3. Correlação com Resultados Experimentais

analítica do problema.

Novamente os resultados obtidos são os mesmos que se obtém com a solução

$$\begin{aligned}
 x[1] &= \frac{F_m[1]}{-K_1 \Delta x[1] - K_2 \Delta x[2]} = \frac{m_1}{-K_1(x[1] - x[2]) + L_2 \beta[1] - L_3 \beta[2]} - K_2(x[1] - x[2]) - L_1 \beta[1] + L_4 \beta[2]} \\
 x[2] &= \frac{F_m[2]}{K_1 \Delta x[1] + K_2 \Delta x[2]} = \frac{m_2}{K_1(x[1] - x[2]) + L_2 \beta[1] - L_3 \beta[2]} + K_2(x[1] - x[2]) - L_1 \beta[1] + L_4 \beta[2]} \\
 \beta[1] &= \frac{T_1[1]}{-L_2 K_1 \Delta x[1] + L_1 K_2 \Delta x[2]} = \frac{I_1}{-L_2 K_1(x[1] - x[2]) + L_1 K_2(x[1] - x[2]) - L_1 \beta[1] + L_4 \beta[2]} \\
 \beta[2] &= \frac{T_1[2]}{L_3 K_1 \Delta x[1] - L_4 K_2 \Delta x[2]} = \frac{I_2}{L_3 K_1(x[1] - x[2]) + L_2 \beta[1] - L_3 \beta[2]} - L_3 \beta[1] - L_4 \beta[2]} \\
 \beta[2] &= \frac{T_2[2]}{L_3 K_1(x[1] - x[2]) + L_2 \beta[1] - L_3 \beta[2]} - L_3 \beta[1] - L_4 \beta[2]} = \frac{I_2}{L_3 K_1(x[1] - x[2]) + L_2 \beta[1] - L_3 \beta[2]} - L_3 \beta[1] - L_4 \beta[2]}
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

equipamento garante a repetibilidade da excitação introduzida ao veículo, sendo que esta excitação foi medida em uma pista real de testes do Campo de Provas de Cruz Alta, pertencente à General Motors do Brasil Ltda. Os valores mostrados se referem a um veículo de passageiros de pequeno porte.

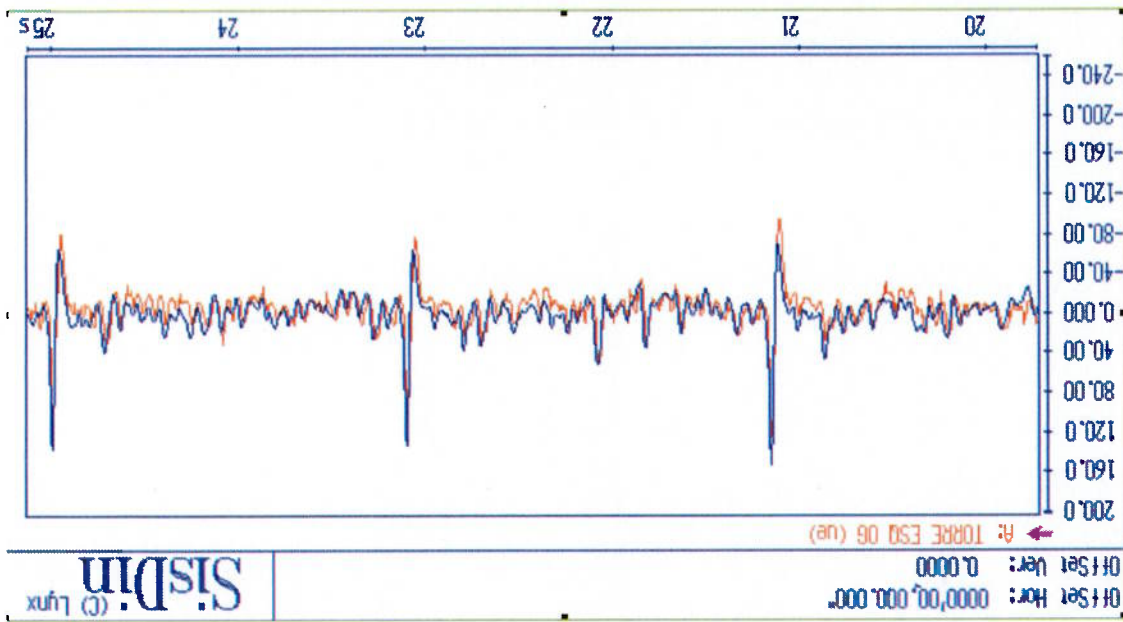


Figura 3.8 – Forças Medidas na Torre do Amortecedor Dianteiro (Azul – medido / Vermelho – simulado)

\* A escala do gráfico aqui mostrado está em  $\mu F$ , pelo fato de que as forças foram medidas indiretamente através de extensômetros na torre do amortecedor.

Figura 3.10 – Acelerações Verticais Medidas na Junta Esférica do Braço de Controle (Azul – medido / Vermelho – simulado)

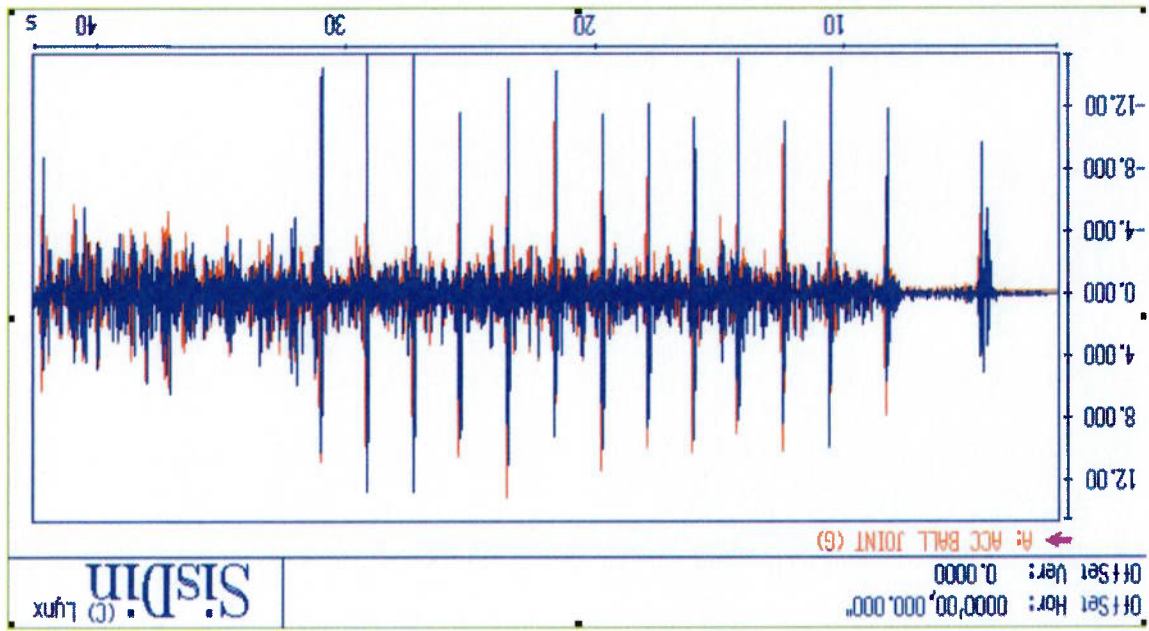


Figura 3.9 - Espectro de Frequência das Forças Medidas na Torre do Amortecedor Dianteiro (Azul – medido / Vermelho – simulado)

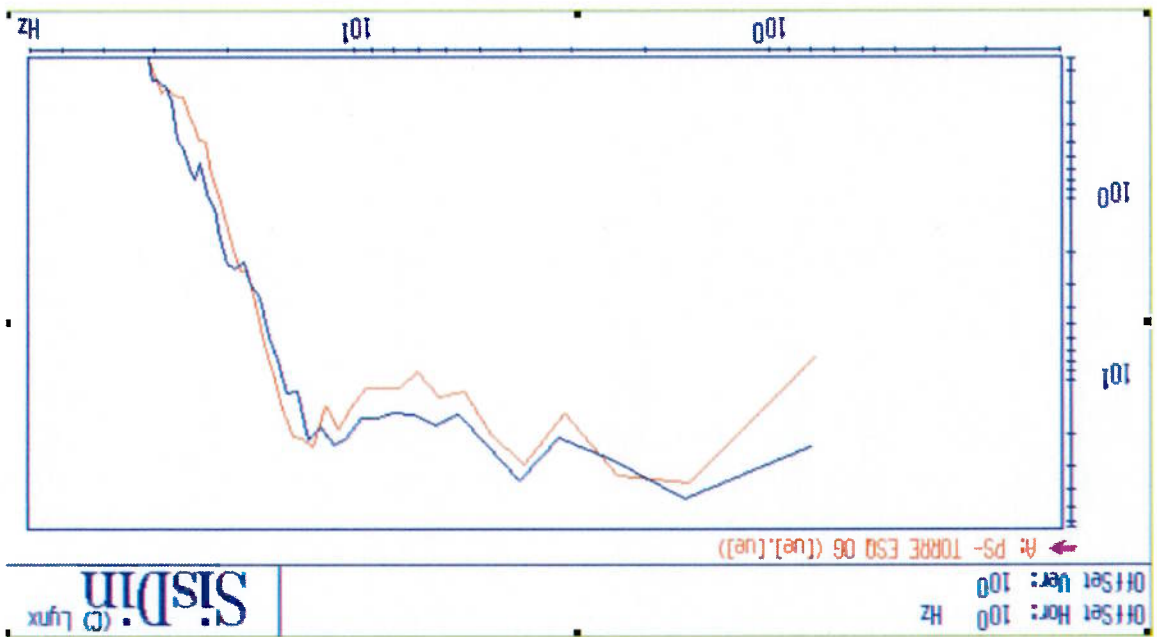
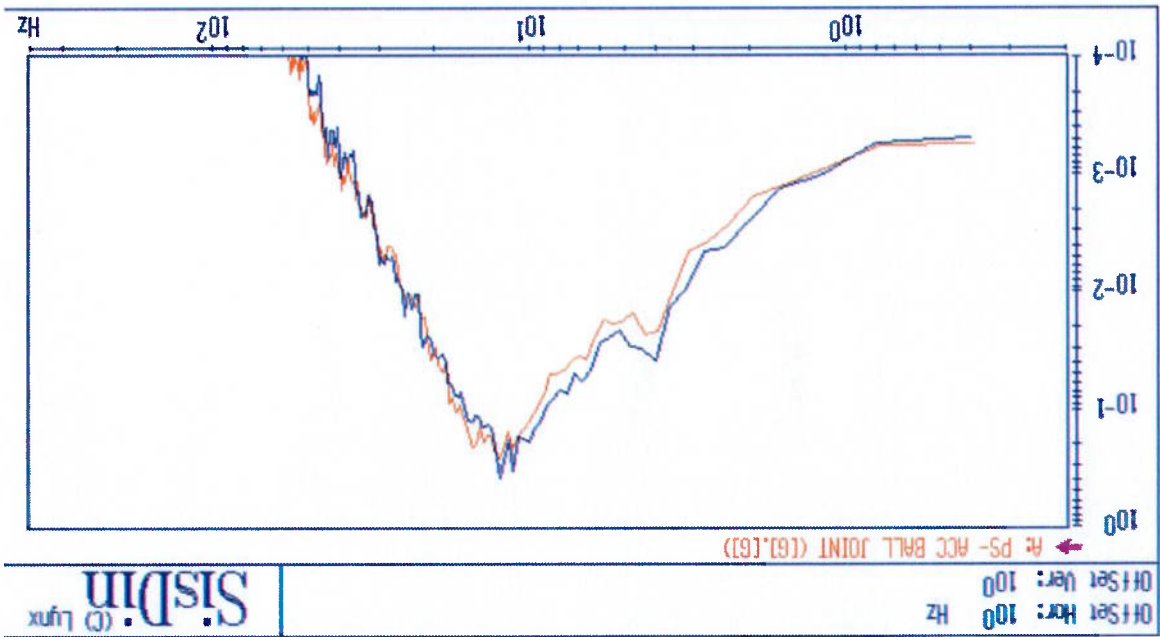




Figura 3.11 – Espectro de Frequência das Acelerações Verticais Medidas na Junta Estérica do Braço de Controle (Azul – medido / Vermelho – simulado)



## Capítulo 4 - Correlação dos Parâmetros

### Objetivos de Conforto

#### 4.1. Método Empregado

A correlação entre os critérios de conforto veicular e as variáveis dinâmicas do veículo é um dos passos mais importantes para garantir que a simulação computacional possa representar fidedignamente a avaliação de conforto realizada em protótipos físicos. Os pontos aqui mostrados já haviam sido mostrados por Franceschini, Vilela e Mesquita Jr. (2002).

A primeiro ponto a ser analisado é a definição de quais critérios de conforto serão considerados na análise. Todo trabalho aqui mostrado baseia-se na avaliação das seguintes características de conforto veicular:

- *Asperza*: capacidade da suspensão do veículo em filtrar as excitações de pista caracterizadas por alta frequência (superior a 10 Hz) e baixa amplitude (inferior a 10 mm).
- *Capacidade de Absorção*: capacidade da suspensão do veículo em absorver impactos provindos de obstáculos de média amplitude da pista (entre 10 mm e 50 mm aproximadamente). Exemplos típicos são os olhos de gatos existentes nas rodovias e pequenas pedras na pista.
- *Entrada de Bateite*: refilete o comportamento do veículo quando passando por obstáculos maiores (amplitude superior a 50 mm), como buracos ou valas, no tocante ao impacto do bateite de compressão da suspensão que é sentido pelo motorista.
- *Balanco*: avalia o comportamento do veículo em relação à estabilidade rotacional em torno do eixo lateral (eixo Y – movimentação de artagem ou de *pitch*), quando o mesmo passa por lombadas ou depressões na pista.

Tendo sido definidos quais são os critérios que se pretende representar na simulação, a maneira encontrada para representá-los da melhor maneira possível, evitando-se possíveis conclusões equivocadas a partir dos parâmetros de simulação, parte da definição de quais são os trechos de pista onde estes critérios se tornam mais evidentes. Houve um trabalho dentro da GMB (General Motors do Brasil) aliando-se especialistas das áreas de simulação e análise, desenvolvimento experimental e desenvolvimento de componentes para se chegar à definição destes trechos onde a excitação de pista torna mais evidente cada um dos critérios a serem analisados (asperza, capacidade de absorção, entrada de batente e balanço) e, de uma maneira geral, isole os efeitos para cada um destes critérios. Desta forma, chegam-se aos seguintes trechos de excitação de pista ideal para avaliação de cada um dos critérios:

- *Asperza*: pista de paralelepípedos.
- *Capacidade de Absorção*: metade do veículo passando sobre olhos de gato (com 50 mm de altura cada) e a outra metade sobre uma superfície asfaltada lisa.
- *Entrada de Batente*: trecho de pista com uma série de buracos de amplitude variada (entre 50 mm e 100 mm) passando pelos dois lados do carro (i.e., com os pneus de ambos os lados passando por sobre os buracos).
- *Balanço*: passagem por uma vala (de água de chuva) seguida por uma estrada plana asfaltada.

As figuras 4.1 até 4.4 ilustram os trechos considerados.

Figura 4.2 – Trecho de Pista com Olhos de Gato (Simulação de Capacidade de Absorção)



Figura 4.1 – Trecho de Pista de Paralelepípedos (Simulação de Aspreza)



Figura 4.3 – Trechos de Pista com Buracos de Maior Amplitude (Simulação de Entrada de Bateite)



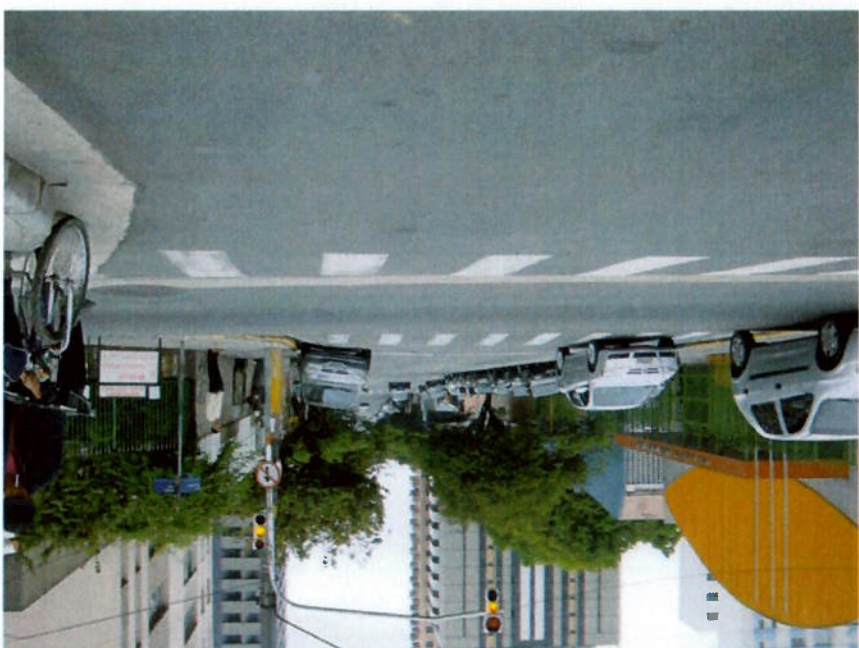
- Forças atuantes nas molas, amortecedores e batentes de compressão para cada uma das rodas (dianteira e traseira, esquerda e direita).
- Aceleração na posição do motorista.

dentro da GMB, determinaram-se as seguintes variáveis a serem analisadas:  
 trechos. Baseando-se novamente no trabalho conjunto dos especialistas de cada área pelo modelo de simulação que serão consideradas para a correlação em cada um dos Finalmente é de fundamental importância a definição das variáveis objetivas geradas

- *Aspereza*: velocidade constante de 60 km/h.
- *Capacidade de Absorção*: velocidade constante de 60 km/h.
- *Entrada de Bateite*: velocidade variável entre 30 km/h e 60 km/h.
- *Balanço*: velocidade constante de 80 km/h.

Tendo-se definidas as excitações de pista a serem utilizadas na simulação, são definidas também as condições de velocidade do veículo para cada um dos trechos, conforme segue:

Figura 4.4 – Trecho de Pista com Vala de Chuva (Simulação de Balanço)



- Acelerações rotacionais em torno dos eixos lateral e longitudinal do veículo (eixos Y e X – acelerações de arfagem e rolagem lateral respectivamente).

Na simulação computacional, o que é feito é uma combinação dos valores de pico e média RMS (*root mean square*, ou média quadrática) das variáveis acima através de uma matriz de pesos específica para cada manobra. Esta matriz tem a finalidade de correlacionar os valores objetivos simulados (em termos de aceleração –  $m/s^2$ , força – N e aceleração rotacional –  $rad/s^2$ ) com os valores subjetivos observados pelos pilotos de testes no campo de provas.

Um software específico para avaliação computacional de conforto foi então desenvolvido (com a participação do autor desta tese de dissertação) e foi batizado de *Virtual Ride*. A figura 4.5 mostra como é o esquema básico de funcionamento deste software para cada um dos parâmetros de conforto estudados.

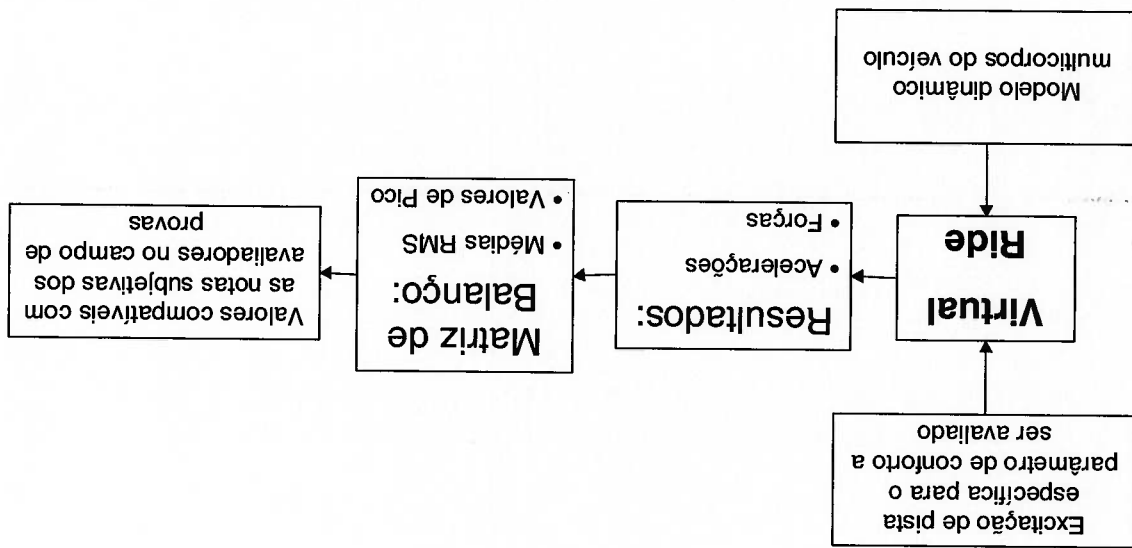


Figura 4.5 – Esquema Geral de Funcionamento - Virtual Ride

Utilizando-se esta metodologia, torna-se possível a obtenção de “notas” compatíveis com as avaliações subjetivas a partir das variáveis calculadas com o auxílio do modelo multicorpos. Durante o desenvolvimento da ferramenta, existiu uma etapa de “calibração” da matriz de pesos utilizada no software. Foram realizadas avaliações num veículo utilitário esportivo (SUV da sigla em inglês – *Sport Utility*

*Vehicle*) para oito diferentes configurações de suspensão no mesmo veículo. As avaliações em campo de provas foram realizadas por dois avaliadores (percebe-se que existe uma variação da nota subjetiva inerente ao processo de avaliação de cada avaliador – este tópico será coberto em mais detalhes adiante neste mesmo capítulo) e as mesmas configurações foram simuladas utilizando-se o Virtual Ride. O importante nesta etapa é chegar em matrizes de peso tais que minimizem a diferença entre os resultados por simulação e a média dos resultados subjetivos avaliados no campo de provas. As figuras 4.6 até 4.9 mostram os resultados de correlação obtidos para cada uma das variáveis com o auxílio do método dos mínimos quadrados. Os gráficos mostram os resultados de simulação (Virtual Ride), as notas subjetivas dadas por cada um dos avaliadores no campo de provas (CPCA 1 e CPCA 2 são os dois avaliadores – CPCA aqui denota a sigla do Campo de Provas de Cruz Alta) e a média dos avaliadores no campo de provas (Média CPCA). No eixo horizontal, os números de 1 a 8 denotam cada uma das diferentes configurações de suspensão avaliada e o eixo vertical mostra a nota de cada configuração (numa escala que varia de 0 até 10).

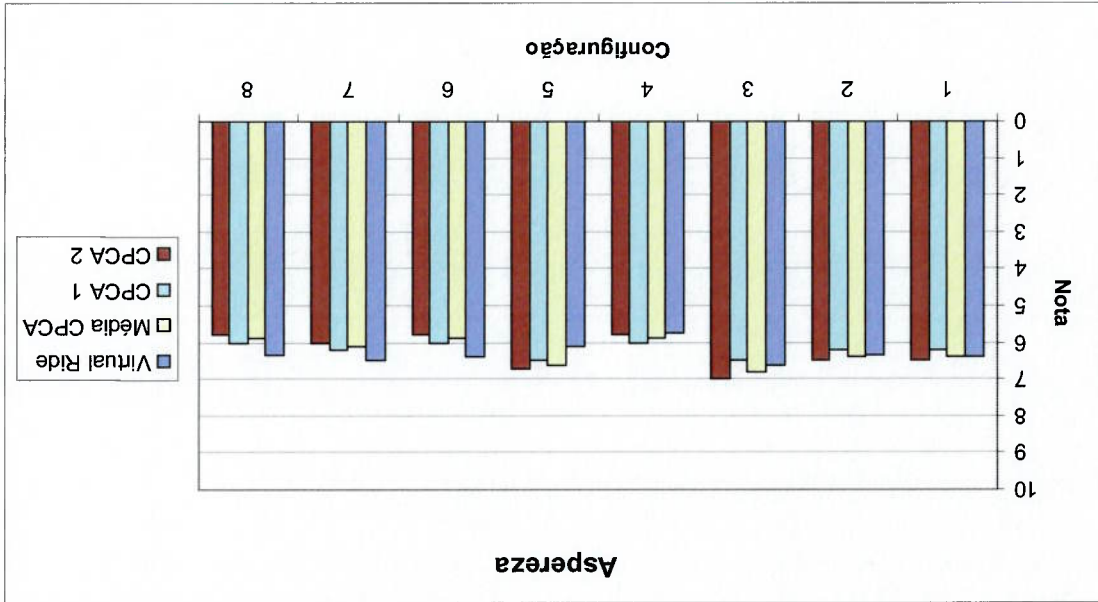


Figura 4.6 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Aspreza



Figura 4.8 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Entrada de Bateite

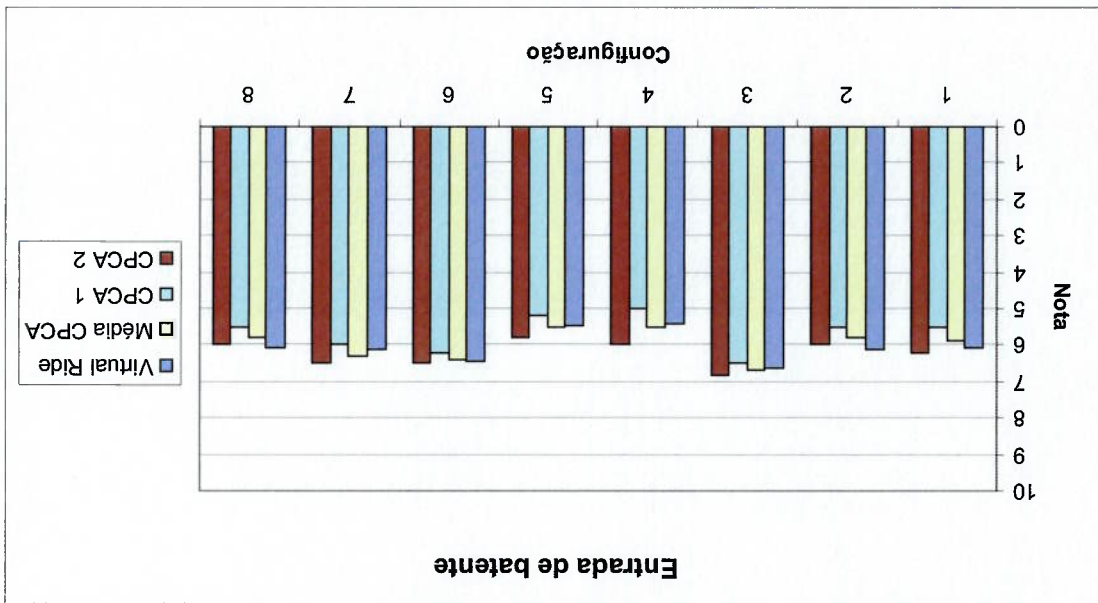
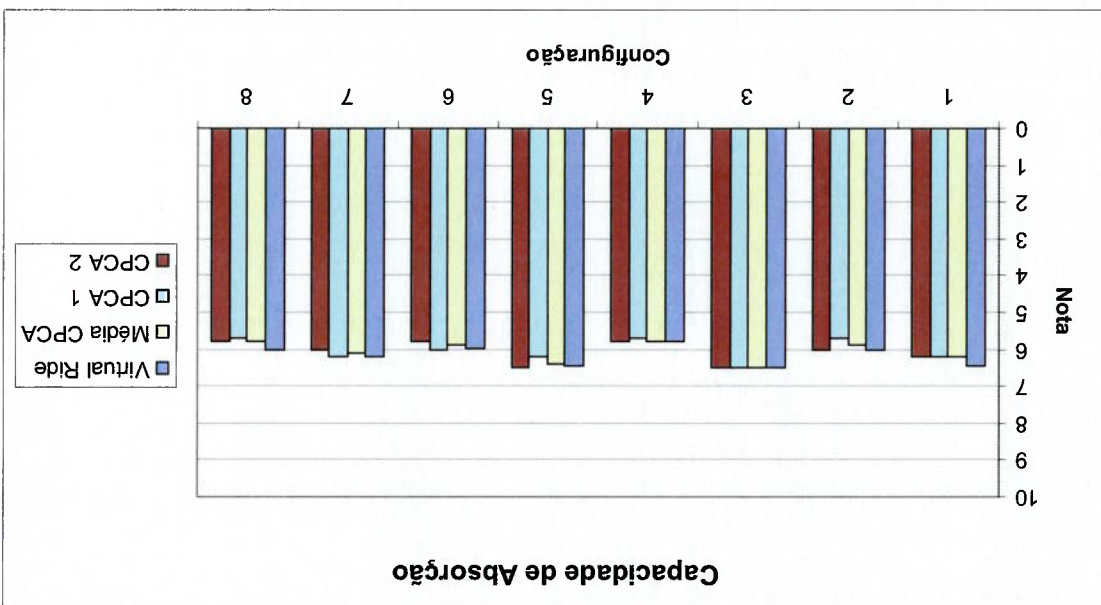
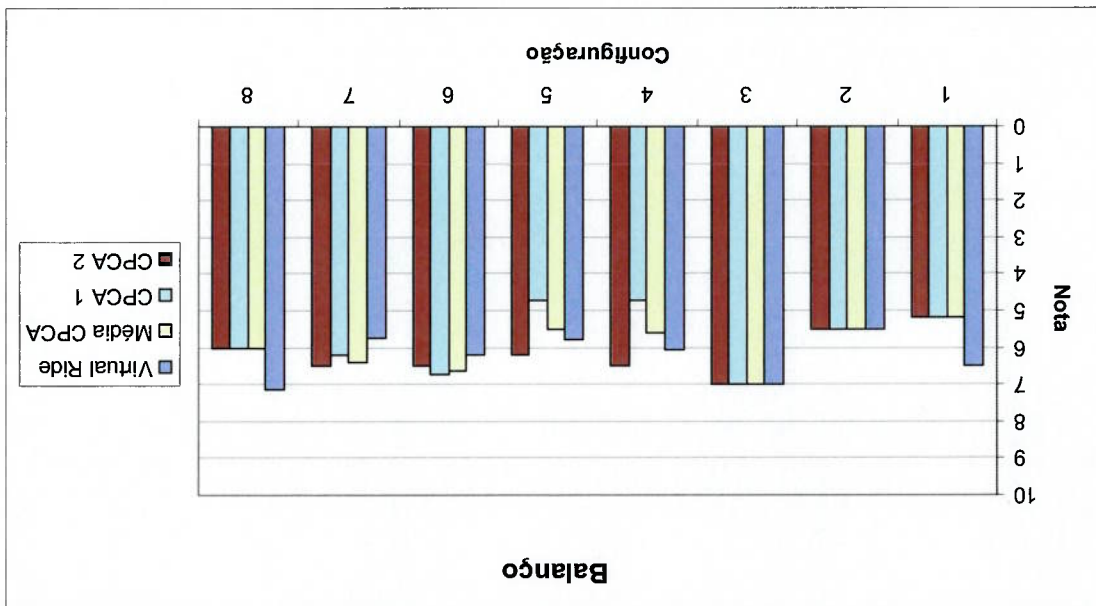


Figura 4.7 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Capacidade de Absorção



O último passo a ser tomado em termos de simulação é encontrar o balanço ideal de cada uma das características observadas para se gerar uma nota geral de avaliação de conforto para o veículo. Percebeu-se durante o desenvolvimento do trabalho que, para diferentes categorias de veículo, diferentes balanços deveriam ser utilizados (a entrada de batente num veículo esporte utilitário é mais aceitável para o usuário quando comparada à mesma entrada de batente num seda de luxo). Desta forma, desenvolvem-se máscaras específicas para cada categoria de veículo para se obter uma avaliação geral de conforto pela simulação (este valor é o que será otimizado posteriormente com as ferramentas de otimização). Esta mesma avaliação global é feita subjetivamente pelos avaliadores no campo de provas, baseando-se no comportamento do veículo nas diversas condições de avaliação, não sendo portanto uma função direta das avaliações para cada parâmetro de conforto feitas individualmente. De toda forma, percebe-se que é possível a determinação de matrizes de balanço que conduzam a resultados bastante satisfatórios em termos de correlação entre a simulação e as avaliações no campo de provas. A figura 4.10 mostra os resultados obtidos para o caso do veículo esporte utilitário estudado.

Figura 4.9 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Balanço



- As avaliações por simulação que atingirem diferenças iguais ou inferiores a 0,3 com os resultados subjetivos são consideradas iguais para efeito de análise dos

foram retiradas e serão utilizadas no desenvolvimento dos métodos de otimização: A tabela 4.1 mostra os resultados de um estudo simples de variância nos resultados dos avaliadores, onde se conclui que existe um desvio padrão médio para as avaliações em torno de 0,25 (razoavelmente pequeno, considerando-se que as notas têm variação possível de 0 até 10). Baseando-se nestes resultados, duas conclusões foram retiradas e serão utilizadas no desenvolvimento dos métodos de otimização:

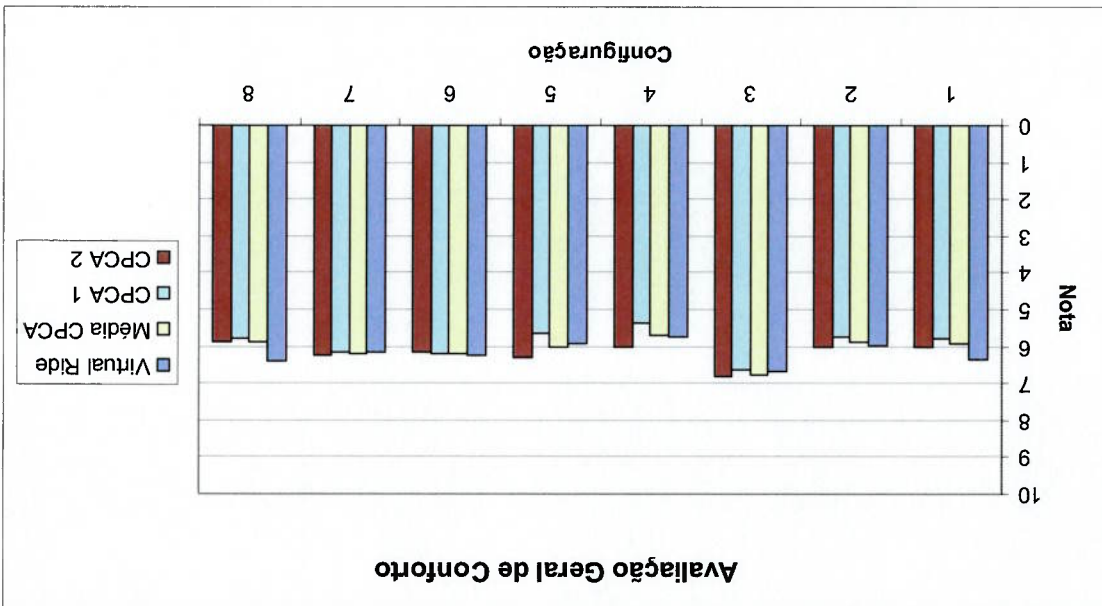
Como se pode observar claramente nos resultados mostrados nas figuras 4.6 até 4.10, existem variações nas avaliações subjetivas que devem ser levadas em consideração para a calibração das matrizes de peso utilizadas na simulação e para efeito de comparação dos resultados.

## Resultados

### 4.2. Variação Nas Avaliações Subjetivas e Precisão dos

Resultados Avaliados em Campo de Provas

Figura 4.10 – Correlação Geral de Conforto Entre os Resultados do Virtual Ride e os



- Duas configurações distintas (diferentes componentes de suspensão por exemplo) utilizadas na interpretação dos resultados).  
 resultados (equivalência esta que não existe no algoritmo de otimização, porém é considerada idênticas em termos de performance em conforto. que apresentem diferença menor ou igual a 0,3 na avaliação geral de conforto são

Tabela 4.1 – Variação Observada nas Avaliações Subjetivas

Config.	Asperza		Capacidade de Absorção		Entrada de Balente		Balanço		Conforto Global		
	Av.1	Av.2	Av.1	Av.2	Av.1	Av.2	Av.1	Av.2	Av.1	Av.2	
1	6,2	6,5	6,2	5,5	5,9	5,2	5,2	5,8	6,1	5,9	0,2
2	6,2	6,5	6,0	5,5	5,8	5,5	5,5	5,5	5,7	5,9	0,3
3	6,5	7,0	6,8	6,5	6,7	7,0	7,0	6,6	6,9	6,8	0,2
4	6,0	5,8	5,9	5,0	5,5	4,7	6,5	5,4	6,1	5,7	0,5
5	6,5	6,7	6,6	5,2	5,6	4,7	6,2	5,7	6,4	6,0	0,5
6	6,0	5,8	5,9	6,2	6,4	6,7	6,5	6,2	6,2	6,2	0,0
7	6,2	6,0	6,1	6,0	6,3	6,2	6,5	6,3	6,3	6,2	0,1
8	6,0	5,8	5,8	5,5	5,8	6,0	6,0	6,0	6,0	5,9	0,1
Geral	0,19		0,11		0,39		0,34		0,25		

As figuras 4.11 a 4.15 mostram um vista ampliada dos mesmos gráficos de correlação mostrados nas figuras 4.6 a 4.10, comparando-se os resultados do Virtual Ride com a média do campo de provas, com uma barra vertical mostrando esta precisão de 0,3 nos resultados.

Figura 4.12 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Capacidade de Absorção

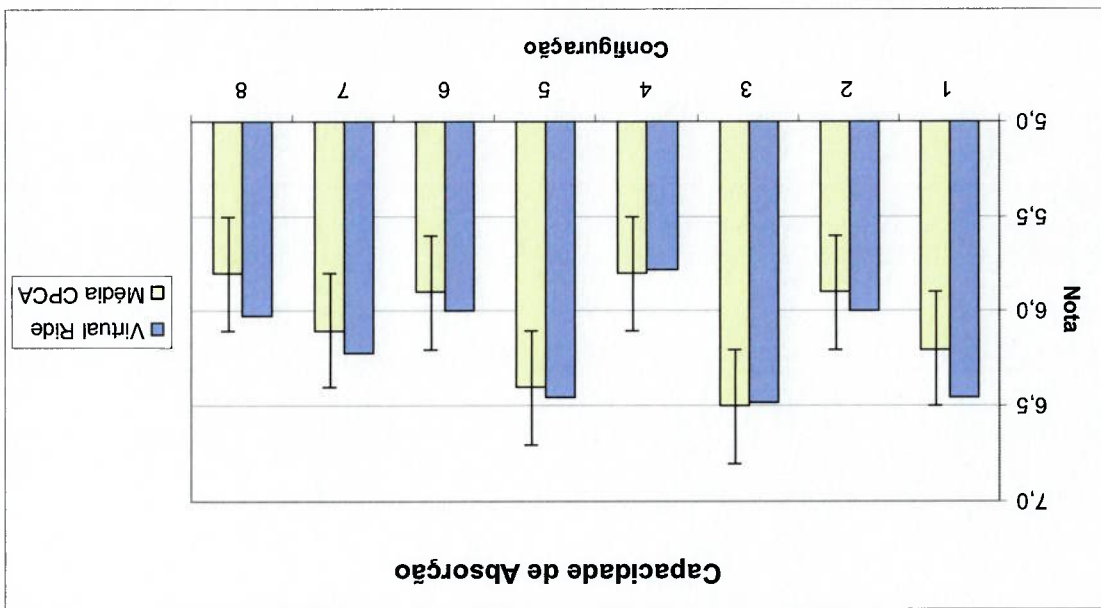
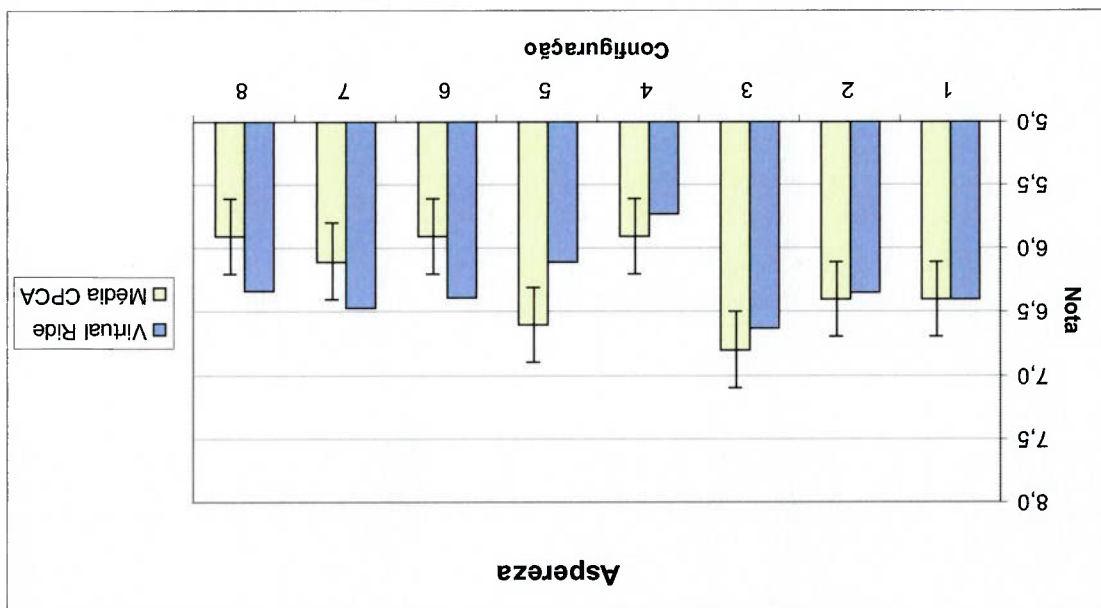


Figura 4.11 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Aspereza



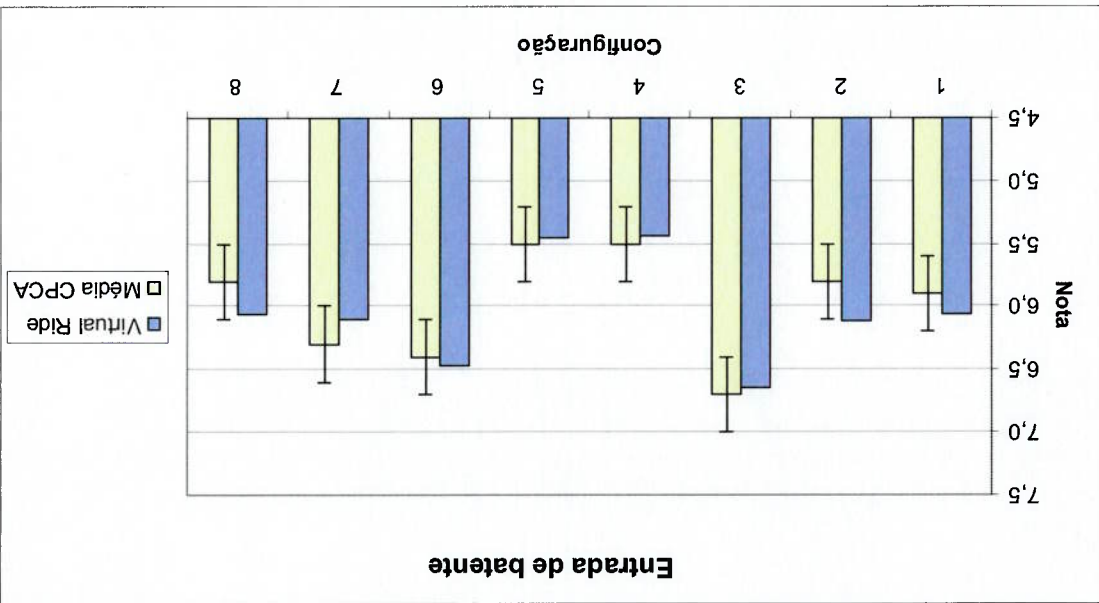


Figura 4.13 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Entrada de Batente

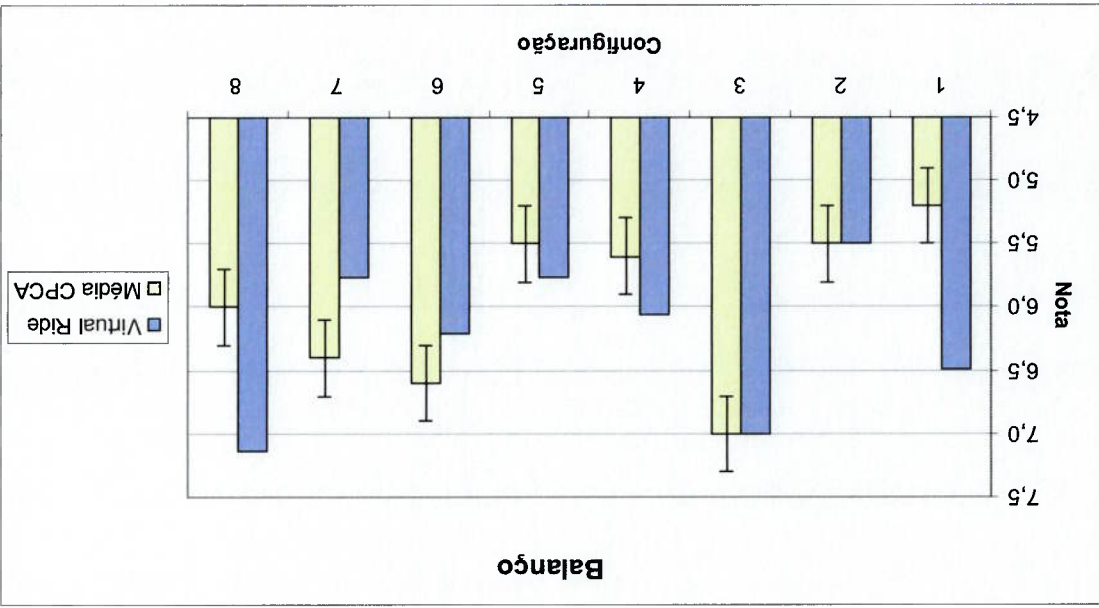
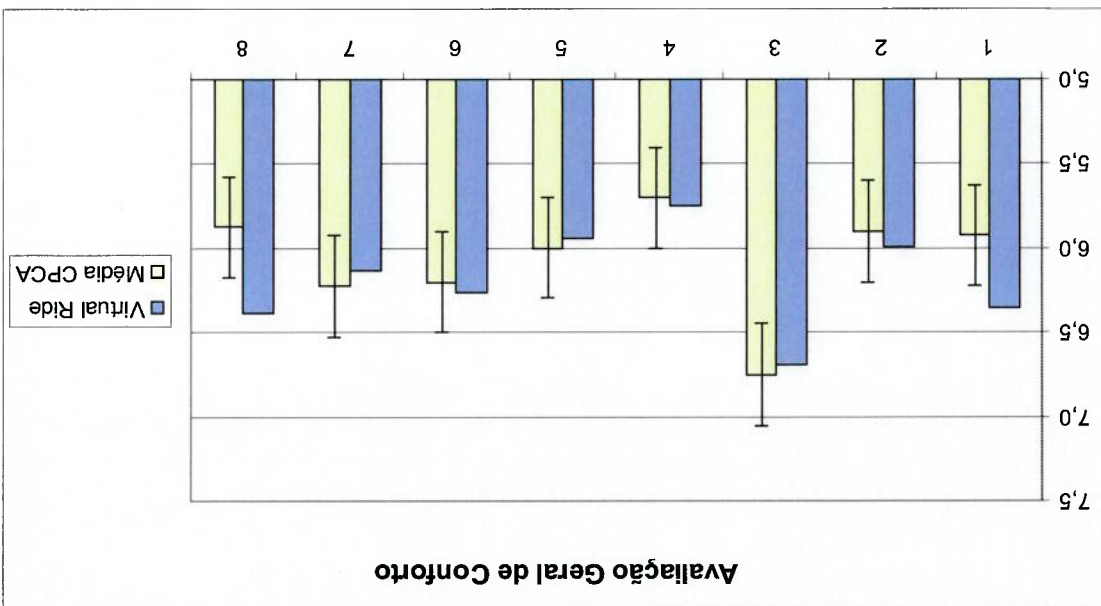


Figura 4.14 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Balango

Figura 4.15 – Correlação Geral de Conforto Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas



## Capítulo 5 - Método Simplex

### Descendente (*Downhill Simplex Method*)

Este método, assim como a maioria dos outros utilizados para otimização de funções, a realiza através de uma minimização de uma função adequada, derivada da função que se deseja otimizar. Ele possui como vantagem básica para a aplicação proposta o fato de que se utiliza apenas da avaliação da função a ser otimizada e não das suas derivadas, o que não seria viável através do método utilizado para o cálculo das avaliações de conforto.

Pelo próprio fato de não se utilizar de derivadas durante o processo de convergência para a solução ótima, este método não é muito eficiente com relação ao número de avaliações da função requeridas durante o processo quando comparado aos métodos que se utilizam do gradiente da função – de toda forma, como frisado anteriormente, não existe um método para se analisar as derivadas das funções de avaliação de conforto, tendo-se em vista que não existe uma descrição explícita (algebraica) das mesmas.

O método simplex descendente pode ser melhor visualizado ao aplicar-se uma analogia geométrica ao mesmo. Um simplex consiste basicamente de uma figura geométrica de  $N+1$  vértices num espaço geométrico de  $N$  dimensões. Desta forma o simplex é um triângulo num espaço de bidimensional e um tetraedro (não necessariamente regular) num espaço tridimensional. O método simplex de programação linear também se utiliza do conceito geométrico do simplex, embora não exista nenhuma relação entre este e o método aqui descrito além desta.

Trabalha-se aqui com simplexes não-degenerativos, ou seja, que englobem um volume finito num espaço com  $N$  componentes. Desta forma, ao se escolher qualquer ponto de um simplex não-degenerativo como sendo a origem, os outros  $N$  pontos



podem ser descritos como vetores que percorrem o espaço vetorial de  $N$  componentes.

Em uma minimização (ou otimização) unidimensional é sempre possível isolar um mínimo, garantindo o sucesso de um isolamento subsequente. No espaço multidimensional não existe porém nenhuma metodologia analoga e o melhor que se pode realizar é inserir uma estimativa inicial de solução ótima para o algoritmo, na forma de um vetor contendo  $N$  componentes de variáveis. A partir desta estimativa inicial o algoritmo deve então seguir seu próprio caminho descendente pela topografia inimaginavelmente complexa de um espaço de  $N$  componentes até que encontre um mínimo (ponto ótimo) para a função, mesmo que este seja apenas local.

Como mencionado anteriormente, o método simplex descendente precisa ser inicializado não apenas com um ponto, mas com  $N+1$  pontos, definindo-se um simplex inicial. Ao se determinar um destes pontos como sendo o ponto inicial  $P_0$ , então os  $N$  demais pontos podem ser descritos como:

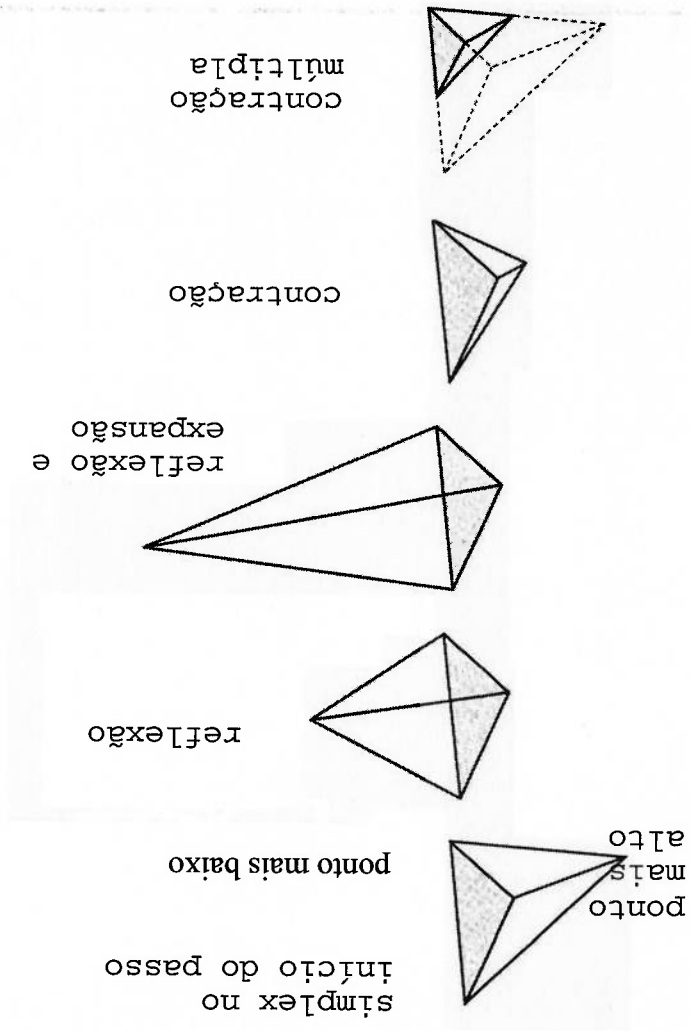
$$P_i = P_0 + \lambda_i \cdot e_i \quad (5.1)$$

onde os  $e_i$ 's são  $N$  vetores unitários e  $\lambda_i$  é uma constante relativa à estimativa da escala característica do problema, podendo também ser utilizados diferentes  $\lambda_i$ 's para cada direção do vetor.

O método simplex descendente realiza então uma série de iterações, a maioria sendo "passos" que simplesmente movem o ponto do simplex onde a função é máxima (pior avaliação) através da face oposta do simplex para um ponto inferior (melhor avaliação). Esses passos são denominados reflexões e são construídos de maneira tal que se conserve o volume do simplex, mantendo assim sua não-degeneratividade. Quando possível, o método expande o simplex em uma ou outra direção de forma a realizar passos maiores. Assim que ele atinge a parte inferior de um vale, o método se contrai na direção transversal e tenta comprimir-se em direção ao fundo do vale. Se existe uma situação na qual o simplex tenta passar por uma região muito estreita dentro do espaço (das variáveis de otimização), ele se contrai em todas as direções,

O critério de parada pode ser uma rotina delicada numa otimização multidimensional. Com mais de uma variável independente, não existe aqui a opção de se definir uma tolerância para uma única variável independente. Tipicamente pode-se identificar um ciclo (ou passo) do algoritmo multidimensional, sendo então possível determinar a parada do algoritmo quando o vetor de distância movido em um determinado passo for menor em magnitude que uma tolerância  $tol$ . Outra maneira seria determinar que a variação na função em um dado passo seja menor que um determinado valor  $ftol$ .

Figura 5.1 – Movimentos possíveis para um simplex (PRESS, 1992)



forçando-se a atingir o menor ponto (melhor resultado). Os movimentos básicos que podem ser realizados pelo simplex estão sumarizados na figura 5.1:

Deve-se lembrar que qualquer dos critérios acima descritos pode falhar no caso de um único passo anômalo que por alguma razão não chega em lugar algum. Por este motivo, torna-se interessante reiniciar o algoritmo do ponto em que ele parou indicando um mínimo – no caso do método simplex descendente, deve-se reinicializar  $N$  dos  $N+1$  vértices do simplex novamente através da equação (5.1), com  $P_0$  sendo um dos vértices do ponto mínimo detectado. Essas reinicializações não devem ser necessariamente custosas do ponto de vista de utilização de máquina, tendo-se em vista que o algoritmo já havia indicado que um ponto de mínimo existia exatamente onde você está reiniciando a rotina.

## 5.1. Exemplo de Aplicação

O exemplo a seguir tem o intuito de exemplificar a aplicação da metodologia do simplex descendente em um problema bidimensional simples, onde fiquem mais facilmente visíveis a convergência e robustez desta técnica.

Como exemplo, será utilizada uma função bidimensional  $f(x,y)$ :

$$f(x,y) = \text{sen}(x) + \text{sen}(y) + \left(\frac{x}{5}\right)^2 + \left(\frac{y}{5}\right)^2 \quad (5.2)$$

A esta função  $f(x,y)$ , determina-se  $(x,y)$  limitados entre  $[-10, +10]$  cada um. Esta limitação (ou *bracketing* como o termo é conhecido em inglês) deriva do fato de que em uma aplicação real, quase sempre o espaço onde os parâmetros de otimização podem ser trabalhados é limitado por motivos técnicos e/ou econômicos. A técnica aqui utilizada para limitar estes parâmetros leva em conta duas hipóteses:

- Os limites para cada parâmetro de otimização (variáveis da função, através das quais se deseja minimizar a mesma) são conhecidos e determinados;

- Existe um mínimo de conhecimento sobre o comportamento da função no intervalo de interesse, para se poder determinar um valor que certamente não será ótimo (i.e., é possível de antemão se determinar algum valor que não seja mínimo da função no intervalo de interesse).

A primeira hipótese já havia sido cumprida, sendo que os dois parâmetros estão limitados no intervalo  $[-10, +10]$ . A segunda hipótese, que a princípio não parece tão óbvia, é na verdade bastante simples de se definir para a grande maioria dos problemas. No caso aqui mostrado pode-se certamente afirmar que 100 não é o valor ótimo da função no intervalo proposto: por inspeção simples percebe-se que para  $(x,y) = (0,0)$ , a função  $f(x,y)$  é igual a 0, desta forma, 100 não é o valor mínimo da função no intervalo de interesse. Uma outra maneira de se contornar este problema seria restringir o simplex dentro do espaço definido para os parâmetros de otimização (ao invés de penalizar a função, como explicado anteriormente), porém esta alternativa não foi aplicada neste trabalho pelo fato de que ela implica em mudanças mais profundas no algoritmo de otimização e principalmente pelo fato de que a técnica aqui empregada (de penalização da função) mostrou bons resultados.

Com estas duas hipóteses atingidas, redefina-se a função da seguinte forma:

$$f(x,y) = \begin{cases} \text{sen}(x) + \text{sen}(y) + \left(\frac{x}{5}\right)^2 + \left(\frac{y}{5}\right)^2, & \text{quando } x \in [-10,10] \text{ e } y \in [-10,10] \\ 100, & \text{quando } x \notin [-10,10] \text{ ou } y \notin [-10,10] \end{cases} \quad (5.3)$$

Desta maneira, impede-se que a rotina de otimização caia fora do intervalo de interesse para os parâmetros de otimização. No caso da otimização das notas de conforto, o que se deseja é a minimização do inverso da nota (i.e., a maximização da nota obtida), assim sendo, basta considerar uma nota muito baixa para consolidar a Segunda hipótese aqui apresentada (0,1 por exemplo, já que a função nota de conforto varia de 0 até 10).

A função mostrada possui uma grande quantidade de mínimos locais no intervalo de interesse, como mostra a figura 5.2. Por verificação, observa-se que o mínimo global da função neste intervalo é atingido com o par de variáveis  $(x,y) = (-1.45, -1.45)$  – a figura 5.3 mostra uma ampliação local da função em torno do mínimo.

$$\text{Função Exemplo: } f(x,y) = \sin(x) + \sin(y) + (x/5)^2 + (y/5)^2$$

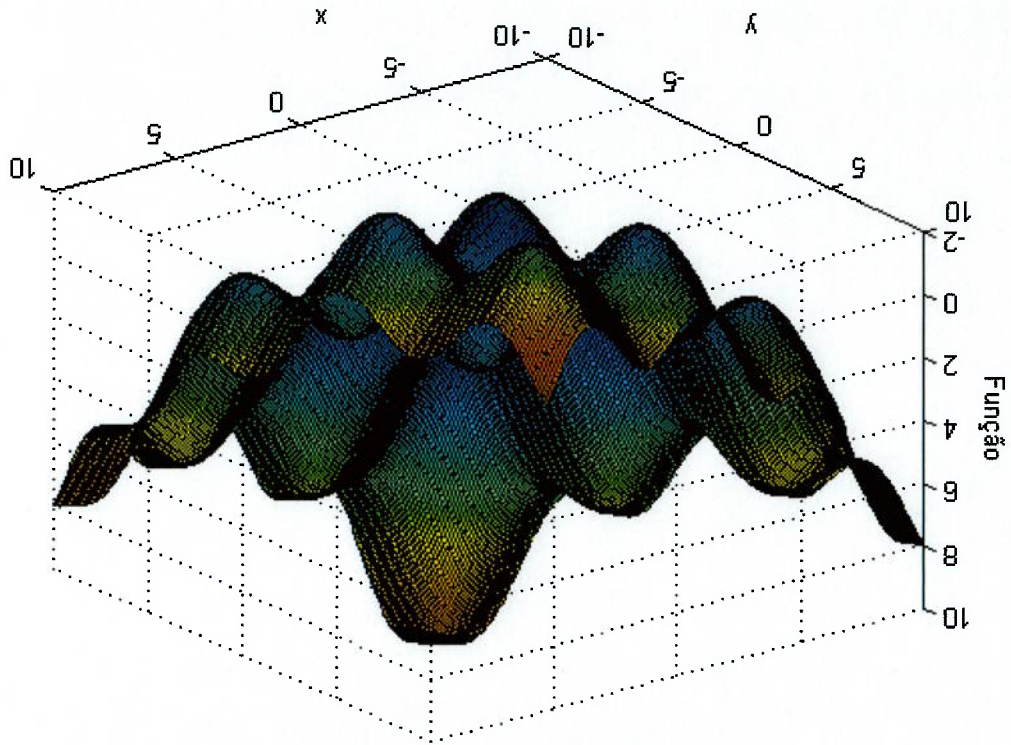
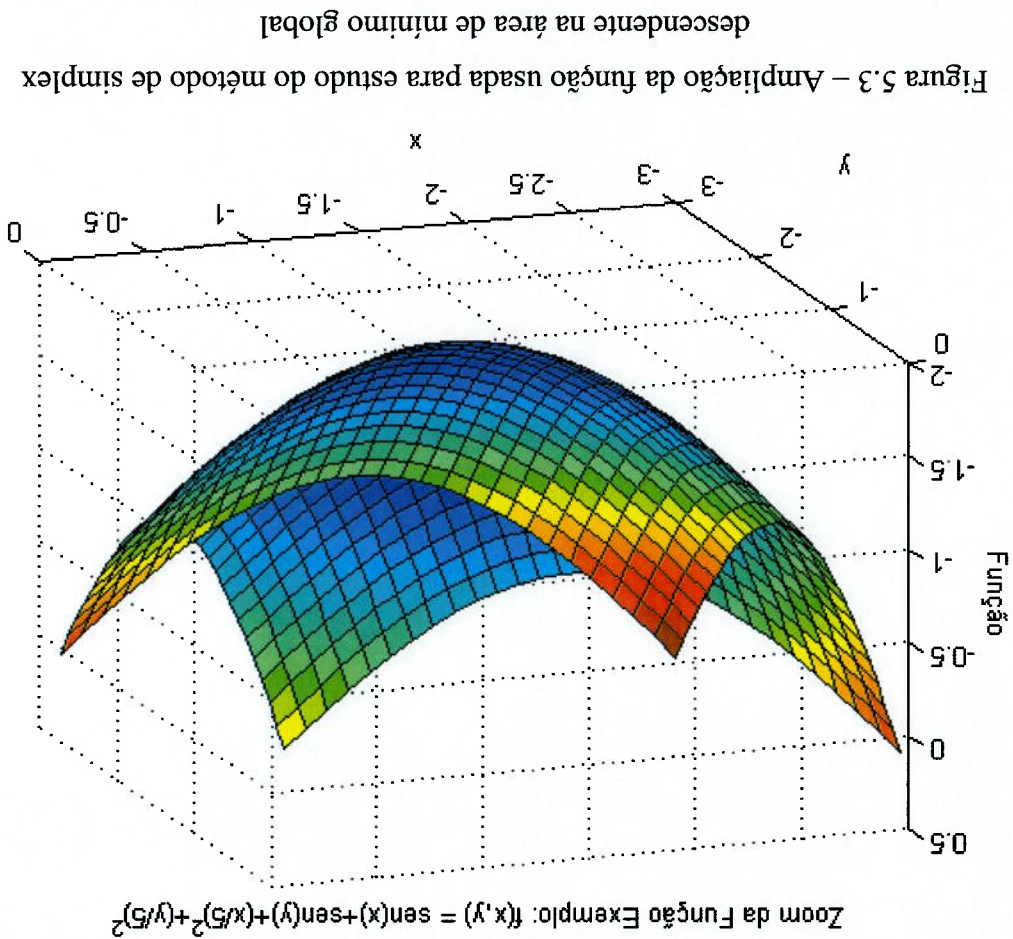


Figura 5.2 – Função usada para estudo do método de simplex descendente

Definindo-se a tolerância  $tol = 0,001$ , o método do simplex converge convergente de acordo com as figuras 5.4 e 5.5. Percebe-se que logo na segunda iteração, o método tenta sair fora da limitação imposta às variáveis de otimização, porém a manipulação feita na função (equação 5.3) faz com que a rotina encontre os valores mínimos dentro dos limites especificados (neste exemplo simples aqui mostrado, nem seria necessária a aplicação desta limitação para garantir a convergência do método, já que a função é crescente e praticamente quadrática fora do intervalo em questão).



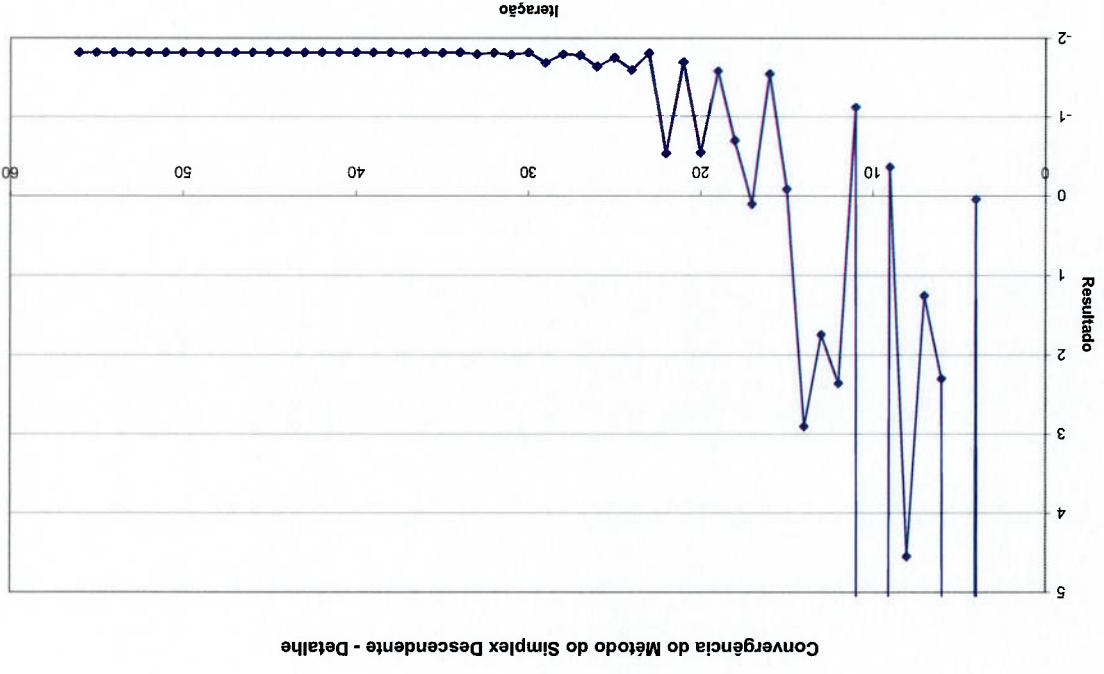


Figura 5.5 – Detalhe do Gráfico de Convergência do Método do Simplex Descendente para o Exemplo Criado

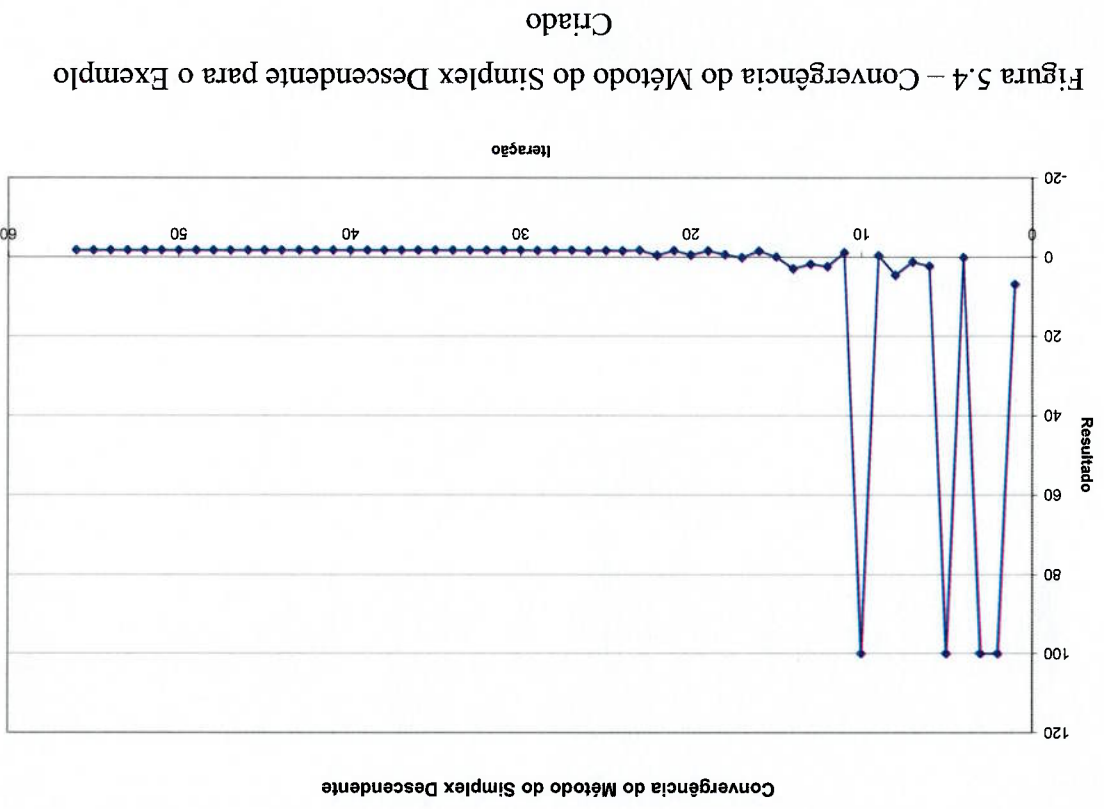


Figura 5.4 – Convergência do Método do Simplex Descendente para o Exemplo Criado

Importante também é notar que os saltos que vão contra a convergência da função (inclinação positiva nas curvas mostradas nas figuras 5.4 e 5.5) são exatamente os pontos nos quais o algoritmo se deparou com um mínimo local (a figura 5.2 deixa claro que o exemplo é cheio de mínimos locais) e que, utilizando as propriedades de expansão do simplex, conseguiu localizar uma saída deste mínimo local.

Finalmente, é evidente que o método, apesar de não ser apontado pela literatura : como sendo o mais eficiente em termos de convergência, consegue chegar numa tolerância de 0,001 em menos de 60 iterações. Como o custo computacional do problema de conforto não é o maior gargalo do processo, esta taxa de convergência é bastante aceitável.

A rotina da técnica do simplex descendente na linguagem de programação **Delphi®** (já para a aplicação no problema de conforto) é mostrada no Apêndice A.



## Capítulo 6 - Método da Engenharia Robusta (Método de Taguchi)

Este método, inicialmente desenvolvido pelo Prof. Genichi Taguchi para melhoria de qualidade em sistemas de manufatura, pode ser adaptado para a otimização aqui proposta.

Basicamente, ele aborda o problema de otimização através do conceito de robustez do resultado, i.e. a configuração ótima deve continuar sendo adequada sob uma gama de fatores externos não controláveis (ruídos agindo sobre o sistema). Para atingir este objetivo, o método propõe a avaliação do sistema não apenas pelo resultado da função que se deseja otimizar, mas pela relação sinal/ruído (S/R) obtida para cada configuração. Desta forma, definem-se além dos parâmetros de controle (variáveis as quais se deseja otimizar), os parâmetros de ruído (em geral, variáveis sobre as quais não se tem controle). Com os parâmetros de ruído definidos, estuda-se o comportamento de uma determinada configuração sob as diversas condições de ruído e a avaliação para a determinação da configuração ótima é feita com base na relação S/R geral de cada configuração.

Outro ponto relevante em relação ao método da engenharia robusta é que ele trata o problema de otimização de uma forma discreta, i.e., os parâmetros de otimização são definidos em níveis discretos. Por exemplo, se um dos parâmetros for a rigidez de uma mola e deseja-se estudar o comportamento de molas variando de 20 N/mm a 24 N/mm, devem ser definidos valores discretos dentro desta faixa, como  $A = 20$  N/mm,  $B = 22$  N/mm e  $C = 24$  N/mm (considerando-se três níveis distintos para o estudo). A quantidade desses níveis, assim como o número de parâmetros a serem avaliados são definidos para cada problema específico, sendo que muitas vezes estes valores são determinados por restrições de ordem prática (como por exemplo a quantidade de componentes produzidos comercialmente dentro de uma determinada faixa de

especificação). Apesar deste aspecto inicialmente parecer uma desvantagem do método, pelo fato dele não trabalhar com valores intermediários entre aqueles definidos, deve-se considerar que na área automotiva é sempre desejável trabalhar-se com valores de componentes padronizados, tendo-se em vista considerações de custo e manufatura. Por este motivo, a discretização acaba se tornando mais um argumento a favor da utilização da técnica de engenharia robusta.

Um outro ponto que não pode passar despercebido (e na verdade é uma fonte de críticas para a utilização da técnica de engenharia robusta em problemas genéricos) é o fato de que todo o desenvolvimento da engenharia robusta se baseia no fato de que os parâmetros de otimização não são interdependentes entre si, i.e. a variação de um parâmetro de otimização não deve interferir com as características de outro parâmetro de otimização. Este fato acaba por impedir a aplicação da técnica de engenharia robusta para uma série de problemas: por exemplo, em um problema no qual se deseja ter como parâmetros de controle pressão e temperatura de um recipiente de volume constante, a técnica de engenharia robusta não é recomendada, pois estas variáveis são interdependentes (ao se variar a pressão, modifica-se a temperatura e vice-versa). Para a proposta deste trabalho porém, esta limitação não se aplica, já que os componentes de suspensão não são em geral interdependentes (por exemplo, modificar a rigidez de uma mola não afeta a viscosidade do amortecedor) – de toda forma é importante ter-se em mente tal limitação para não se aplicar erroneamente a técnica em casos específicos onde ela pode não ser a mais apropriada.

Para a utilização da engenharia robusta na otimização aqui proposta, devem se seguir os seguintes passos:

- Definição dos parâmetros de controle (variáveis a serem otimizadas) e do nível de discretização que se deseja de cada uma;
- Definição dos parâmetros de ruído e dos níveis nos quais estes podem atuar no sistema;

Finalmente, a definição de ruído mais abrangente e da qual se pode tirar o melhor proveito aqui é aquela dos fatores externos ao sistema que não são passíveis de controle. Um bom exemplo, o qual será trabalhado mais intensivamente neste trabalho, é o carregamento ao qual o veículo estará sujeito durante o seu uso. Teoricamente o usuário poderá utilizar seu veículo desde a condição de completamente vazio até o limite máximo de carregamento. Obviamente que cada avaliação objetiva de conforto só pode ser feita em uma condição de carregamento

Na utilização da engenharia robusta com experimentos físicos, em geral um dos ruídos definidos está relacionado aos erros de medição existentes no processo experimental. Pelo fato da abordagem aqui apresentada tratar o problema de conforto veicular através de simulação computacional, fica sem sentido esta definição de ruído. Outra possível definição de ruído seria a diferente avaliação subjetiva de uma mesma configuração quando avaliada por diferentes pessoas – novamente, esta definição não entra no mérito deste trabalho.

A definição do parâmetro de ruído agindo no sistema é fundamental na técnica de engenharia robusta e uma de suas melhores características, tendo-se em vista que leva a um sistema não só otimizado, como insensível (ou o menos sensível possível) a fatores que não podem ser controlados por projeto.

## 6.1. Definição do Parâmetro de Ruído

Após o primeiro passo de definição das variáveis de controle e seus respectivos níveis para o estudo, deve-se seguir os outros passos, descritos com mais detalhes nos tópicos a seguir.

- Definição da matriz de experimentos (matriz ortogonal) mais adequada para o problema em estudo;
- Análise dos resultados através da relação sinal/ruído adequada;
- Definição da configuração ótima e verificação dos resultados desta.

Uma matriz é definida tendo como base o número de parâmetros de controle, assim como o número de níveis para cada fator (discretização). Estas matrizes de experimentos não são fatoriais, já que os experimentos fatoriais aqui são aqueles que analisam os resultados de todas as combinações possíveis de parâmetros: caso o problema permitisse uma abordagem deste tipo, não seria necessário nenhum método

Uma matriz de experimentos consiste de um número determinado de experimentos (no caso deste trabalho, entenda-se experimento como sendo simulação) onde se variam os valores dos parâmetros que se deseja estudar de um experimento para outro. Após a execução dos experimentos definidos na matriz, os dados obtidos são utilizados para se avaliar a influência de cada parâmetro de otimização. A utilização de matrizes de experimento especiais, chamadas **matrizes ortogonais**, permite uma avaliação eficiente dos efeitos de cada parâmetro e é uma técnica importante na metodologia de engenharia robusta.

## 6.2. Matriz de Experimentos

Vale lembrar que os parâmetros de ruído, assim como os parâmetros de controle, são definidos discretamente na metodologia de engenharia robusta, o que não chega a prejudicar o desempenho do método, já que podem ser escolhidos os extremos possíveis de cada ruído específico para a análise.

Uma vez definidos os parâmetros de ruído, a matriz de experimentos conveniente levará os mesmos em consideração e as diversas configurações serão avaliadas em condições de ruídos distintas para a construção dos resultados em termos de sinal/ruído para cada configuração.

específica por vez. Desta forma é bastante conveniente definir-se o carregamento do veículo como um parâmetro externo de ruído sobre o qual não existe controle passível (ao menos dentro dos limites estabelecidos como máximos para o veículo em questão).

de otimização, bastando escolher a configuração com o melhor resultado. De toda forma, experimentos fatoriais são viáveis para um número muito limitado de problemas. Desta forma, o que a metodologia de engenharia robusta propõe é a utilização das matrizes ortogonais, nas quais as colunas são mutuamente ortogonais, como no exemplo abaixo, onde se consideram quatro parâmetros de otimização com três níveis cada um.

Tabela 6.1 – Matriz ortogonal para uma otimização de 4 parâmetros a 3 níveis cada

Experimento	Parâmetros de Otimização (níveis)			
	Mola	Amortecedor	Batente	Pneu
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

A ortogonalidade neste caso deve ser interpretada num sentido combinatório, i.e., para qualquer par de colunas, todas combinações de níveis de parâmetros ocorrem e estas ocorrem num igual número de vezes. Antes de se definir a ortogonalidade de uma matriz de experimentos, deve-se recorrer às definições de álgebra linear e estatística. Definindo-se  $\eta_1, \dots, \eta_9$  como sendo os resultados de cada experimento (linhas da matriz) e considerando a forma linear  $L_i$ , dada por:

$$L_i = w_{i1}\eta_1 + w_{i2}\eta_2 + \dots + w_{i9}\eta_9 \quad (6.1)$$

sendo esta a soma balanceada dos nove resultados (ou observações, como descrito na literatura). A forma linear  $L_i$  é chamada de **contraste** se os pesos tem soma nula, isto é:

$$w_{i1} + w_{i2} + \dots + w_{i9} = 0 \quad (6.2)$$

Dois contrastes  $L_1$  e  $L_2$  são ditos ortogonais se o produto interno dos vetores correspondente aos seus pesos é nulo, desta forma:

$$w_{11}w_{21} + w_{12}w_{22} + \dots + w_{19}w_{29} = 0 \quad (6.3)$$

Considerando-se três pesos  $w_{11}$ ,  $w_{12}$  e  $w_{13}$  correspondentes aos três níveis da primeira coluna da matriz de experimentos (mola), então pode-se dizer que a forma linear  $L_1$  é o contraste correspondente à coluna 1:

$$L_1 = w_{11}\eta_1 + w_{11}\eta_2 + w_{11}\eta_3 + w_{12}\eta_4 + w_{12}\eta_5 + w_{12}\eta_6 + w_{13}\eta_7 + w_{13}\eta_8 + w_{13}\eta_9 \quad (6.4)$$

desde que a soma de todos os pesos seja nula:

$$w_{11} + w_{12} + w_{13} = 0 \quad (6.5)$$

Perceba-se que a equação (6.4) usa o peso  $w_{11}$  onde quer que o nível seja 1,  $w_{12}$  para o nível 2 e  $w_{13}$  para o nível 3.

Um arranjo utilizado numa matriz de experimentos é dito ortogonal caso os contrastes correspondentes a todas as colunas sejam mutuamente ortogonais. Considerando-se as colunas 1 e 2 (mola e amortecedor) do exemplo dado, tem-se o contraste mostrado em (6.4) como sendo correspondente à coluna 1 e o contraste correspondente à coluna 2 fica:

$$L_2 = w_{21}\eta_1 + w_{22}\eta_2 + w_{23}\eta_3 + w_{21}\eta_4 + w_{22}\eta_5 + w_{23}\eta_6 + w_{21}\eta_7 + w_{22}\eta_8 + w_{23}\eta_9 \quad (6.6)$$

Novamente a soma destes pesos deve ser nula:

$$w_{21} + w_{22} + w_{23} = 0 \quad (6.7)$$

O produto interno dos vetores correspondentes aos pesos dos dois contrastes  $L_1$  e  $L_2$  é dado por:

$$\begin{aligned} & w_{11}w_{21} + w_{11}w_{22} + w_{11}w_{23} + w_{12}w_{21} + w_{12}w_{22} + w_{12}w_{23} \\ & + w_{13}w_{21} + w_{13}w_{22} + w_{13}w_{23} \\ & = (w_{11} + w_{12} + w_{13})(w_{21} + w_{22} + w_{23}) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (6.8)$$

Desta forma, as colunas 1 e 2 são mutuamente ortogonais. A ortogonalidade de todos os pares de colunas da tabela (6.1) pode ser testada de maneira similar.

Dentre os três pesos correspondentes à coluna 1, pode-se determinar 2 deles independentemente e o terceiro fica determinado pela equação (6.5). Desta forma, a

coluna 1 é dita como tendo 2 graus de liberdade. Em geral, um coluna com n níveis tem n-1 graus de liberdade.

### 6.3. Estimação do Efeito dos Parâmetros de Controle

Supondo um experimento onde se deseja otimizar um parâmetro cujo resultado tenha a característica de "quanto maior melhor", pode-se definir a seguinte formulação para avaliar o resultado de cada rodada da matriz de experimentos:

$$V_i = 10 \cdot \log[\eta_i] \quad (6.9)$$

onde  $\eta_i$  denota o resultado de cada experimento.

Pode-se definir também a média geral dos valores de V para o experimento:

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (6.10)$$

onde n aqui denota o número de experimentos da matriz.

O efeito da cada nível dos parâmetros de controle é definido então como sendo a variação que o mesmo causa em torno da média geral dos experimentos. Por exemplo, para se avaliar o efeito do nível 1 do amortecedor da matriz de experimentos mostrada na tabela 6.1, toma-se a média dos valores de V dos experimentos onde o amortecedor foi avaliado com o nível 1, assim tem-se:

$$V_{P2,1} = \frac{1}{3} (V_1 + V_4 + V_7) \quad (6.11)$$

com o índice (P2,1) referenciando o parâmetro de número 2 (amortecedor) no nível 1.

Finalmente o que se obtém é um gráfico representando a influência de cada nível de cada parâmetro em termos do parâmetro V (cuja unidade é dB), como o gráfico abaixo:

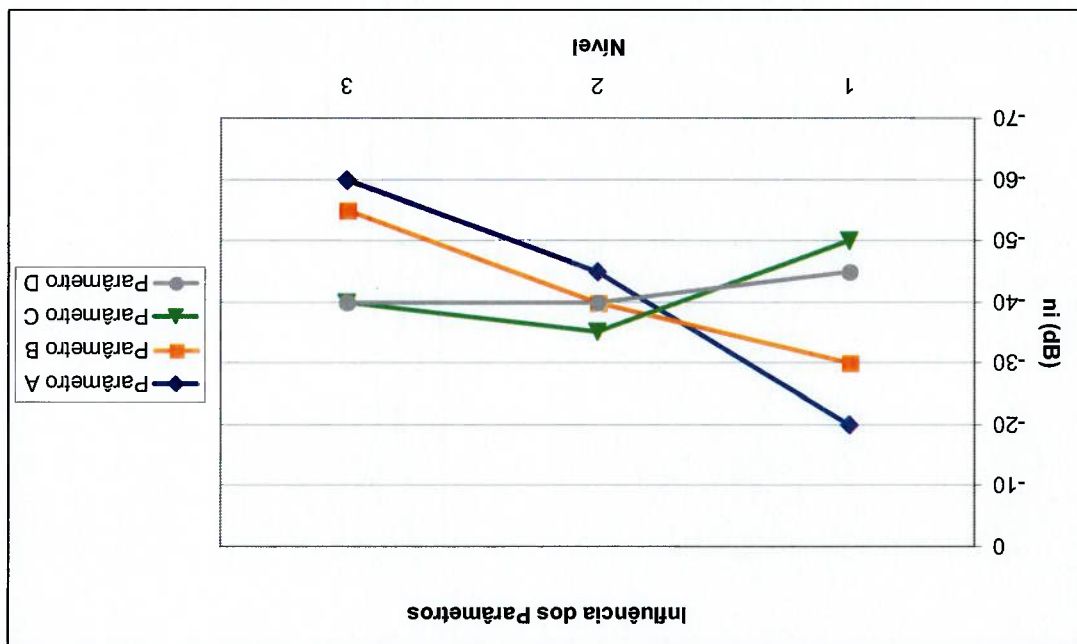
Para se levar em conta os parâmetros de ruído introduzidos no problema, basta introduzir os resultados das avaliações em cada nível de ruído na definição de  $V$ , e proceder a avaliação da mesma forma. Assim, caso queira se considerar dois níveis

## 6.4. Consideração dos Parâmetros de Ruído

Pela própria definição de  $V$ , o que se conclui é que o nível que apresenta o melhor resultado entre os considerados para cada parâmetro (i.e., o que mais otimiza o resultado) é aquele cujo valor em dB é o maior entre os estudados. A configuração ótima dos parâmetros de controle é então aquela cujos níveis de cada parâmetro individual são aqueles que maximizam o resultado de  $V$  em dB. Existem métodos para se estimar o valor de  $V$  para esta configuração ótima (PADKE, 1989), que são bastante úteis quando o método é empregado em problemas onde são realizados experimentos caros e/ou demorados. Como neste caso esta sendo empregada simulação computacional, torna-se mais prático avaliar o resultado desta configuração ótima diretamente através de uma outra avaliação por simulação.

Considerados para a Otimização

Figura 6.1 – Gráfico de Influência dos Diversos Parâmetros de Controle nos Níveis





distintos de um determinado ruído (duas condições distintas de carregamento por

exemplo), utiliza-se:

$$\left(\frac{S}{R}\right)^i = 10 \cdot \log[\eta_{i,1} + \eta_{i,2}] \quad (6.12)$$

onde o segundo índice de  $\eta$  denota o nível de ruído considerado na avaliação. A mesma fórmula é ainda utilizada no cálculo da S/R para um determinado nível de parâmetro de otimização, bastando colocar os resultados de todos os experimentos (em todos os níveis de ruído) onde o nível do parâmetro de interesse aparece dentro do logaritmo.

## 6.5. Exemplo de Aplicação

O exemplo a seguir tem o intuito de exemplificar a aplicação da metodologia de engenharia robusta em um problema relacionado à otimização de parâmetros visando a melhoria do conforto.

Considerando-se como parâmetros de controle a rigidez da mola, a curva de amortecimento do amortecedor e a pressão do pneu com dois níveis distintos para cada parâmetro na otimização, pode-se utilizar o arranjo ortogonal  $L_4(2^3)$ , onde 4 é o número de experimentos (simulações) a serem realizados, e  $2^3$  representa os 3 parâmetros com 2 níveis cada. Desta forma, obtêm-se:

Tabela 6.2 – Arranjo Ortogonal  $L_4(2^3)$

Pressão dos Pneus	Mola	Amortecedor	22 N/mm	20 N/mm	20% + solto	32 psi
			atual	28 psi		
	nível 1					
	nível 2					

Tomando-se como fator de ruído o carregamento no qual o comportamento do veículo será estudado (dois níveis distintos: somente com motorista – *vazio* e carregado com a capacidade total de carga – *carregado*), obtêm-se a seguinte matriz de experimentos:

Tabela 6.3 – Matriz de experimentos do  $L_4$  com 1 fator de ruído de 2 níveis distintos

Experimento	Parâmetros de Otimização (níveis)				Resultado Carregado
	Mola	Amortecedor	Pressão dos Pneus	Resultado Vazio	
1	22 N/mm	atual	28 psi		
2	22 N/mm	20% + solto	32 psi		
3	20 N/mm	atual	32 psi		
4	20 N/mm	20% + solto	28 psi		

A partir do estabelecimento da matriz de experimentos, procede-se então com a simulação de cada um dos experimentos e os resultados podem ser observados na tabela a seguir, onde os valores de S/R são calculados conforme a fórmula (6.12).

Tabela 6.4 – Resultados das simulações

Experimento	Parâmetros de Otimização (níveis)				Resultado Vazio	Resultado Carregado	Resultado Médio	S/R
	Mola	Amortecedor	Pressão dos Pneus	Resultado dos Pneus				
1	22 N/mm	atual	28 psi	6,69	5,66	6,18	10,92	
2	22 N/mm	20% + solto	32 psi	6,99	5,76	6,38	11,06	
3	20 N/mm	atual	32 psi	6,27	4,50	5,39	10,32	
4	20 N/mm	20% + solto	28 psi	6,59	4,73	5,66	10,54	

Utilizando-se ainda (6.12), pode-se calcular o S/R para cada nível dos parâmetros de controle, obtendo-se:

Tabela 6.5 – S/R dos parâmetros de controle

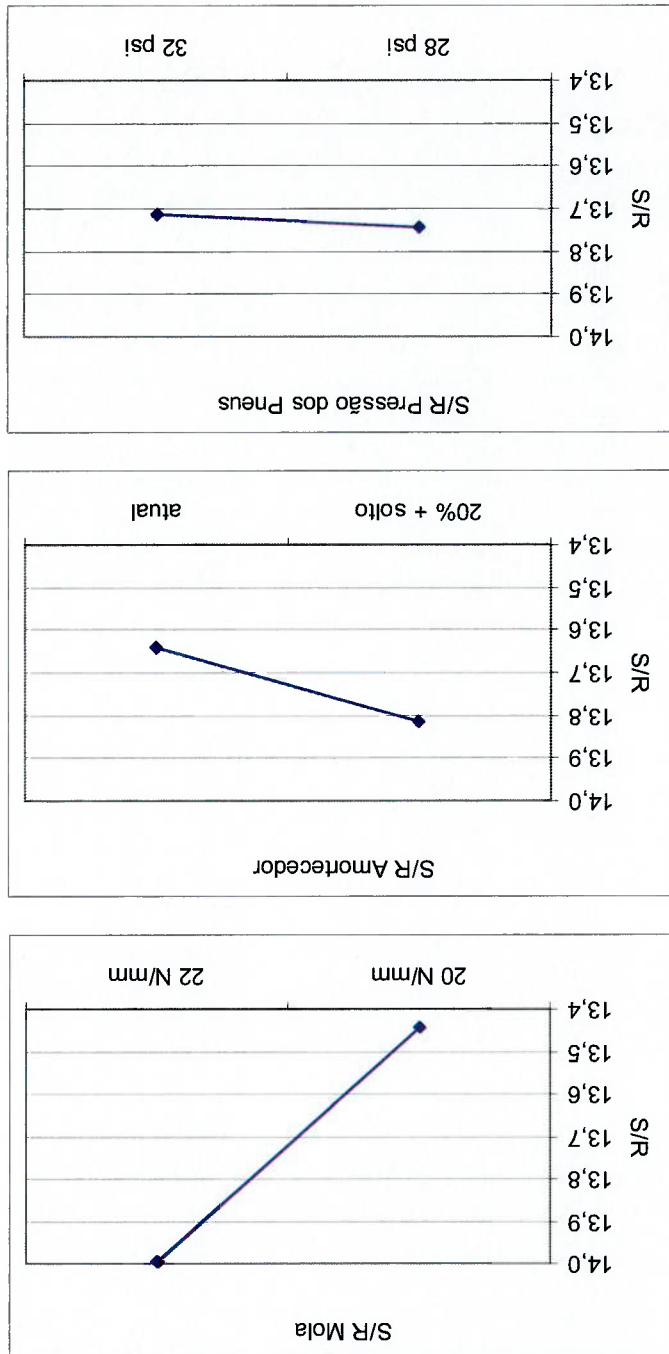
Parâmetros dos Pneus	Mola		Amortecedor	
	nível 1	nível 2	nível 1	nível 2
	14,00	13,44	13,64	13,81
	13,74	13,71		

Colocando-se os dados da tabela 6.5 num formato gráfico, fica mais fácil a visualização de quais são os melhores níveis para cada parâmetro (maior S/R) e qual a importância relativa de cada parâmetro (quanto maior a diferença entre a relação S/R de cada nível, mais influente é o parâmetro para a otimização), e a figura 6.2 ilustra este fato.

A última etapa do método é preparar uma rodada utilizando os níveis da cada parâmetro que apresentaram a melhor relação S/R e confirmar o resultado final

Percebe-se claramente através da visualização do gráfico que a importância relativa da pressão dos pneus é menor que a da mola e a do amortecedor neste caso.

Figura 6.2 – Representação Gráfica da Relação S/R dos Parâmetros de Controle



contra a matriz de resultados – em geral a configuração ótima tem uma relação S/R maior (portanto melhor) que qualquer uma das rodadas da matriz de experimentos.

Tabela 6.6 – Identificação do Resultado Ótimo

Experimento	Parâmetros de Otimização (níveis)			Resultado dos Pneus	Resultado Vazio	Resultado Carregado	Resultado Médio	S/R
	Mola	Amortecedor	Pressão dos Pneus					
1	22 N/mm	atual	28 psi	6,69	5,66	6,18	10,92	
2	22 N/mm	20% + solto	32 psi	6,99	5,76	6,38	11,06	
3	20 N/mm	atual	32 psi	6,27	4,50	5,39	10,32	
4	20 N/mm	20% + solto	28 psi	6,59	4,73	5,66	10,54	
<b>Ótimo</b>	<b>22 N/mm</b>	<b>20% + solto</b>	<b>28 psi</b>	<b>7,10</b>	<b>5,87</b>	<b>6,49</b>	<b>11,13</b>	

## Capítulo 7 - Modelo Estudado

O modelo utilizado para estudo representa um veículo de passageiros com suspensão dianteira do tipo *Mc Pherson* e suspensão traseira semi-independente com barra de torção (*twist beam*).

O modelo é analisado com relação ao conforto em duas condições distintas de carga, que são consideradas condições de ruído do sistema, tendo-se em vista que não é possível determinar-se a priori qual a condição de carga utilizada pelo usuário final. Assim, foi estudada uma condição mínima de carga, que equivale ao peso do carro vazio somado ao peso do motorista (75 kg foram considerados para o estudo) e uma condição de carregamento máximo do veículo. A tabela 7.1 mostra estes dados e mais alguns dados gerais do veículo estudado.

Tabela 7.1 – Dados Gerais do Veículo Modelado

745.0	Peso dianteiro na condição vazio + motorista (kg)
476.5	Peso traseiro na condição vazio + motorista (kg)
444.0	Momento de inércia no eixo longitudinal (X) na condição vazio + motorista (kg.m <sup>2</sup> )
1735.0	Momento de inércia no eixo lateral (Y) na condição vazio + motorista (kg.m <sup>2</sup> )
590.0	Altura do centro de gravidade em relação ao solo na condição vazio + motorista (mm)
845.0	Peso dianteiro na condição carregado (kg)
1000.0	Peso traseiro na condição carregado (kg)

A dinâmica da suspensão dianteira (tipo *McPherson*) é calculada como um sistema multicorpos através dos sistemas de ligação (cuja teoria foi apresentada no capítulo 3), e o modelo tem como base os pontos de articulação e aplicação de forças da

50.0	Rigidez vertical do coxim traseiro (N/mm)
180.0	Rigidez vertical do coxim esquerdo (N/mm)
180.0	Rigidez vertical do coxim direito (N/mm)
7.0	Inércia de rolagem do motor no eixo lateral (Y) do veículo ( $\text{kg.m}^2$ )
18.0	Inércia de rolagem do motor no eixo longitudinal (X) do veículo ( $\text{kg.m}^2$ )
200.0	Peso do motor (kg)

Tabela 7.2 – Dados do Conjunto Motor/Transmissão

O modelo considera a dinâmica vertical devida à excitação de pista do conjunto motor/transmissão montado sobre coxins na carroçaria do veículo. Os dados deste conjunto estão descritos na tabela 7.2.

75.0	Massa não suspensa traseira (kg)
90.0	Massa não-suspensa dianteira (kg)
1417.0	Bitola dianteira/traseira (mm)
2714.0	Entre-eixos (mm)
570.0	Altura do centro de gravidade em relação ao solo na condição carregado (mm)
2500.0	Inércia de rolagem no eixo lateral (Y) na condição carregado ( $\text{kg.m}^2$ )
600.0	Inércia de rolagem no eixo longitudinal (X) na condição carregado ( $\text{kg.m}^2$ )

suspensão, sendo que estes pontos de articulação e aplicação de forças são obtidos através dos desenhos de conjunto da suspensão. Modelam-se também os componentes dinâmicos atuantes (molas, amortecedores, batentes e barras estabilizadoras), baseando-se nas suas curvas não-lineares de força x deflexão (no caso de molas, batentes e barras) e força x velocidade (amortecedores). A figura 7.1 mostra como é o esquema geral de uma suspensão dianteira do tipo *Mc Pherson*.

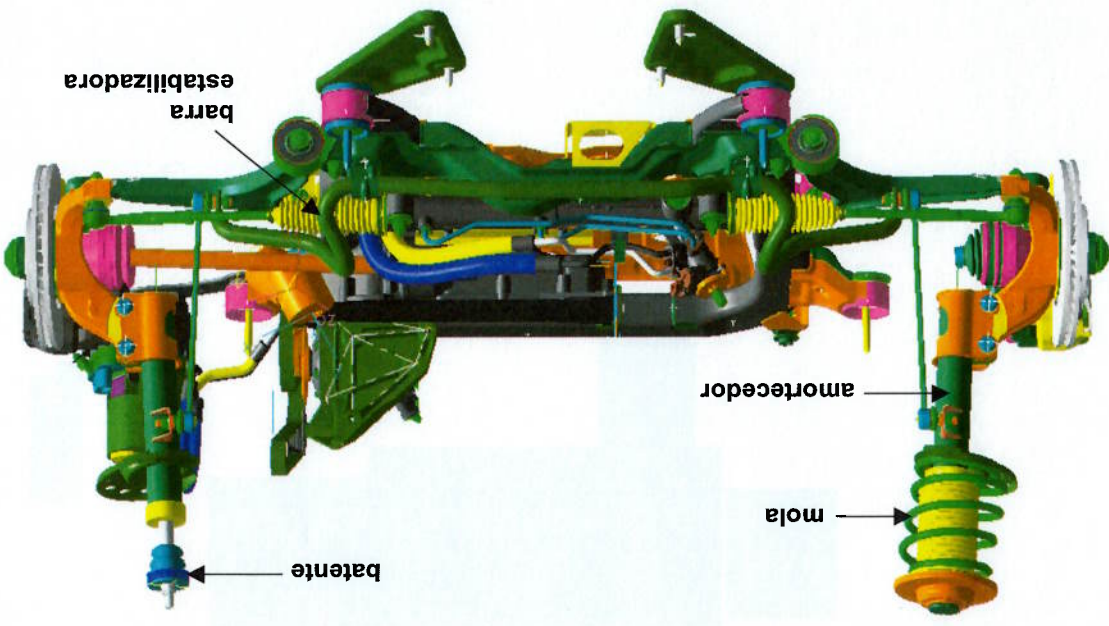


Figura 7.1 – Suspensão Dianteira do Tipo *Mc Pherson* com Componentes Dinâmicos Modelados

As figuras 7.2 até 7.5 mostram os pontos de articulação definidos para a suspensão dianteira.

Figura 7.3 – Braço de Controle da Suspensão Dianteira do Tipo *Mc Pherson* com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados



Figura 7.2 – Perna da Suspensão Dianteira do Tipo *Mc Pherson* com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados

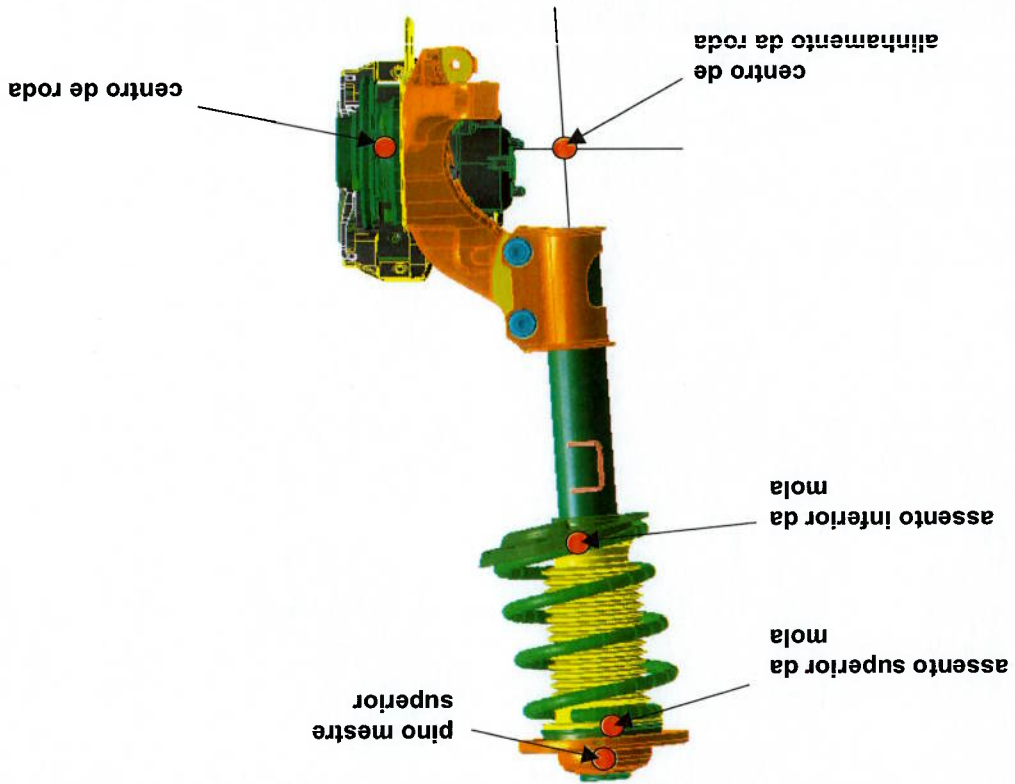




Figura 7.5 – Barra Estabilizadora da Suspensão Dianteira do Tipo *Mc Pherson* com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados

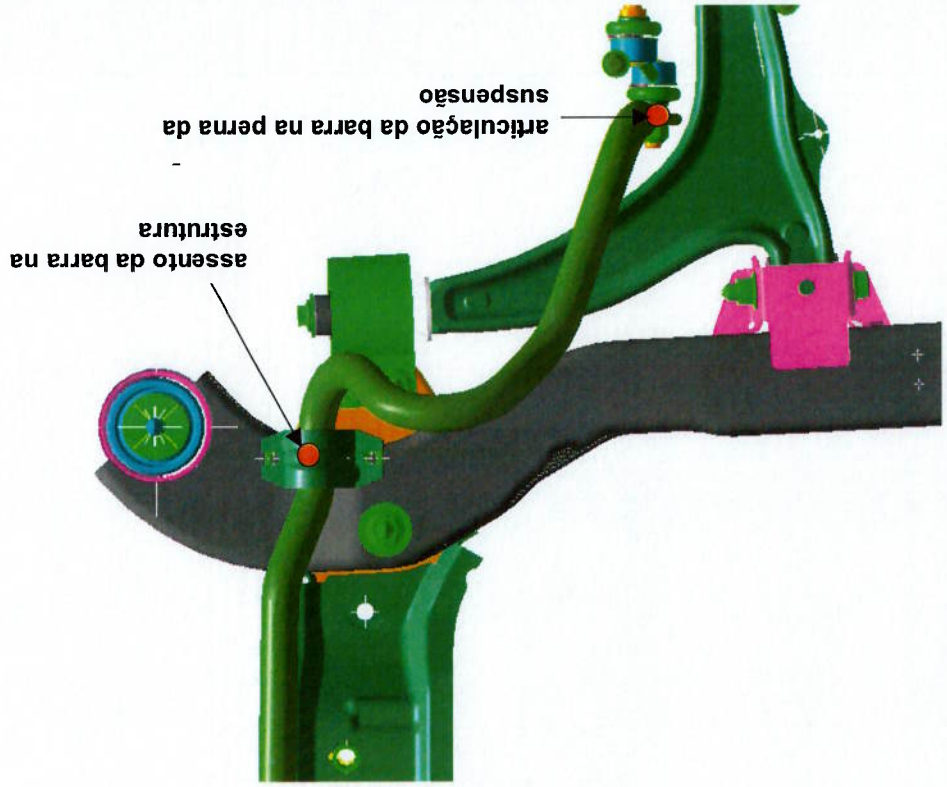
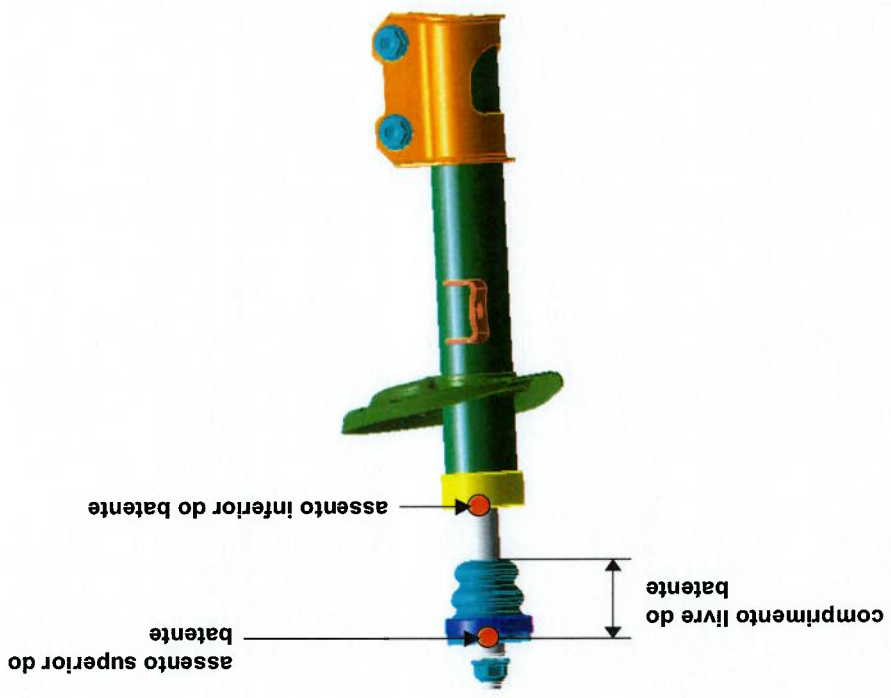


Figura 7.4 – Bateante da Suspensão Dianteira do Tipo *Mc Pherson* com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados



A tabela 7.3 mostra como são modelados os pontos mostrados nas figuras 7.2 até 7.5.

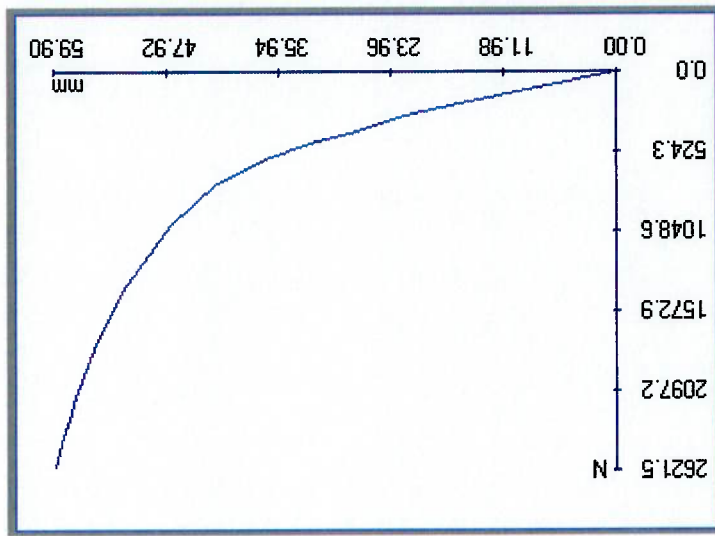
Tabela 7.3 – Modelagem dos Pontos Geométricos da Suspensão Dianteira do Tipo

*Mc Pherson*

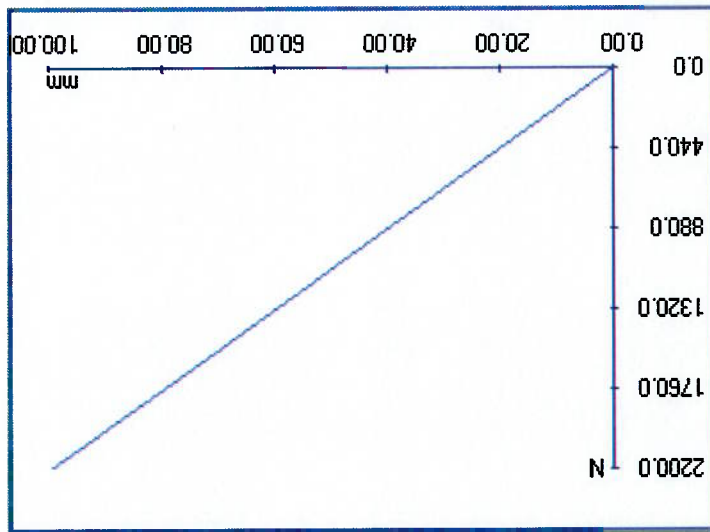
Pino Mestre Superior	Juntas Esféricas	Centro de Alinhamento da Roda (Pino Mestre Inferior Virtual)
Centro de Alinhamento da Roda (Pino Mestre Superior)		Articulação do Pino Esférico do Braço de Controle
Articulação da Bucha Dianteira do Braço de Controle		Articulação da Bucha Dianteira do Braço de Controle
Articulação da Bucha Traseira do Braço de Controle	Juntas Rotativas	Articulação da Bucha Estabilizadora na Perna da Suspensão
Articulação da Bucha Estabilizadora na Estrutura		Articulação da Bucha Estabilizadora na Estrutura
Centro de Roda		Centro de Roda
Assento Superior da Mola		Assento Superior da Mola
Assento Inferior da Mola	Pontos de Aplicação de Força	Assento Inferior da Mola
Pino Mestre Superior (força do amortecedor)		Pino Mestre Superior (força do amortecedor)
Centro de Alinhamento da Roda (Pino Mestre Inferior Virtual - força do amortecedor)		Centro de Alinhamento da Roda (Pino Mestre Inferior Virtual - força do amortecedor)
Assento Superior do Bateante		Assento Superior do Bateante
Assento Inferior do Bateante	Pontos de Aplicação de Força	Assento Inferior do Bateante

As figuras 7.6 até 7.8 mostram as curvas dos componentes base modelados para a suspensão dianteira. A barra estabilizadora é modelada com sua rigidez vertical linear igual a 30,89 N/mm.

Estudo  
 Figura 7.7 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) do Batente Dianteiro Base do

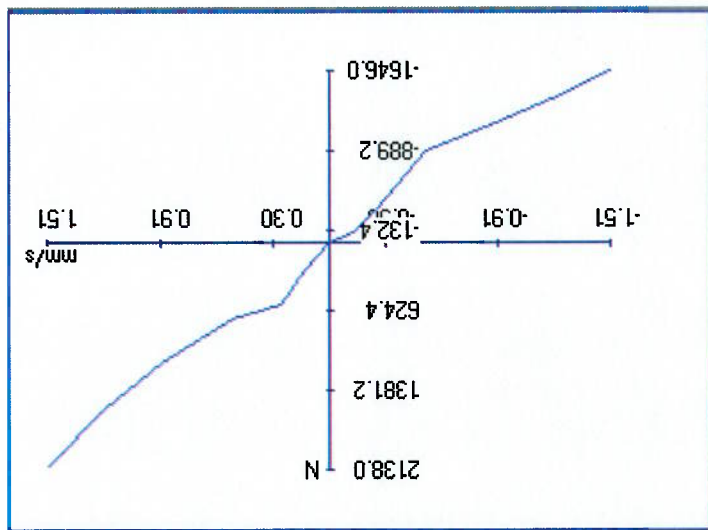


Estudo  
 Figura 7.6 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) da Mola Dianteira Base do



A dinâmica da suspensão traseira (tipo semi-independente com barra de torção – *twist beam*) é calculada da mesma forma que a dianteira. A figura 7.9 mostra como é o esquema geral de uma suspensão traseira do tipo semi-independente com barra de torção.

Figura 7.8 – Gráfico de Força (N) x Velocidade (m/s) do Amortecedor Dianteiro Base do Estudo



As figuras 7.10 e 7.11 mostram os pontos de articulação definidos para a suspensão dianteira.

Figura 7.9 – Suspensão Traseira do Tipo Semi-Independente com Barra de Torção com Componentes Dinâmicos Modelados

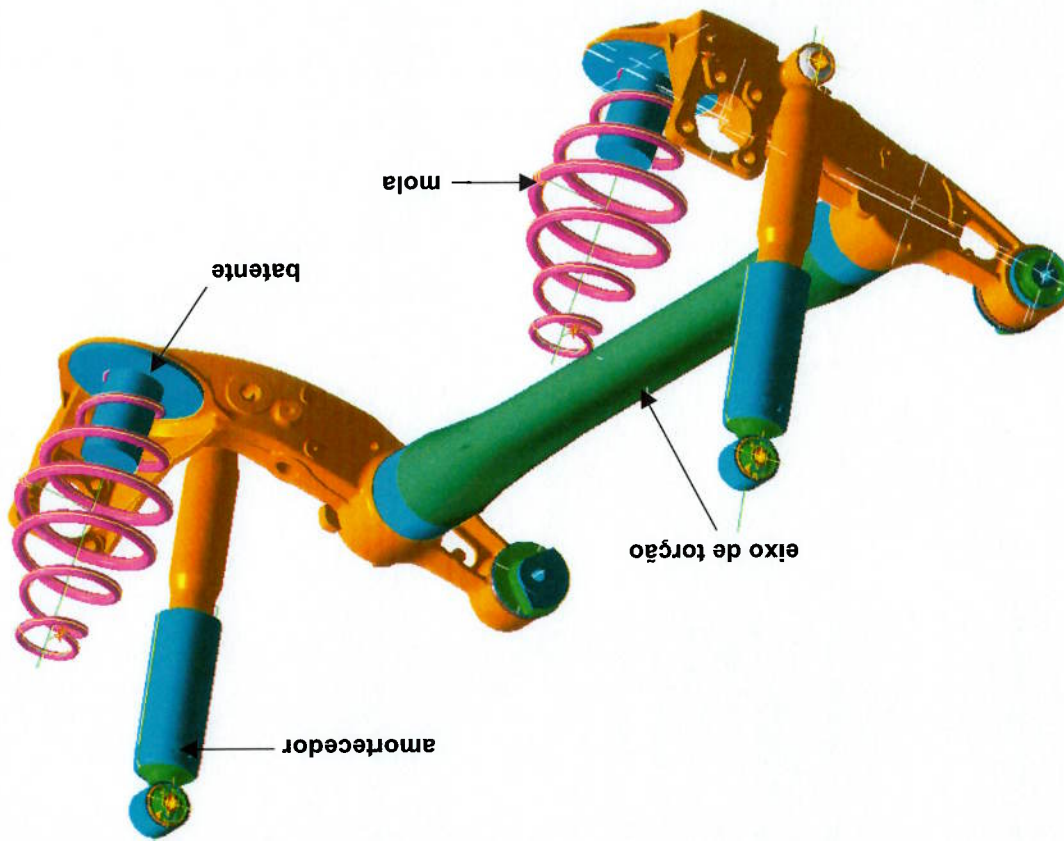


Figura 7.11 – Vista Longitudinal da Suspensão Traseira do Tipo Semi-Independente com Barra de Torção com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados

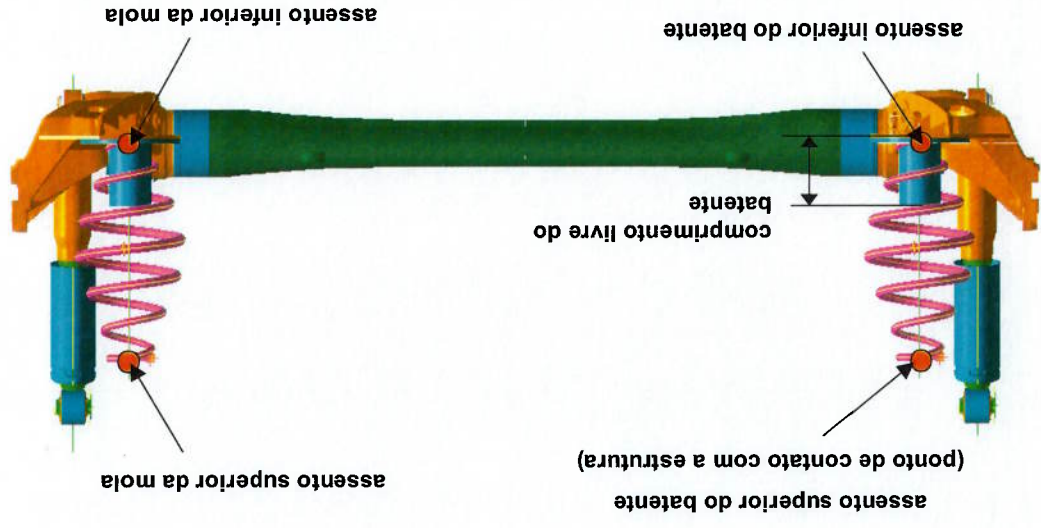
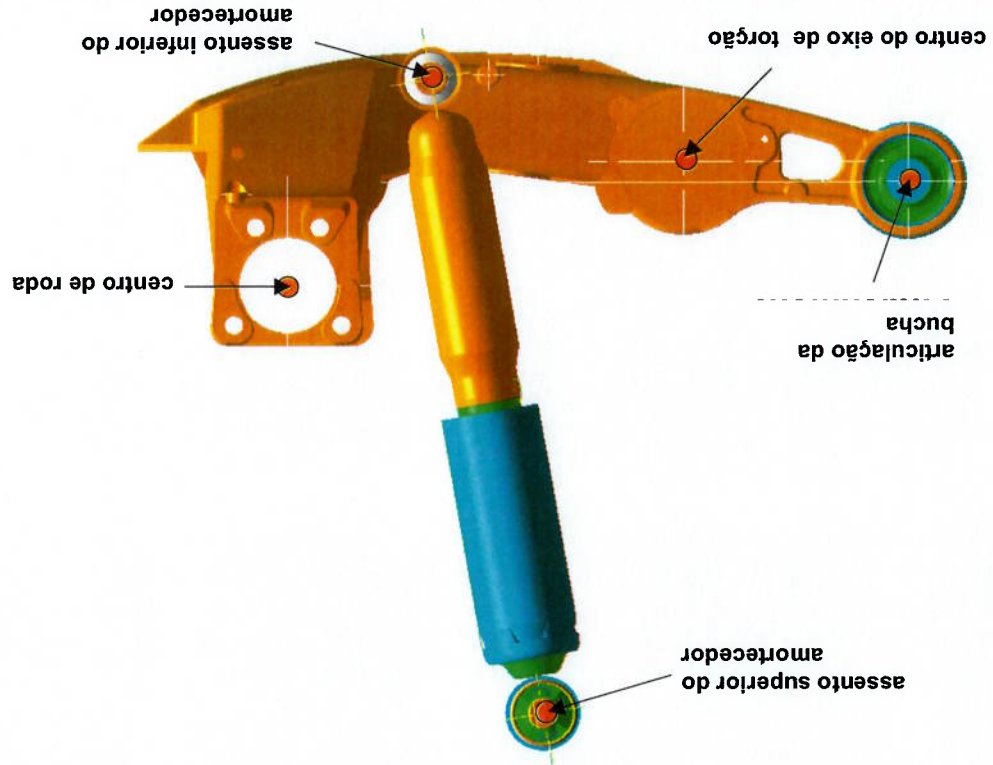


Figura 7.10 – Vista Lateral da Suspensão Traseira do Tipo Semi-Independente com Barra de Torção com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados



A tabela 7.4 mostra como são modelados os pontos mostrados nas figuras 7.10 e 7.11.

Tabela 7.4 – Modelagem dos Pontos Geométricos da Suspensão Traseira do Tipo Semi-Independente com Barra de Torção

Articulação da Bucha	Pontos de Aplicação de Força
Assento Superior do Amortecedor	
Assento Inferior do Amortecedor	
Centro de Roda	
Assento Superior da Mola	
Assento Inferior da Mola	
Assento Superior do Batente	Centro do Eixo de Torção
Assento Inferior do Batente	
Centro do Eixo de Torção	

As figuras 7.12 até 7.14 mostram as curvas dos componentes base modelados para a suspensão dianteira. A barra de torção é modelada com sua rigidez torcional linear igual a 25 N.m/deg.

Figura 7.13 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) do Batente Dianteiro Base do Estado

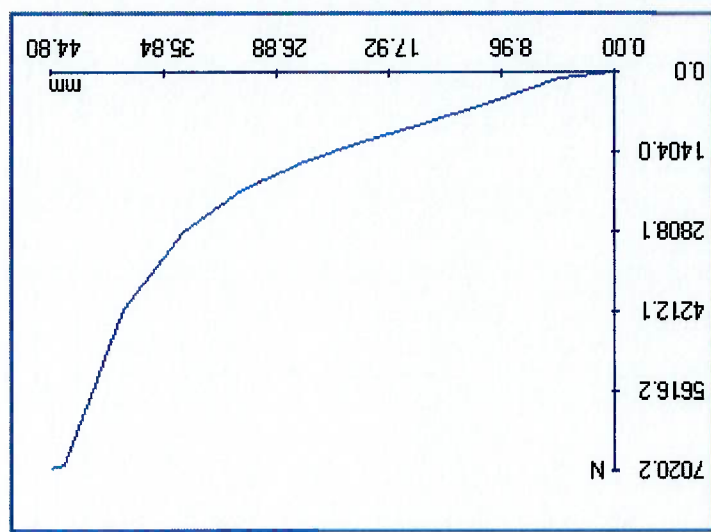
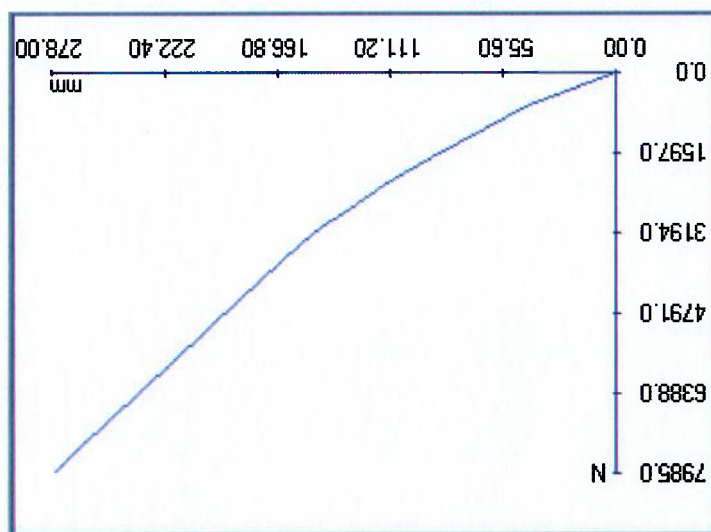
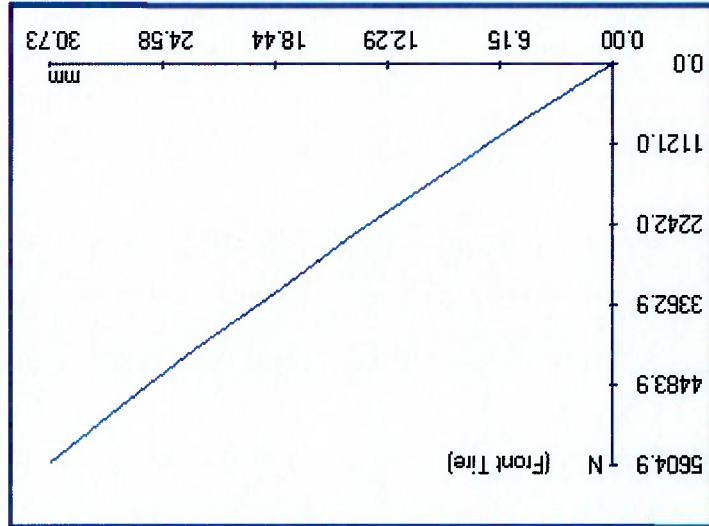


Figura 7.12 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) da Mola Traseira Base do Estado



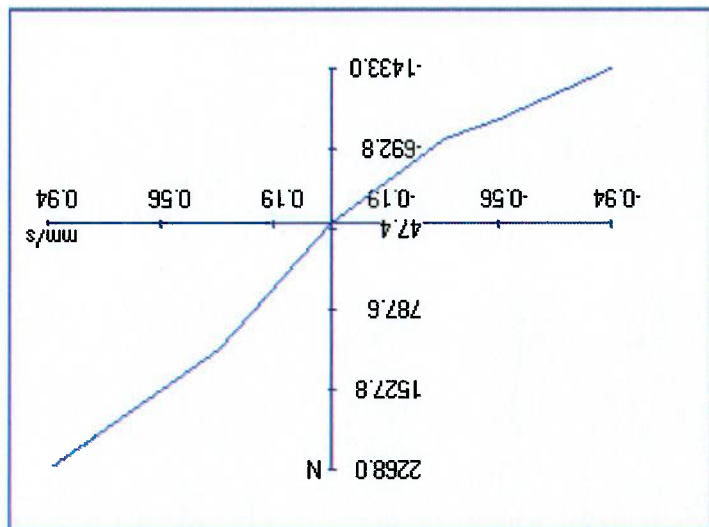


Traseiro Base do Estudo  
 Figura 7.15 – Gráfico de Força (N) x Deflexão Radial (mm) dos Pneus Dianteiro e



Os pneus são modelados através de suas curvas de força x deflexão radial. No veículo base modelado, os pneus têm medida 175/70 R41 e a pressão de enchimento dos pneus é de 26 psi e igual nos pneus dianteiros e traseiros, levando a curvas característica iguais aquela mostrada na figura 7.15.

Base do Estudo  
 Figura 7.14 – Gráfico de Força (N) x Velocidade (m/s) do Amortecedor Dianteiro



O modelo ainda trata a carroçaria como sendo um corpo rígido e, através do método de sistemas de ligação (capítulo 3), calcula a transmissão das forças entre as suspensões dianteira, traseira, sistema coximizado de motor/transmissão e o resto da carroçaria.

## Capítulo 8 - Resultados

Para efeitos de comparação, o estudo dos resultados de ambos os métodos foi realizado com o modelo base (mostrado no capítulo anterior), alterando-se com multiplicadores lineares os seguintes parâmetros:

- Rigidez da barra estabilizadora dianteira;
- Curva de rigidez da mola dianteira;
- Curva de rigidez da mola traseira;
- Curva de amortecimento do amortecedor dianteiro;
- Curva de amortecimento do amortecedor traseiro;
- Curva de rigidez do batente dianteiro;
- Curva de rigidez do batente traseiro;
- Pressão dos pneus traseiros.

Para ambos os métodos de otimização (Engenharia Robusta – Taguchi, e Simplex Descendente), foram estudadas variações destes parâmetros de  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$  em torno dos valores nominais (descritos no capítulo anterior).

O parâmetro de ruído adotado para o estudo foi o carregamento do veículo, considerando os resultados de conforto em duas condições distintas:

- Veículo vazio + motorista;
- Veículo na capacidade máxima de carga.

Foram então analisados o tempo de processamento computacional de cada um dos métodos e os resultados em si. Estes resultados são mostrados a seguir.

## 8.1. Resultados – Método do Simplex Descendente

A metodologia do simplex descendente foi aplicada a um problema com 8 dimensões (8 parâmetros de otimização), para que os resultados fossem diretamente comparáveis aos obtidos com a Engenharia Robusta. Como em 8 dimensões não é mais possível realizar a associação gráfica do simplex mostrada no capítulo 5. O anexo 1 contém os valores de cada extremidade do simplex (que para um problema de dimensão 8, possui 9 extremidades distintas) e o valor obtido por iteração.

Outro fato diferente na metodologia do simplex descendente é que o número de iterações varia para cada caso estudado ( $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ ), sendo que assim o tempo da otimização também é variável.

O anexo 1 contém tabelas que mostram os valores das extremidades do simplex e o valor obtido em cada iteração, enquanto os gráficos 8.1 a 8.3 mostram os resultados de cada iteração. Quando o simplex tenta atingir um ponto fora dos limites estabelecidos para os parâmetros de otimização, é atribuído o valor 0,01 à função de otimização, forçando o simplex a permanecer dentro destes limites estabelecidos.

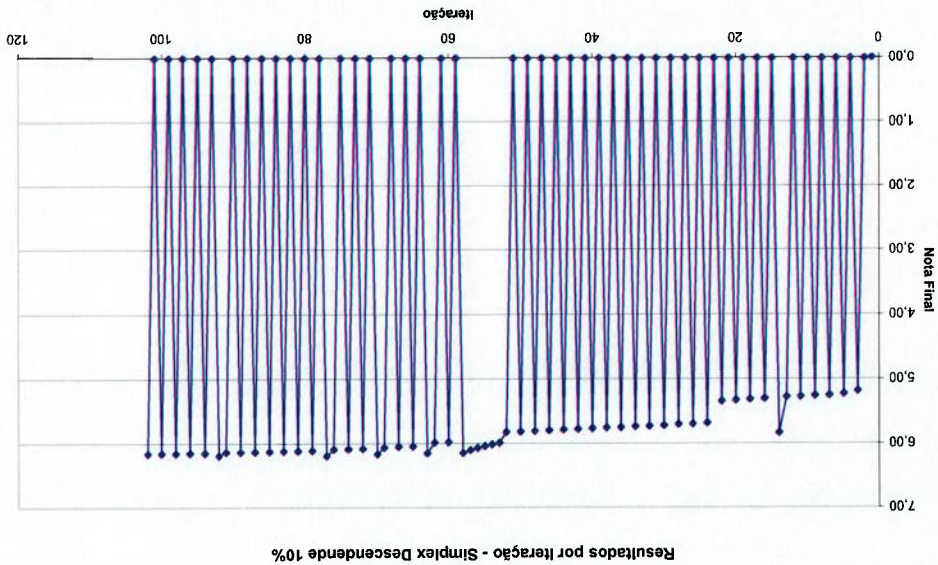


Figura 8.1 – Resultados das Iterações do Simplex Descendente para Variação de  $\pm 10\%$

Percebe-se através dos gráficos 8.1 a 8.3 que o simplex sempre tenta se expandir para fora dos limites estabelecidos para as variáveis de otimização ( $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$  respectivamente). Apesar desta característica (que se deve ao fato de que os limites de trabalho são relativamente estreitos, fazendo com que o algoritmo tente expandir o

Figura 8.3 – Resultados das Iterações do Simplex Descendente para Variação de  $\pm 30\%$

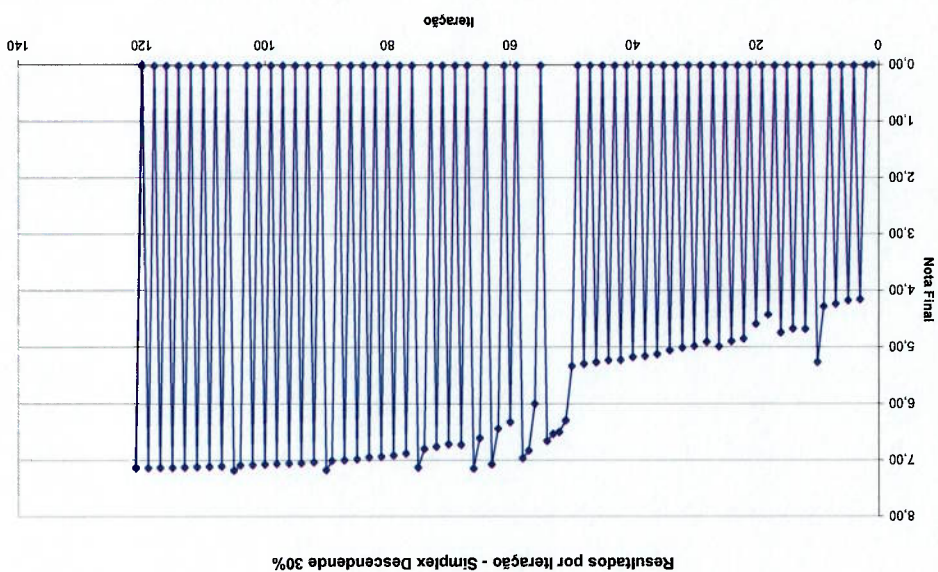
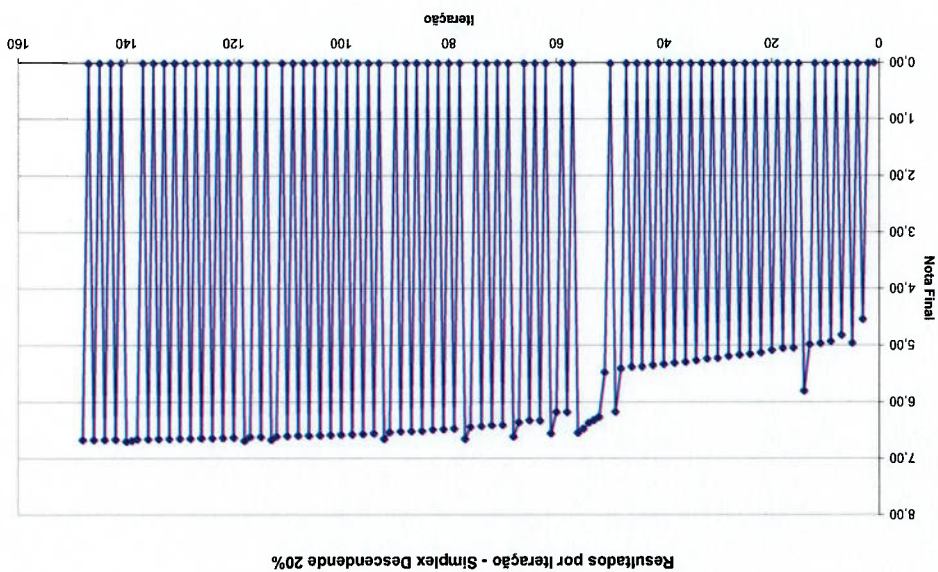


Figura 8.2 – Resultados das Iterações do Simplex Descendente para Variação de  $\pm 20\%$



simplex para pontos fora destes limites mais frequentemente), o método em todos os casos converge dentro dos limites estabelecidos.

A tabela 8.1 mostra os tempos de processamento computacional e os resultados para cada caso estudado no método do Simplex Descendente (microcomputador PC com processador Intel Pentium III 800 MHz e 256 Mb de memória RAM).

Tabela 8.1 – Tempos de Processamento Computacional e Resultados da Rotina do

Simplex Descendente.

Variação	Média	Estabilizadora	Barra	Mola	Dianetra	Traseira	Mola	Traseira	Dianetra	Amortecedor	Traseiro	Amortecedor	Batente	Dianetra	Batente	Traseiro	Pressão dos Pneus	Tempo de Proc. Computacional (s)
30%	7,2	-30%	30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	36
20%	6,7	-20%	20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	45
10%	6,2	-10%	10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	31

## 8.2. Resultados – Método da Engenharia Robusta (Taguchi)

Apesar da metodologia da Engenharia Robusta suportar curvas totalmente diferentes para os componentes de otimização, foram utilizados multiplicadores lineares para que fosse possível a comparação com os resultados da metodologia de Simplex Descendente.

Como o método de Taguchi necessita trabalhar com valores discretos, foram adotados sempre os valores nominais e os extremos da variação para a análise. Foi adotada uma matriz de experimentos ortogonal do tipo L18 (que trabalha com 7 parâmetros em 3 níveis discretos e 1 parâmetro em 2 níveis discretos, com um total de 18 experimentos, no caso simulações, para cada nível de ruído). As tabelas 8.2 até 8.4 mostram como foram organizados os experimentos.

Tabela 8.2 – Matriz Ortogonal para Estudo de Variação de  $\pm 10\%$  em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização

Experimento	Parâmetros de Otimização (níveis)							
	Rigidez da Barra Estabilizadora	Curva de Rigidez da Mola	Curva de Rigidez da Mola	Curva de Amortecimento do Amortecedor	Curva de Amortecimento do Amortecedor	Curva de Rigidez do Bateante	Curva de Rigidez do Bateante	Pressão do Pneu
1	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%
2	-10%	-10%	-10%	+10%	+10%	+10%	+10%	+10%
3	-10%	-10%	-10%	+10%	-10%	-10%	-10%	+10%
4	-10%	-10%	-10%	+10%	+10%	+10%	+10%	+10%
5	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	+10%
6	-10%	-10%	-10%	+10%	+10%	+10%	+10%	-10%
7	-10%	-10%	-10%	+10%	-10%	-10%	-10%	-10%
8	-10%	-10%	-10%	+10%	+10%	+10%	+10%	-10%
9	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%
10	-10%	-10%	-10%	+10%	+10%	+10%	+10%	-10%
11	-10%	-10%	-10%	+10%	-10%	-10%	-10%	+10%
12	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	+10%
13	-10%	-10%	-10%	+10%	+10%	+10%	+10%	-10%
14	-10%	-10%	-10%	+10%	-10%	-10%	-10%	+10%
15	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%
16	-10%	-10%	-10%	+10%	+10%	+10%	+10%	-10%
17	-10%	-10%	-10%	+10%	-10%	-10%	-10%	+10%
18	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	+10%

Tabela 8.3 – Matriz Ortogonal para Estudo de Variação de  $\pm 20\%$  em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização

Experimento	Parâmetros de Otimização (níveis)							
	Rigidez da Barra Estabilizadora	Curva de Rigidez da Mola	Curva de Rigidez da Mola	Curva de Amortecimento do Amortecedor	Curva de Amortecimento do Amortecedor	Curva de Rigidez do Bateante	Curva de Rigidez do Bateante	Pressão do Pneu
1	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%
2	-20%	-20%	-20%	+20%	+20%	+20%	+20%	+20%
3	-20%	-20%	-20%	+20%	-20%	-20%	-20%	+20%
4	-20%	-20%	-20%	+20%	+20%	+20%	+20%	+20%
5	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	+20%
6	-20%	-20%	-20%	+20%	+20%	+20%	+20%	-20%
7	-20%	-20%	-20%	+20%	-20%	-20%	-20%	-20%
8	-20%	-20%	-20%	+20%	+20%	+20%	+20%	-20%
9	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%
10	-20%	-20%	-20%	+20%	+20%	+20%	+20%	-20%
11	-20%	-20%	-20%	+20%	-20%	-20%	-20%	+20%
12	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	+20%
13	-20%	-20%	-20%	+20%	+20%	+20%	+20%	-20%
14	-20%	-20%	-20%	+20%	-20%	-20%	-20%	+20%
15	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%
16	-20%	-20%	-20%	+20%	+20%	+20%	+20%	-20%
17	-20%	-20%	-20%	+20%	-20%	-20%	-20%	+20%
18	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	+20%

Tabela 8.4 – Matriz Ortogonal para Estudo de Variação de  $\pm 30\%$  em Torno dos

Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização

Experimento	Parâmetros de Otimização (níveis)							
	Rigidez da Barra Estabilizadora	Curva de Rigidez da Moia	Rigidez da Moia	Curva de Amortecimento do Amortecedor	Curva de Amortecimento do Amortecedor	Curva de Rigidez do Batente	Curva de Rigidez do Batente	Curva de Pressão do Pneu Traseiro
1	-30%	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	-30%
2	-30%	-30%	+30%	nominal	nominal	nominal	nominal	+30%
3	-30%	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
4	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal	+30%
5	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal	-30%
6	-30%	-30%	nominal	+30%	nominal	nominal	nominal	nominal
7	-30%	-30%	+30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
8	-30%	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
9	-30%	-30%	+30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
10	-30%	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
11	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
12	-30%	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
13	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
14	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
15	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
16	-30%	-30%	nominal	+30%	nominal	nominal	nominal	nominal
17	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal	+30%
18	-30%	-30%	nominal	+30%	nominal	nominal	nominal	-30%

As tabelas 8.5 a 8.7 mostram os resultados para os dois níveis de ruído estudados (condições de carregamento do veículo – vazão e carregado), além do resultado médio e da relação S/R (como definida no método da engenharia robusta).

Tabela 8.5 – Resultados para Estudo de Variação de  $\pm 10\%$  em Torno dos Valores

Nominais dos Parâmetros de Otimização

Experimento	Resultado Vazio	Resultado Carregado	Resultado Médio	Sinal / Ruído
1	6,4	4,0	5,2	13,62
2	6,2	3,9	5,1	13,38
3	6,0	3,8	4,9	13,14
4	6,8	5,0	5,9	15,11
5	6,6	4,9	5,8	14,91
6	6,5	4,9	5,7	14,86
7	6,7	5,1	5,9	15,18
8	6,6	5,1	5,9	15,13
9	7,0	5,2	6,1	15,42
10	6,1	3,9	5,0	13,34
11	6,3	4,0	5,2	13,58
12	6,3	4,6	5,5	14,41
13	6,7	5,0	5,9	15,07
14	6,4	4,9	5,7	14,81
15	6,8	5,0	5,9	15,11
16	6,5	5,1	5,8	15,08
17	7,0	5,3	6,2	15,53
18	6,8	5,2	6,0	15,33



Tabela 8.6 – Resultados para Estudo de Variação de  $\pm 20\%$  em Torno dos Valores

Nominais dos Parâmetros de Otimização

Experimento	Resultado Vazio	Resultado Carregado	Resultado Médio	Sinal / Ruído
1	5,9	3,7	4,8	12,93
2	5,0	3,5	4,3	12,16
3	4,7	3,4	4,1	11,81
4	7,0	5,1	6,1	15,31
5	6,5	4,9	5,7	14,86
6	6,4	4,9	5,7	14,81
7	6,9	5,3	6,1	15,48
8	6,6	5,3	6,0	15,33
9	7,5	5,6	6,6	16,05
10	5,5	3,5	4,5	12,42
11	5,1	3,6	4,4	12,38
12	5,6	3,5	4,6	12,46
13	6,7	5,0	5,9	15,07
14	6,2	4,8	5,5	14,60
15	6,9	4,4	5,7	14,40
16	6,5	5,1	5,8	15,08
17	7,5	5,6	6,6	16,05
18	7,0	5,4	6,2	15,63

Tabela 8.7 – Resultados para Estudo de Variação de  $\pm 30\%$  em Torno dos Valores  
Nominais dos Parâmetros de Otimização

Experimento	Resultado Vazio	Resultado Carregado	Resultado Médio	Sinal / Ruído
1	4,7	3,4	4,1	11,81
2	4,4	3,2	3,8	11,27
3	4,2	3,1	3,7	10,95
4	7,1	5,1	6,1	15,35
5	6,5	4,2	5,4	13,96
6	6,3	4,8	5,6	14,65
7	7,0	5,2	6,1	15,42
8	6,5	5,2	5,9	15,18
9	7,9	5,9	6,9	16,50
10	4,3	3,2	3,8	11,20
11	4,5	3,3	3,9	11,51
12	5,1	3,2	4,2	11,67
13	6,8	5,1	6,0	15,22
14	6,1	4,7	5,4	14,43
15	7,0	4,5	5,8	14,57
16	6,3	5,0	5,7	14,87
17	7,9	6,0	7,0	16,60
18	7,1	5,6	6,4	15,87

As figuras 8.4 a 8.6 mostram os gráficos dos resultados dos cálculos da relação S/R dos parâmetros de otimização estudados, onde o nível que apresenta a maior relação S/R para cada caso é aquele escolhido para montar a configuração ótima. Através destes gráficos é possível determinar-se quais parâmetros de otimização tem maior influência no resultado: nos resultados aqui mostrados, por levar a variações maiores na relação S/R, percebe-se que a rigidez da mola dianteira tem mais influência nos resultados, enquanto a situação oposta é observada com relação à rigidez da barra estabilizadora.

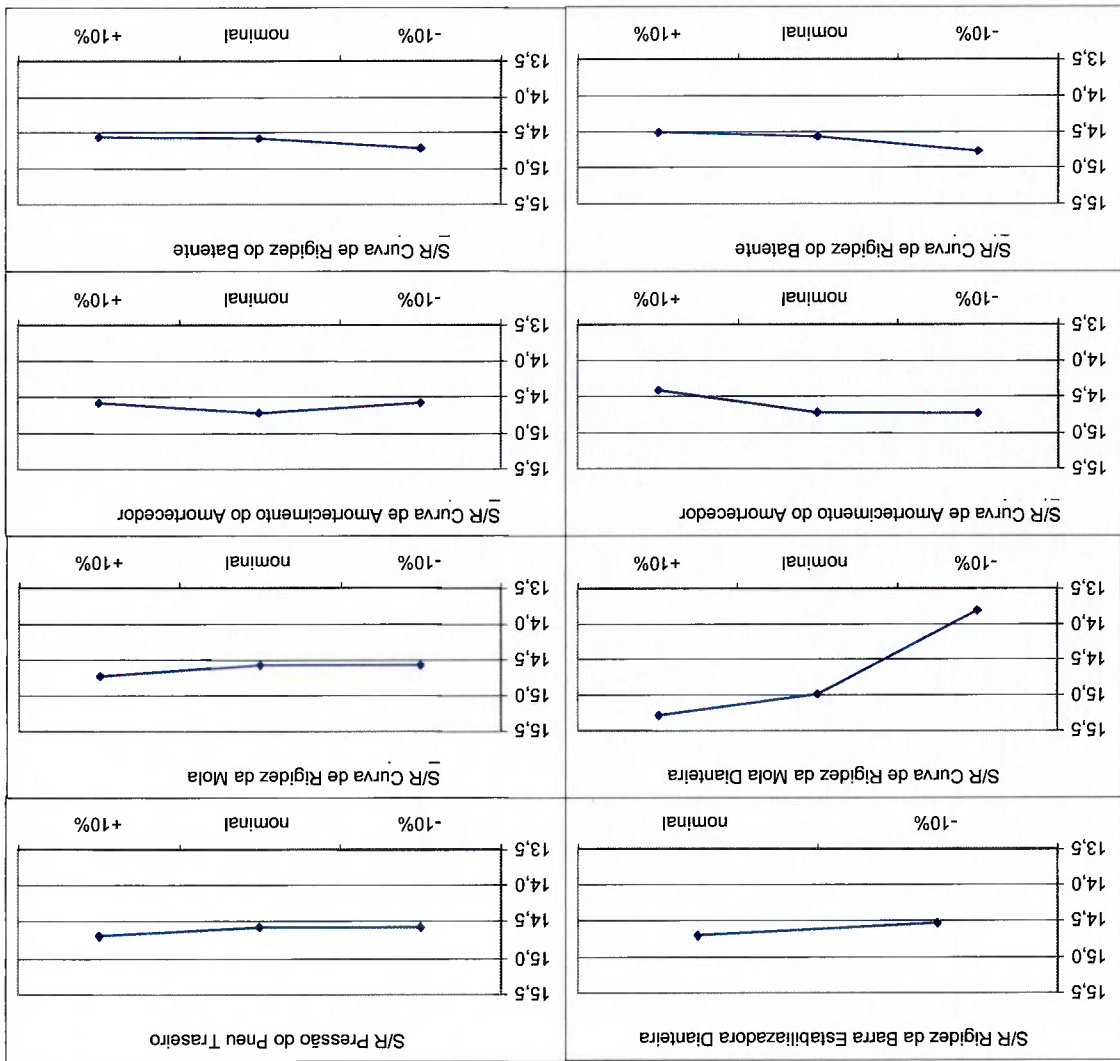
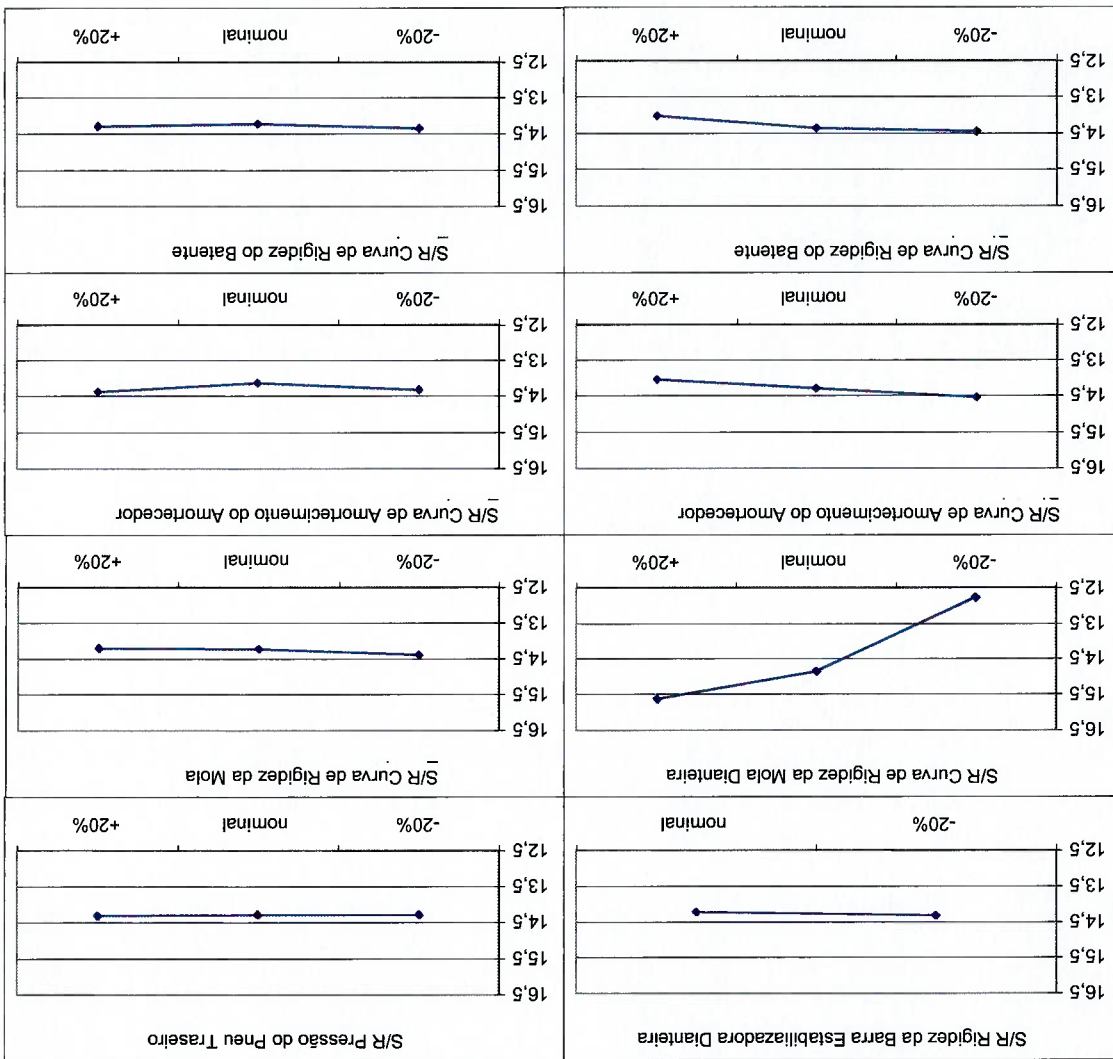


Figura 8.4 – Gráficos dos Resultados em Termos de Relação S/R para os Parâmetros de Otimização, para o Estudo de  $\pm 10\%$  em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização

Figura 8.5 – Gráficos dos Resultados em Termos de Relação S/R para os Parâmetros de Otimização, para o Estudo de  $\pm 20\%$  em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização



Experimento	Parâmetros de Otimização (níveis)			
	Otíma 30%	Otíma 20%	Otíma 10%	nominal
Rigidez da Barra Estabilizadora Dianteira	+30%	+20%	+10%	nominal
Curva de Rigidez da Mola Dianteira	+30%	+20%	+10%	nominal
Curva de Rigidez da Amortecedor Dianteiro	-30%	-20%	-10%	nominal
Curva de Amortecedor do Traseiro	+30%	+20%	+10%	nominal
Curva de Rigidez do Batente Dianteiro	-30%	-20%	-10%	nominal
Curva de Rigidez do Batente Traseiro	+30%	+20%	+10%	nominal
Pressão do Pneu Traseiro	+30%	+20%	+10%	nominal

±30%

Tabela 8.8 – Parâmetros Ótimos das Otimizações com Variação de ±10%, ±20% e ±30% e

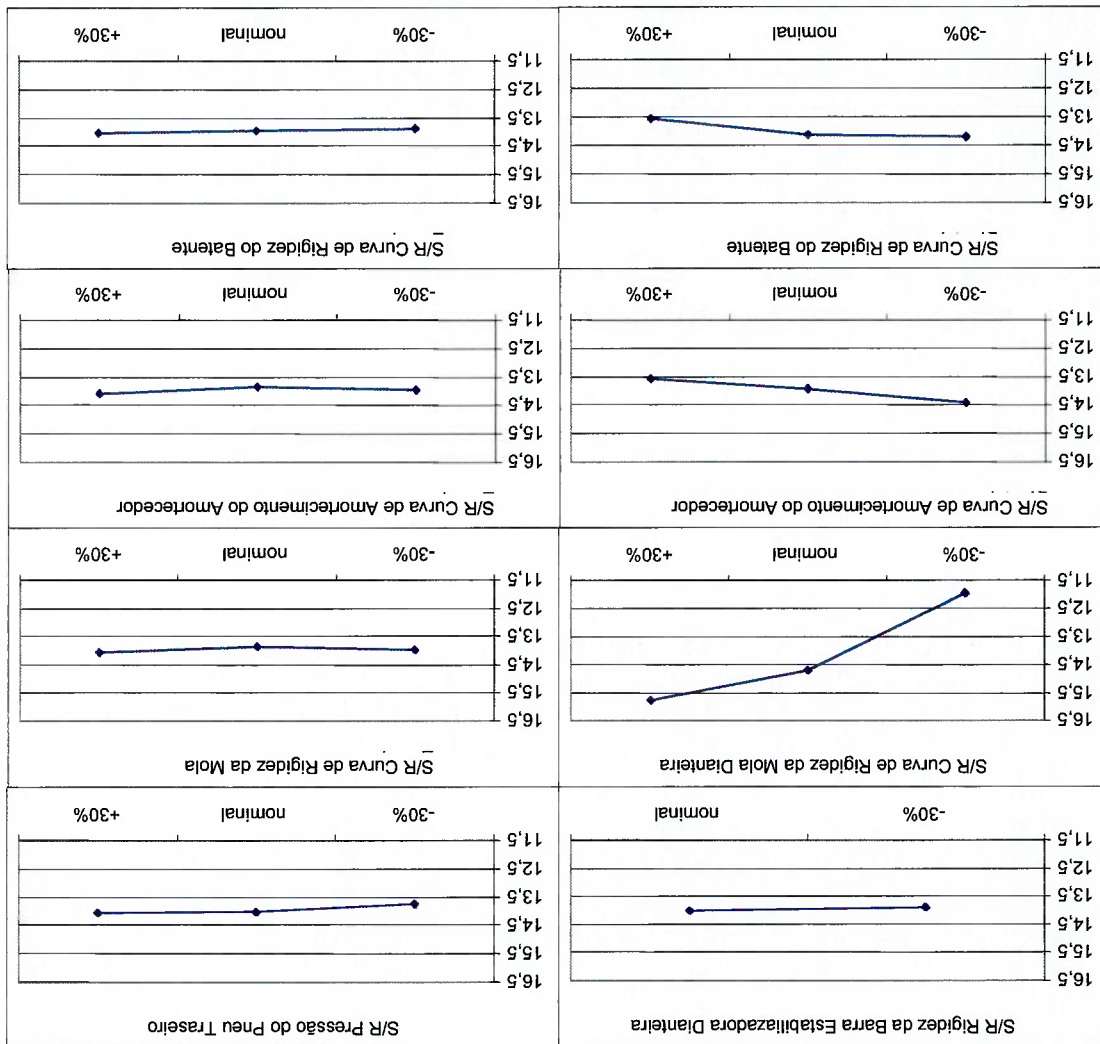
configurações ótimas para os casos de variação de ±10%, ±20% e ±30%.

Finalmente, as tabelas 8.8 e 8.9 mostram os parâmetros e os resultados das

### Parâmetros de Otimização

de Otimização, para o Estudo de ±30% em Torno dos Valores Nominais dos

Figura 8.6 – Gráficos dos Resultados em Termos de Relação S/R para os Parâmetros



Outro ponto é em relação ao tempo de execução. Basicamente, o método da Engenharia Robusta é um pouco melhor neste ponto, devido ao fato deste tempo ser constante (para um mesmo número de fatores e níveis). De toda forma, o que se observa é que os tempos são bastante pequenos para ambos os métodos, e isto se deve basicamente ao fato de que as rotinas de simulação dinâmica e conversão das

A primeira comparação que pode ser feita entre os dois métodos é bem intrínseca aos mesmos e se refere a como eles tratam a variação dos parâmetros de otimização durante a execução: enquanto o método da Engenharia Robusta utiliza-se de configurações determinadas a priori, que são baseadas em uma matriz de experimentos ortogonal, o método do Simplex Descendente é iterativo e segue uma “trajetória” (na analogia gráfica) para a configuração ótima, sendo que aqui tanto o número de iterações, como os parâmetros nestas utilizados varia para cada caso de estudo.

### 8.3. Comparação dos Resultados – Método da Engenharia Robusta x Método do Simplex Descendente

Em termos de tempo de processamento computacional, como a metodologia da Engenharia Robusta fixa o número de iterações para uma matriz de experimentos específica (neste caso a L18), este tempo é o mesmo para todos os casos, sendo igual a 10 segundos (microcomputador PC com processador Intel Pentium III 800 MHz e 256 Mb de memória RAM).

Experimento	Resultado Vazio	Resultado Carregado	Resultado Médio	Sinal / Ruído
Ótima 10%	7,0	5,3	6,2	15,53
Ótima 20%	7,5	5,7	6,6	16,15
Ótima 30%	7,9	6,0	7,0	16,60

Tabela 8.9 – Resultados das Otimizações com Variação de  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$

Primeiramente percebe-se que os resultados obtidos com a metodologia do Simplex Descendente são ligeiramente melhores que aqueles obtidos com a metodologia da Engenharia Robusta. É importante deixar claro que as diferenças observadas não ultrapassaram o limite de 0,3 na avaliação geral que, conforme mostrado no final do capítulo 4, é uma diferença que não é significativa o bastante para permitir a distinção do nível de conforto de uma configuração em relação à outra para os avaliadores especialistas. Pode-se extrapolar que esta diferença também não será

Método	Nota	Barra	Estabilizadora	Mola	Dianteira	Mola	Traseira	Amortecedor	Dianteiro	Amortecedor	Traseiro	Batente	Dianteiro	Batente	Traseiro	Pressão dos Pneus
Taguchi	6,1	nominal	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Simplex	6,2	-10%	10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%
Taguchi	6,6	-20%	20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%
Simplex	6,7	-20%	20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%
Taguchi	6,9	nominal	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
Simplex	7,2	-30%	30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%

Descendente e da Engenharia Robusta (Taguchi)

Tabela 8.11 – Parâmetros Ótimos e Resultados das Rotinas dos Métodos do Simplex

destacando os pontos onde ocorreram divergências.

A tabela 8.11 mostra a comparação em termos de parâmetros ótimos e resultados,

Método	Varição	Tempo de Processamento Computacional (s)
Taguchi	10%	10
Simplex	10%	31
Taguchi	20%	10
Simplex	20%	45
Taguchi	30%	10
Simplex	30%	36

do Simplex Descendente e da Engenharia Robusta

Tabela 8.10 – Tempos de Processamento Computacional das Rotinas dos Métodos

256 Mb de memória RAM.

obtidos em um microcomputador PC com processador Intel Pentium III 800 MHz e termos de tempo de execução. A tabela 8.10 mostra a comparação dos tempos variáveis dinâmicas em notas de conforto veicular já são bastante otimizadas em

significativa para um usuário comum (que não está treinado para perceber tais diferenças).

De toda forma, a observação destas diferenças motivou um estudo um pouco mais aprofundado para estes parâmetros cuja configuração ótima variava de um método para o outro. As tabelas 8.12 a 8.14 mostram as diferenças percentuais na relação S/R observadas na metodologia da Engenharia Robusta para os parâmetros de otimização nos estudos de variação  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$  em torno dos valores nominais dos componentes. Nestas tabelas estão destacados os pontos onde os resultados divergiram daqueles obtidos com o método do Simplex Descendente.

Tabela 8.12 – Diferenças Percentuais na Relação S/R dos Parâmetros de Otimização

para o Caso de Variação de  $\pm 10\%$

S/N Parâmetros							
Variação	Barra	Mola	Mola	Amortecedor	Amortecedor	Batente	Batente
10%	Estabilizadora	Dianteira	Traseira	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
+10%	-	12,35%	1,03%	0,00%	0,14%	0,00%	0,00%
nominal	0,76%	10,07%	0,00%	2,15%	1,03%	0,48%	0,07%
-10%	0,00%	0,00%	0,07%	2,29%	0,00%	1,86%	0,96%
20%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%
Pressão dos Pneus							

Tabela 8.13 – Diferenças Percentuais na Relação S/R dos Parâmetros de Otimização

para o Caso de Variação de  $\pm 20\%$

S/N Parâmetros							
Variação	Barra	Mola	Mola	Amortecedor	Amortecedor	Batente	Batente
20%	Estabilizadora	Dianteira	Traseira	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
+20%	-	25,93%	0,00%	0,00%	1,84%	0,00%	0,21%
nominal	0,00%	19,87%	0,42%	2,22%	0,00%	2,50%	0,00%
-20%	0,28%	0,00%	1,48%	4,01%	1,35%	3,21%	0,84%
20%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%
Pressão dos Pneus							

Tabela 8.14 – Diferenças Percentuais na Relação S/R dos Parâmetros de Otimização

para o Caso de Variação de  $\pm 30\%$

S/N Parâmetros							
Variação	Barra	Mola	Mola	Amortecedor	Amortecedor	Batente	Batente
30%	Estabilizadora	Dianteira	Traseira	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
+30%	-	38,28%	1,23%	0,00%	1,59%	0,00%	0,79%
nominal	0,65%	28,97%	0,00%	2,58%	0,00%	4,13%	0,65%
-30%	0,00%	0,00%	1,08%	6,13%	0,87%	4,58%	0,00%
30%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Pressão dos Pneus							

Pode-se perceber que para todos os casos onde ocorreram divergências entre os resultados de um o outro métodos, a variação percentual da relação S/R é inferior a

2%. Baseando-se neste fato, outro estudo foi feito comparando-se os resultados dos dois métodos, modificando-se os parâmetros do método da Engenharia Robusta nos pontos onde os resultados divergiram (destacados em amarelo) para aqueles obtidos através do método do Simplex Descendente (destacados em verde), e as tabelas 8.15 a 8.17 mostram tais resultados.

Tabela 8.15 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Inferior a 2% para o Caso de Variação de  $\pm 10\%$

Variação = 10%		Parâmetros									
Método	Nota Média	Barra	Mola	Mola	Amortecedor	Amortecedor	Amortecedor	Batente	Batente	Batente	Pressão dos Pneus
Taguchi	6,1	1,00	1,10	1,10	1,10	1,10	1,00	0,90	0,90	0,90	1,10
Simplex	6,2	0,90	1,10	1,10	1,10	1,10	0,90	0,90	0,90	0,90	1,10
-	6,1	1,00	1,10	1,10	1,10	1,10	0,90	0,90	0,90	0,90	1,10
-	6,1	1,00	1,10	1,10	1,10	1,10	0,90	0,90	0,90	0,90	1,10
-	6,1	1,00	1,10	1,10	1,10	1,10	0,90	0,90	0,90	0,90	1,10
-	6,1	1,00	1,10	1,10	1,10	1,10	0,90	0,90	0,90	0,90	1,10
Variação %											

Tabela 8.16 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Inferior a 2% para o Caso de Variação de  $\pm 20\%$

Variação = 20%		Parâmetros									
Método	Nota Média	Barra	Mola	Mola	Amortecedor	Amortecedor	Amortecedor	Batente	Batente	Batente	Pressão dos Pneus
Taguchi	6,6	0,80	1,20	0,80	0,80	0,80	1,20	0,80	0,80	0,80	1,20
Simplex	6,7	0,80	1,20	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	1,20
-	6,6	0,80	1,20	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	1,20
-	6,6	0,80	1,20	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	1,20
-	6,6	0,80	1,20	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	1,20
-	6,6	0,80	1,20	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	1,20
Variação %											

Tabela 8.17 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Inferior a 2% para o Caso de Variação de  $\pm 30\%$

Variação = 30%		Parâmetros									
Método	Nota Média	Barra	Mola	Mola	Amortecedor	Amortecedor	Amortecedor	Batente	Batente	Batente	Pressão dos Pneus
Taguchi	6,9	1,00	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	0,70	0,70	0,70	1,30
Simplex	7,2	0,70	1,30	1,30	1,30	1,30	0,70	0,70	0,70	0,70	1,30
-	6,9	1,00	1,30	1,30	1,30	1,30	0,70	0,70	0,70	0,70	1,30
-	6,9	1,00	1,30	1,30	1,30	1,30	0,70	0,70	0,70	0,70	1,30
-	6,9	1,00	1,30	1,30	1,30	1,30	0,70	0,70	0,70	0,70	1,30
-	6,9	1,00	1,30	1,30	1,30	1,30	0,70	0,70	0,70	0,70	1,30
Variação %											

Em todos estes casos mostrados nas tabelas 8.15 a 8.17 é possível observar que a influência na avaliação final de conforto é igual ou inferior ao limite de percepção de 0,3. Para completar o estudo, as tabelas 8.18 a 8.20 mostram uma mesma variação para os parâmetros cuja diferença percentual na relação S/R é superior a 2%.



Tabela 8.18 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Superior a 2% para o Caso de Variação de  $\pm 10\%$

Variação = 10%		Parâmetros									
Método	Nota Média	Barra Estabilizadora	Mola Dianteira	Mola Traseira	Amortecedor Dianteiro	Amortecedor Traseiro	Batente Dianteiro	Batente Traseiro	Pressão dos Pneus	de S/N do Parâmetro	Variação %
Taguchi	6,1	1,00	1,10	1,10	0,90	1,00	0,90	0,90	1,10	-	-
Simplex	6,2	0,90	1,10	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	-	-
Simplex	5,5	1,00	0,90	1,10	1,10	1,00	0,90	0,90	1,10	12,35%	-
-	5,7	1,00	1,10	1,10	1,10	1,00	0,90	0,90	1,10	2,29%	-

Tabela 8.19 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Superior a 2% para o Caso de Variação de  $\pm 20\%$

Variação = 20%		Parâmetros									
Método	Nota Média	Barra Estabilizadora	Mola Dianteira	Mola Traseira	Amortecedor Dianteiro	Amortecedor Traseiro	Batente Dianteiro	Batente Traseiro	Pressão dos Pneus	de S/N do Parâmetro	Variação %
Taguchi	6,6	0,80	1,20	0,80	0,80	1,20	0,80	0,80	1,20	-	-
Simplex	6,7	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	-	-
Simplex	4,9	0,80	0,80	0,80	0,80	1,20	0,80	0,80	1,20	25,93%	-
-	5,6	0,80	1,20	0,80	1,20	1,20	0,80	0,80	1,20	4,01%	-
-	6,5	0,80	1,20	0,80	0,80	1,20	0,80	0,80	1,20	3,21%	-

Tabela 8.20 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação S/R Superior a 2% para o Caso de Variação de  $\pm 30\%$

Variação = 30%		Parâmetros									
Método	Nota Média	Barra Estabilizadora	Mola Dianteira	Mola Traseira	Amortecedor Dianteiro	Amortecedor Traseiro	Batente Dianteiro	Batente Traseiro	Pressão dos Pneus	de S/N do Parâmetro	Variação %
Taguchi	6,9	1,00	1,30	0,70	1,30	1,30	0,70	0,70	1,30	-	-
Simplex	7,2	0,70	1,30	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	-	-
Simplex	4,3	1,00	0,70	1,30	1,30	1,30	0,70	0,70	1,30	38,28%	-
-	5,3	1,00	1,30	1,30	1,30	1,30	0,70	0,70	1,30	6,13%	-
-	6,7	1,00	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	4,58%	-

Percebe-se com estes resultados que a influência na avaliação final de conforto aqui é muito mais significativa, chegando a 2,6 pontos.

O resultado mais importante que se pode retirar deste último estudo mostrado é que a influência de um parâmetro específico no resultado final da avaliação de conforto é tanto maior quanto maior for a diferença percentual da relação S/R deste parâmetro. Deve-se notar que o método da Engenharia Robusta já traz embutida dentro de si o cálculo destas relações S/R, enquanto que o método do Simplex Descendente não apresenta esta característica, o que não impede a realização de rodadas adicionais de simulação para a determinação destas relações S/R, o que implica porém na execução de uma rodada de otimização de Engenharia Robusta em adição às iterações do Simplex Descendente.

## Capítulo 9 - Conclusões

Foram desenvolvidos dois algoritmos referentes a duas diferentes metodologias de otimização computacional (simplex descendente e engenharia robusta), aplicados ao problema do conforto veicular na otimização de componentes de suspensão.

As duas metodologias de otimização estudadas se mostraram adequadas para utilização conjunta com programas computacionais de simulação de conforto veicular. A boa correlação do modelo dinâmico com os valores obtidos em teste, tanto ao nível de correlação das variáveis dinâmicas (acelerações e forças) como a correlação destas variáveis com os parâmetros de avaliação subjetiva de conforto, são requisitos básicos e imprescindíveis para que estas metodologias de otimização possam ser utilizadas com sucesso.

Em termos de performance de otimização, o método da Engenharia Robusta e o método do Simplex Descendente obtiveram resultados semelhantes, sendo que o último apresentou resultados um pouco superiores em termos de configuração ótima, porém este melhor desempenho ainda está dentro da faixa de limite de percepção de conforto para o usuário do veículo, e assim, ambos métodos podem ser considerados equivalentes neste sentido. Esta faixa de limite de percepção está baseada nos resultados da análise de dados de avaliação subjetiva em campo de provas de avaliadores distintos para os mesmos critérios nas mesmas configurações (resultados estes mostrados no final do capítulo 4).

Em termos de tempo de processamento computacional, o método da Engenharia Robusta tem uma ligeira vantagem devido à sua característica de possuir um número fixo e pré-determinado de iterações a serem simuladas. De toda forma, devido ao fato da ferramenta de simulação dinâmica de conforto ser extremamente otimizada em relação ao tempo de processamento computacional, estas diferenças entre os métodos também não são significativas para a escolha de um método em detrimento do outro

(a diferença máxima entre os tempos de processamento computacional entre os métodos nos problemas estudados foi inferior a 1 minuto em um microcomputador PC com processador Intel Pentium III 800 MHz e 256 Mb de memória RAM). Deve-se porém ter em mente que, caso um problema semelhante ao estudado no capítulo 8, tendo oito parâmetros de otimização com cinco níveis cada, fosse analisado em forma de combinação fatorial, o tempo de processamento computacional pularia para 781.250 segundos, o equivalente a 217 horas ou mais que 9 dias de processamento ininterrupto, levando-se em consideração um tempo de 1 segundo para cada iteração. Percebe-se então o tremendo ganho que existe na aplicação dos métodos aqui estudados em termos de tempo de processamento computacional. Mesmo que se considere que a utilização de máquinas mais potentes em termos de velocidade de processamento levaria a uma redução destes números, os métodos de otimização se justificam por permitirem a possibilidade de futuros refinamentos nos modelos estudados (i.e., modelos mais detalhados) e possíveis otimizações conjuntas de conforto vibracional com outros critérios de avaliação (como dirigibilidade ou altura do veículo em relação ao solo).

Em termos de utilização, o método da Engenharia Robusta apresenta a vantagem de poder trabalhar com diferentes níveis para um mesmo parâmetro de otimização que não sejam linearmente dependentes uns dos outros (i.e., curvas de componentes totalmente diferentes para um estudo de otimização, ao invés de multiplicadores lineares aplicados a uma curva básica). Esta característica pode ser particularmente útil quando se deseja otimizar um determinado veículo utilizando componentes já existentes no mercado (ditos “de prateleira”, que em geral oferecem uma melhor opção de custo para a empresa). Ainda neste sentido, o fato do método da Engenharia Robusta trabalhar somente com níveis discretos para os parâmetros de otimização pode ser utilizado de modo benéfico quando se escolhem padrões já existentes na indústria: por exemplo, se um parâmetro de otimização for o diâmetro de uma barra estabilizadora, podem se escolher diâmetros comerciais, evitando assim o desenvolvimento de medidas específicas para utilização em um determinado veículo, que em geral elevam os custos do projeto.

Por outro lado, para componentes onde um padrão não é fator determinante no custo do mesmo, o método do Simplex Descendente é capaz de encontrar uma solução mais refinada em termos de otimização do conforto. Um exemplo seria uma curva de amortecimento específica, onde o fabricante trabalha somente com ajustes de válvulas internas ao amortecedor, obtendo a curva especificada sem afetar o custo final do componente.

Com relação ao nível de informação obtido no final do processo de otimização, o método da Engenharia Robusta tem a vantagem de deixar claro quais são os parâmetros de otimização que são mais influentes no conforto de um determinado veículo, através do cálculo da relação sinal / ruído por parâmetro. Desta forma, estes resultados podem ser utilizados para direcionar a utilização de um componente fora de padrão de mercado, porém mais otimizado para o projeto, quando perceber-se que o mesmo tem muita influência na avaliação final do veículo. Da mesma forma, pode-se optar por um componente mais barato (mesmo que não o ótimo), quando o mesmo tiver pouca influência no resultado final de conforto.

Os resultados da aplicação dos métodos aqui trabalhados estão sendo vivenciados na prática no trabalho de desenvolvimento de suspensões na GMB nos projetos em andamento. Atualmente, está sendo trabalhado o conceito de otimização computacional nas fases iniciais do projeto, eliminando-se a necessidade de protótipos físicos nestas fases iniciais e trabalhando-se com foco em veículos “mula” no desenvolvimento de suspensões, que são veículos construídos sobre a base de outros já em produção, sendo muito mais baratos que os protótipos do veículo final em si. Este tipo de trabalho tornou-se possível com a utilização intensiva de simulação e os resultados dos métodos de otimização computacional ajudam a reduzir ainda mais o ciclo de desenvolvimento, deixando os protótipos físicos cumprirem a função de confirmação dos resultados obtidos através da simulação e refinamento destes resultados, eliminando assim várias ciclos anteriores do desenvolvimento das suspensões.

Por fim, baseando-se no fato de que o custo computacional de ambos os métodos estudados é bastante pequeno, pode-se propor um estudo de utilização conjunta de ambos, aproveitando as características boas demonstradas por cada um isoladamente para balancear os pontos fracos do outro e tentar obter um resultado final melhor do que aquele que cada um consegue oferecer isoladamente.

Outro desdobramento desejável deste trabalho é o desenvolvimento de critérios objetivos de dirigibilidade e modelos matemáticos que possam representar estes critérios satisfatoriamente. Em conjunto com os critérios objetivos de conforto vibracional aqui utilizados, seria possível adaptar os métodos de otimização para que possam lidar com ambos critérios e buscar soluções ótimas que atendam os compromissos desejados entre dirigibilidade e conforto vibracional.

## Referências

- AMÓDIO, L. *Análise do Conforto Veicular Através da Simulação Dinâmica*. 1995. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- ARVIDSSON, I.; LENNARTSSON, B.; SCHMECHTIG, K. A Simple and Efficient Description of Car Body Movements for Use in Virtual Prototyping and Ride Comfort Evaluation. In: SAE AUTOMOTIVE DYNAMICS & STABILITY CONFERENCE, Troy, MI (EUA), 2000. SAE Paper 2000-01-1629, 2000.
- COSTA NETO, A. *Application of Multibody System (MBS) Techniques to Automotive Vehicle Chassis Simulation for Motion Control Studies*. 1991. Dissertação (Doutorado) – Universidade de Warwick, Inglaterra, 1991.
- GILLESPIE, T.D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale (EUA): SAE, 1992.
- FRANCESCHINI, F.H., VIELLA, D., MESQUITA JR., V. Ride Comfort Suspension Optimization with Simulation Tools. In: X MOBILITY TECHNOLOGY CONFERENCE & EXHIBIT - SAE BRASIL 2002, São Paulo, 2002.
- GRECO JR., P.C.; BARCELLOS, C.S.; ROSA NETO, A. A Numerical Model for Passenger Car Ride Comfort Studies. In: SAE 2001 WORLD CONGRESS, Detroit, MI (EUA), 2001. SAE Paper 2001-01-0039, 2001.
- GUÉLER, G.F. *Suspensão de Veículos: Projeto e Análise – Vol. 1: Conceitos Básicos*. São Paulo, 1992. 2ª edição.

GUÉLBER, G.F. *Suspensão de Veículos: Projeto e Análise – Vol. 2: Conceitos Avançados*. São Paulo, 1992. 2ª edição.

HANADA, K. A New Measurement Method for Quantifying the Ride Comfort. In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, MI (EUA), 2002. SAE Paper 2002-01-1236, 2002.

KOULOCHERIS, D.; VRAZOPOULOS, H.; DERTIMANIS, V. Optimization Algorithms for Tuning Suspension Systems Used in Ground Vehicles. In: INTERNATIONAL BODY ENGINEERING CONFERENCE & EXHIBITION AND AUTOMOTIVE & TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONFERENCE, Prais, 2002. SAE Paper 2002-01-2214, 2002.

MONTGOMERY, D.C. *Design and analysis of Experiments*. New York: John Wiley & Sons, 1996. – 4ª edição.

PADKE, M.S. *Quality Engineering Using Robust Design*. Englewood Cliffs, NJ (EUA): Prentice-Hall, 1989.

PARK, S.J.; CHEUNG, W.S.; CHO, Y.G.; YOON, Y.S. Dynamic Ride Quality Investigation for Passenger Car. In: SAE INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION, Detroit, MI (EUA), 1998. SAE Paper 980660, 1998.

PARK, S.J.; KIM, T.; CHO, Y.G.; YOON, Y.S. Dynamic Ride Quality Investigation and DB of Ride Values for Passenger and RV Cars. In: SAE 2001 WORLD CONGRESS, Detroit, MI (EUA), 2001. SAE Paper 2001-01-0384, 2001.

PARK, S.J.; MIN, B.C.; LEE, J.K.; KANG, E.S. Development of the Evaluating System for Ride Comfort and Fatigue in Vehicle. In: SAE 2001 WORLD CONGRESS, Detroit, MI (EUA), 2001. SAE Paper 2001-01-0388, 2001.

PRADKO-LEE. *Vibration Comfort Criteria*. 1966. SAE Paper 6660139, 1966.

- PRADO, M. Estudo da Dinâmica Lateral de um Ônibus com Suspensão a Ar Utilizando Modelos de Três Graus de Liberdade e em Sistema Multicorpos. 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- PRESS, W.H. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. New York: Cambridge University Press, 1992. – 2ª edição.
- RODI, P.A. Síntese da Curva de Amortecedor Segundo Critério de Desempenho Ótimo para Suspensão Veicular. 1991. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.
- RÖMER, M.M.; HIEMENZ, R. Automatic Numerical Optimization of Suspension Characteristics. In: NUMERICAL ANALYSIS AND SIMULATION IN VEHICLE ENGINEERING, Warzburg (Alemanha), 2000. SAE Paper 2000-07-0029, 2000.
- ROSS, P.J. Taguchi Techniques for Quality Engineering. New York: McGraw-Hill, 1988.
- SOUSA, R.S. Estudos em Otimização Linear. 2000. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- VILELA, D.; TAMAI, E.H. Ride Comfort Suspension Optimization with Simulation Tools. In: IASTED INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELING, IDENTIFICATION AND CONTROL, Innsbruck (Austria), 2003. Proceedings, Anaheim: Acta Press, 2003.



## Anexo 1 – Extremidades do Simplex no Método do Simplex Descendente

As tabelas a seguir mostram os valores do resultado da função de otimização nas extremidades do simplex e o valor obtido por iteração. Como o problema possui oito parâmetros de otimização, o simplex possui nove vértices, e o valor do resultado da função de otimização em cada vértice é identificado na tabela como  $Z_1$  até  $Z_9$ . O valor  $Z_{int}$  refere-se ao valor avaliado na função em cada iteração, tendo valor nulo na primeira linha, por se tratar do simplex de início do algoritmo e, quando o algoritmo tenta sair fora dos limites definidos para os parâmetros de otimização, o valor 0,01 é atribuído à função, impedindo que o simplex tente convergir para fora dos limites estabelecidos.

O fato dos valores da função nas extremidades do simplex convergirem para um só valor no final do processo iterativo deve-se ao fato de que o próprio simplex se comprime, convergindo para um só ponto no final deste processo iterativo.

Tabela A1.1 – Valores das Extremidades do Simplex ( $Z_1$  a  $Z_9$ ) e Valor de Cada Iteração ( $Z_{10}$ ) para Estudo de Variação de  $\pm 10\%$

Iteração	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Z_{10}$
1	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,0627	5,2045	5,1459	5,1798	5,1798	0,0000
2	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,0627	5,2045	5,1459	5,1798	5,1798	0,0100
3	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,0627	5,2045	5,1459	5,1798	5,1798	0,0100
4	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,1459	5,1798	5,1798	0,0100
5	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,1459	5,1798	5,1798	0,0100
6	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,1459	5,1798	5,1798	0,0100
7	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,1459	5,1798	5,1798	5,2498
8	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,1459	5,1798	5,1798	5,2498
9	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,1459	5,1798	5,1798	0,0100
10	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,1459	5,1798	5,1798	0,0100
11	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,2547	5,2045	5,2280	5,2159	5,2498	0,0100
12	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,2547	5,2045	5,2280	5,2159	5,2498	0,0100
13	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,2547	5,2045	5,2280	5,2159	5,2498	0,0100
14	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,2547	5,2045	5,2280	5,2159	5,2498	5,2776
15	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,2547	5,2045	5,2280	5,2159	5,2498	5,8363
16	5,8363	5,2228	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,2280	5,2159	5,2498	0,0100
17	5,8363	5,2228	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,2280	5,3027	5,2498	0,0100
18	5,8363	5,2228	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,2280	5,3027	5,2498	0,0100
19	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,2280	5,3027	5,2498	0,0100
20	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,2280	5,3027	5,2498	5,3232
21	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,2498	0,0100
22	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,2498	0,0100
23	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,2498	5,3394
24	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,2498	0,0100
25	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	0,0100
26	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	5,6937
27	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	0,0100
28	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	0,0100
29	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	0,0100
30	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	5,7201
31	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	0,0100
32	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	5,7284
33	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
34	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
35	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
36	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	5,7486
37	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
38	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
39	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	5,7555
40	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
41	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
42	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	5,7668
43	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
44	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	5,7668
45	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
46	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	5,7945
47	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
48	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
49	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	5,8024
50	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
51	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
52	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	5,8191
53	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	5,9875
54	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
55	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	6,0387
56	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	6,0669
57	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	6,1027
58	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	6,1434
59	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
60	5,8363	5,284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	5,9772

Iteração	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>	Z <sub>10</sub>
61	5,8363	6,0669	6,2106	6,0139	5,9772	5,9875	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
62	5,8363	6,0669	6,2106	6,0139	5,9772	5,9875	6,1027	6,0387	6,1434	5,9823
63	5,9823	6,0669	6,2106	6,0139	5,9772	5,9875	6,1027	6,0387	6,1434	6,1504
64	5,9823	6,0669	6,2106	6,0139	6,1504	5,9875	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
65	5,9823	6,0669	6,2106	6,0139	6,1504	5,9875	6,1027	6,0387	6,1434	6,0424
66	6,0424	6,0669	6,2106	6,0139	6,1504	5,9875	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
67	6,0424	6,0669	6,2106	6,0139	6,1504	5,9875	6,1027	6,0387	6,1434	6,0489
68	6,0424	6,0669	6,2106	6,0139	6,1504	6,0489	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
69	6,0424	6,0669	6,2106	6,0139	6,1504	6,0489	6,1027	6,0387	6,1434	6,0610
70	6,0424	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0489	6,1027	6,0387	6,1434	6,1671
71	6,0424	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0489	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
72	6,0424	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0489	6,1027	6,0387	6,1434	6,0805
73	6,0805	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0489	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
74	6,0805	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0489	6,1027	6,0387	6,1434	6,0854
75	6,0805	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0854	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
76	6,0805	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0854	6,1027	6,0387	6,1434	6,0917
77	6,0805	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0854	6,1027	6,0387	6,1434	6,1930
78	6,0805	6,0669	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
79	6,0805	6,0669	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,0387	6,1434	6,1097
80	6,1097	6,1930	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
81	6,1097	6,1930	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,0387	6,1434	6,1140
82	6,1097	6,1930	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
83	6,1097	6,1930	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,0387	6,1434	6,1192
84	6,1097	6,1930	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
85	6,1097	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1140	6,1027	6,0387	6,1434	6,1265
86	6,1097	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1140	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
87	6,1097	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1140	6,1027	6,0387	6,1434	6,1312
88	6,1312	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1140	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
89	6,1312	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1140	6,1027	6,0387	6,1434	6,1344
90	6,1312	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1344	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
91	6,1312	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1344	6,1027	6,0387	6,1434	6,1379
92	6,1312	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1027	6,0387	6,1434	6,1905
93	6,1312	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
94	6,1312	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1027	6,0387	6,1434	6,1486
95	6,1486	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
96	6,1486	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1027	6,0387	6,1434	6,1512
97	6,1486	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
98	6,1486	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1027	6,0387	6,1434	6,1539
99	6,1486	6,1930	6,2106	6,1539	6,1504	6,1512	6,1905	6,1671	6,1434	0,0100
100	6,1486	6,1930	6,2106	6,1539	6,1504	6,1512	6,1905	6,1671	6,1434	6,1569
101	6,1486	6,1930	6,2106	6,1539	6,1504	6,1512	6,1905	6,1671	6,1434	0,0100
102	6,1486	6,1930	6,2106	6,1539	6,1504	6,1512	6,1905	6,1671	6,1434	6,1602

Tabela A1.2 – Valores das Extremidades do Simplex ( $Z_1$  a  $Z_9$ ) e Valor de Cada Iteração ( $Z_{it}$ ) para Estudo de Variação de  $\pm 20\%$

Iteração	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Z_{it}$
1	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,7306	0,0000
2	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,7306	0,0100
3	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,7306	4,5445
4	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,7306	0,0100
5	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,7306	4,5445
6	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,7306	4,5445
7	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,7306	4,8215
8	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,7306	0,0100
9	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,7306	0,0100
10	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,7306	4,9319
11	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
12	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	4,9687
13	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
14	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	4,9872
15	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
16	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,0456
17	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,0456
18	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,0538
19	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
20	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,0840
21	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
22	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,1317
23	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
24	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,1538
25	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
26	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,1721
27	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
28	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,1928
29	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
30	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,2285
31	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
32	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,2388
33	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
34	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,2678
35	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
36	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,2962
37	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
38	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,3139
39	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
40	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,3335
41	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
42	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,3502
43	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
44	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,3745
45	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
46	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,3832
47	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
48	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,4075
49	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
50	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,4219
51	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
52	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,4419
53	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
54	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,4624
55	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
56	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,4832
57	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
58	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,5043
59	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	0,0100
60	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,4100	4,8173	4,9319	5,5255



Iteração	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>	Z <sub>10</sub>
121	6,6544	6,6895	6,7307	6,6145	6,6733	6,6215	6,6538	6,6248	6,6352	6,6381
122	6,6544	6,6895	6,7307	6,6145	6,6733	6,6215	6,6538	6,6248	6,6352	6,6381
123	6,6544	6,6895	6,7307	6,6381	6,6733	6,6215	6,6538	6,6248	6,6352	0,0100
124	6,6544	6,6895	6,7307	6,6381	6,6733	6,6215	6,6538	6,6248	6,6352	6,6426
125	6,6544	6,6895	6,7307	6,6381	6,6733	6,6426	6,6538	6,6248	6,6352	0,0100
126	6,6544	6,6895	6,7307	6,6381	6,6733	6,6426	6,6538	6,6248	6,6352	6,6452
127	6,6544	6,6895	6,7307	6,6381	6,6733	6,6426	6,6538	6,6452	6,6352	0,0100
128	6,6544	6,6895	6,7307	6,6381	6,6733	6,6426	6,6538	6,6452	6,6352	6,6507
129	6,6544	6,6895	6,7307	6,6381	6,6733	6,6426	6,6538	6,6452	6,6507	0,0100
130	6,6544	6,6895	6,7307	6,6381	6,6733	6,6426	6,6538	6,6452	6,6507	6,6530
131	6,6544	6,6895	6,7307	6,6530	6,6733	6,6426	6,6538	6,6452	6,6507	0,0100
132	6,6544	6,6895	6,7307	6,6530	6,6733	6,6426	6,6538	6,6452	6,6507	6,6558
133	6,6544	6,6895	6,7307	6,6530	6,6733	6,6558	6,6538	6,6452	6,6507	0,0100
134	6,6544	6,6895	6,7307	6,6530	6,6733	6,6558	6,6538	6,6452	6,6507	6,6578
135	6,6544	6,6895	6,7307	6,6530	6,6733	6,6558	6,6538	6,6578	6,6507	0,0100
136	6,6544	6,6895	6,7307	6,6530	6,6733	6,6558	6,6538	6,6578	6,6507	6,6609
137	6,6544	6,6895	6,7307	6,6530	6,6733	6,6558	6,6538	6,6578	6,6507	6,6609
138	6,6544	6,6895	6,7307	6,6530	6,6733	6,6558	6,6538	6,6578	6,6609	6,6625
139	6,6544	6,6895	6,7307	6,6625	6,6733	6,6558	6,6538	6,6578	6,6609	6,6922
140	6,6544	6,6895	6,7307	6,6625	6,6733	6,6558	6,6538	6,6578	6,6609	6,7011
141	6,7011	6,6895	6,7307	6,6625	6,6733	6,6558	6,6922	6,6578	6,6609	0,0100
142	6,7011	6,6895	6,7307	6,6625	6,6733	6,6558	6,6922	6,6578	6,6609	6,6697
143	6,7011	6,6895	6,7307	6,6625	6,6733	6,6697	6,6922	6,6578	6,6609	0,0100
144	6,7011	6,6895	6,7307	6,6625	6,6733	6,6697	6,6922	6,6578	6,6609	6,6714
145	6,7011	6,6895	6,7307	6,6625	6,6733	6,6697	6,6922	6,6714	6,6609	0,0100
146	6,7011	6,6895	6,7307	6,6625	6,6733	6,6697	6,6922	6,6714	6,6609	6,6736
147	6,7011	6,6895	6,7307	6,6625	6,6733	6,6697	6,6922	6,6714	6,6736	0,0100
148	6,7011	6,6895	6,7307	6,6625	6,6733	6,6697	6,6922	6,6714	6,6736	6,6750

Tabela A1.3 – Valores das Extremidades do Simplex ( $Z_1$  a  $Z_9$ ) e Valor de Cada Iteração ( $Z_{it}$ ) para Estudo de Variação de  $\pm 30\%$

Iteração	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Z_{it}$
1	4,0521	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,0273	3,9486	4,0323	3,8934	0,0000
2	4,0521	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,0273	3,9486	4,0323	3,8934	0,0100
3	4,0521	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,0273	3,9486	4,0323	3,8934	0,0100
4	4,0521	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,0273	3,9486	4,0323	4,1522	0,0100
5	4,0521	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,0273	3,9486	4,0323	4,1522	0,0100
6	4,0521	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,0273	4,1638	4,0323	4,1522	0,0100
7	4,0521	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,0273	4,1638	4,0323	4,1522	0,0100
8	4,0521	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,2283	4,1638	4,0323	4,1522	0,0100
9	4,0521	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,2283	4,1638	4,0323	4,1522	4,2716
10	4,0521	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,2283	4,1638	4,0323	4,1522	4,2716
11	5,2602	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,1522	5,2602
12	5,2602	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,1522	0,0100
13	5,2602	4,6789	7,1972	4,0729	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,1522	4,6789
14	5,2602	4,6789	7,1972	4,0729	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,1522	4,6773
15	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,1522	0,0100
16	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,1522	4,7432
17	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,7432	0,0100
18	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,7432	4,4215
19	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,7432	0,0100
20	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,7432	0,0100
21	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,2283	4,2716	4,7432	4,5899	0,0100
22	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,2283	4,2716	4,7432	4,8516	0,0100
23	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,2716	4,7432	4,8516	0,0100
24	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,2716	4,7432	4,8516	0,0100
25	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,2716	4,7432	4,8516	0,0100
26	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,2716	4,7432	4,8516	0,0100
27	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,8921	4,7432	4,853	0,0100
28	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,8921	4,7432	4,9040	0,0100
29	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,8921	4,7432	4,9040	0,0100
30	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9040	0,0100
31	5,2602	4,6789	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
32	5,2602	4,6789	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
33	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
34	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
35	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
36	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
37	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
38	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
39	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
40	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
41	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
42	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
43	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,8921	4,7432	4,9801	0,0100
44	5,2602	5,0074	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
45	5,2602	5,0074	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
46	5,2602	5,0074	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
47	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
48	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
49	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
50	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
51	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
52	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
53	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
54	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
55	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
56	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
57	5,9966	5,2607	7,1972	6,5338	6,4998	5,3318	6,6561	6,2888	5,2901	5,9966
58	5,9966	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	5,3318	6,6561	6,2888	5,2901	6,8274
59	5,9966	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	5,3318	6,6561	6,2888	5,2901	0,0100
60	5,9966	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	5,3318	6,6561	6,2888	5,2901	6,3196

Iteração	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>	Z <sub>10</sub>
61	5,9966	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	6,3196	6,6561	6,2888	6,9637	0,0100
62	5,9966	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	6,3196	6,6561	6,2888	6,9637	6,4370
63	6,4370	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	6,3196	6,6561	6,2888	6,9637	7,0673
64	6,4370	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	6,3196	6,6561	7,0673	6,9637	0,0100
65	6,4370	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	6,3196	6,6561	7,0673	6,9637	6,6058
66	6,4370	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	6,6058	6,6561	7,0673	6,9637	7,1393
67	7,1393	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	6,6058	6,6561	7,0673	6,9637	0,0100
68	7,1393	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	6,6058	6,6561	7,0673	6,9637	0,0100
69	7,1393	6,8274	7,1972	6,5338	6,7229	6,6058	6,6561	7,0673	6,9637	6,7229
70	7,1393	6,8274	7,1972	6,5338	6,7229	6,6058	6,6561	7,0673	6,9637	6,7154
71	7,1393	6,8274	7,1972	6,7154	6,7229	6,6058	6,6561	7,0673	6,9637	0,0100
72	7,1393	6,8274	7,1972	6,7154	6,7229	6,6058	6,6561	7,0673	6,9637	6,7585
73	7,1393	6,8274	7,1972	6,7154	6,7229	6,7585	6,6561	7,0673	6,9637	0,0100
74	7,1393	6,8274	7,1972	6,7154	6,7229	6,7585	6,6561	7,0673	6,9637	6,7966
75	7,1393	6,8274	7,1972	6,7154	6,7229	6,7585	6,7966	7,0673	6,9637	7,1265
76	7,1393	6,8274	7,1972	7,1265	6,7229	6,7585	6,7966	7,0673	6,9637	0,0100
77	7,1393	6,8274	7,1972	7,1265	6,7229	6,7585	6,7966	7,0673	6,9637	6,8749
78	7,1393	6,8274	7,1972	7,1265	6,8749	6,7585	6,7966	7,0673	6,9637	0,0100
79	7,1393	6,8274	7,1972	7,1265	6,8749	6,7585	6,7966	7,0673	6,9637	6,9098
80	7,1393	6,8274	7,1972	7,1265	6,8749	6,9098	6,7966	7,0673	6,9637	0,0100
81	7,1393	6,8274	7,1972	7,1265	6,8749	6,9098	6,7966	7,0673	6,9637	6,9331
82	7,1393	6,8274	7,1972	7,1265	6,8749	6,9098	6,7966	7,0673	6,9637	0,0100
83	7,1393	6,8274	7,1972	7,1265	6,8749	6,9098	6,9331	7,0673	6,9637	6,9470
84	7,1393	6,9470	7,1972	7,1265	6,8749	6,9098	6,9331	7,0673	6,9637	0,0100
85	7,1393	6,9470	7,1972	7,1265	6,8749	6,9098	6,9331	7,0673	6,9637	6,9808
86	7,1393	6,9470	7,1972	7,1265	6,9808	6,9098	6,9331	7,0673	6,9637	0,0100
87	7,1393	6,9470	7,1972	7,1265	6,9808	6,9098	6,9331	7,0673	6,9637	6,9966
88	7,1393	6,9470	7,1972	7,1265	6,9808	6,9966	6,9331	7,0673	6,9637	0,0100
89	7,1393	6,9470	7,1972	7,1265	6,9808	6,9966	6,9331	7,0673	6,9637	7,0071
90	7,1393	6,9470	7,1972	7,1265	6,9808	6,9966	7,0071	7,0673	6,9637	7,1717
91	7,1393	6,9470	7,1972	7,1265	6,9808	6,9966	7,0071	7,0673	6,9637	0,0100
92	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	6,9808	6,9966	7,0071	7,0673	6,9637	7,0285
93	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	6,9808	6,9966	7,0071	7,0673	6,9637	0,0100
94	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	6,9808	6,9966	7,0071	7,0673	6,9637	7,0470
95	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	6,9966	7,0071	7,0673	6,9637	0,0100
96	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	6,9966	7,0071	7,0673	6,9637	7,0529
97	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	6,9966	7,0071	7,0673	6,9637	0,0100
98	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	7,0529	7,0071	7,0673	6,9637	7,0591
99	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	7,0529	7,0071	7,0673	6,9637	0,0100
100	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	7,0529	7,0591	7,0673	6,9637	7,0708
101	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	7,0529	7,0591	7,0673	6,9637	0,0100
102	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	7,0529	7,0591	7,0673	6,9637	7,0821
103	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0529	7,0591	7,0673	6,9637	0,0100
104	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0529	7,0591	7,0673	6,9637	7,0871
105	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0529	7,0591	7,0673	6,9637	0,0100
106	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,0591	7,0673	6,9637	7,1765
107	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,0591	7,0673	6,9637	0,0100
108	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,0591	7,0673	6,9637	7,1056
109	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,0591	7,0673	6,9637	0,0100
110	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,0591	7,0673	6,9637	7,1056
111	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,0591	7,0673	6,9637	7,1136
112	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,0871	7,0591	7,0673	6,9637	0,0100
113	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,0871	7,0591	7,0673	6,9637	7,1173
114	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,1173	7,0591	7,0673	6,9637	0,0100
115	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,1173	7,0591	7,0673	6,9637	7,1259
116	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,1173	7,0591	7,0673	6,9637	0,0100
117	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,1173	7,0591	7,0673	6,9637	7,1274
118	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,1173	7,1765	7,1259	7,1274	0,0100
119	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,1173	7,1765	7,1259	7,1274	7,1325
120	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,1173	7,1765	7,1259	7,1274	0,0100
121	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1325	7,1173	7,1765	7,1259	7,1274	7,1351



# Apêndice A – Código do Programa do

## Método Downhill

unit VPG\_Downhill;

type

TFDownhill = class(TForm)

OpenF: TOpenDialog;

MainMenu1: TMainMenu;

Exit1: TMenuItem;

Run1: TMenuItem;

SaveF: TSaveDialog;

Label4: TLabel;

Label5: TLabel;

Label7: TLabel;

Noise1: TLabel;

LNoise1: TLabel;

Label1: TLabel;

LNoise2: TLabel;

Noise2: TLabel;

Label2: TLabel;

Label6: TLabel;

sg1: TStringGrid;

LB1: TListBox;

sg2: TStringGrid;

sg3: TStringGrid;

Label3: TLabel;

File1: TMenuItem;

Open1: TMenuItem;

```

Save1 : TMenuItem;
Label8 : TLabel;
procedure FormShow(Sender: TObject);
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
procedure Exit1Click(Sender: TObject);
procedure Run1Click(Sender: TObject);
procedure AtualizaTelaParametros;
procedure Open1Click(Sender: TObject);
procedure Save1Click(Sender: TObject);
procedure sg1Click(Sender: TObject);
procedure LB1Click(Sender: TObject);
procedure Noise1Click(Sender: TObject);
procedure Noise2Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

Const Downhill_Opt_Param : Array[1..12] of String[25] =
{
    =
    Constantes Otimização Downhill
}
{
    =====
}
('Front Spring',
'Rear Spring',
'Front Shock Absorber',
'Rear Shock Absorber',
'Front Jounce Bumper',
'Rear Jounce Bumper',
'Front Rebound Bumper',
'Rear Rebound Bumper',

```

```

'Front Tire Pressure',
'Rear Tire Pressure',
'Front Antiroll Bar',
'Rear Antiroll Bar');

Type DownhillOptType = Record
  NoiseFileName : Array[1..2] of String[255];
  DownhillParam : Array[1..8] of Integer;
  DownhillScaling : Array[1..8] of Single;
  DownhillLimit : Array[1..2,1..8] of Single;
end;

DimEval = Array[1..8] of Single;
DimSimplexEval = Array[1..9,1..8] of Single;
DimSimplexExt = Array[1..9] of Single;

var
  FDownhill : TFD downhill;
  TipooTimizacao : Integer;
  ArgOpt : File;
  DownhillOpt : DownhillOptType;
  DownhillRes : Array[1..2,1..6] of Single; (* ruído e mandamento *)
  CurrFileName : FileNameType;
  Present : TDateTime;
  Year, Month, Day, Hour, Min, Sec, MSec: Word;
function func(Factor: DimEval) : Single;
procedure Amoeba(Var p: DimSimplexEval; Var y: DimSimplexExt; ndim: Integer;
  fof: Single; Var nfunc, best: Integer);
procedure CalculaGMUTSDownhill(Ruido : Integer);
procedure InvTransferData;

```

```

implementation
  { $R * DFM }

  Var IndPar : Integer;

  {
  =====
  = Rotina FormShow
  =
  =====
  }

  procedure TFDownhill.FormShow(Sender: TObject);
  Var I, J : Integer;

  begin
    Label3.Visible := False;
    Label4.Visible := False;
    Label5.Visible := False;
    Label6.Visible := False;
    Label7.Visible := False;
    Label8.Visible := False;
    SG2.Visible := False;
    SG3.Visible := False;
    LB1.Clear;
    with LB1 do
      begin
        For I := 1 to 12 do
          begin
            J := Items.Add(InToStr(I) + '-' + Downhill_Opt_Param[I]);
          end;
        end;
        LB1.Visible := False;
        with DownhillOpt do

```

```

begin
  For I := 1 to 8 do
    DownhillScaling[I] := 1;
    DownhillLimit[1,I] := 0.5;
    DownhillLimit[2,I] := 1.5;
  end;
end;
end;
AtualizaTelaParametros;
end;

var I, J : Integer;

begin
  with SG1, DownhillOpt do
    begin
      Cells[0,0] := 'Param.';
      Cells[1,0] := 'Parameter Name';
      Cells[2,0] := 'Minimum';
      Cells[3,0] := 'Maximum';
    end;
    For I := 1 to 8 do
      begin
        Cells[0,I] := IntToStr(I);
        Cells[1,I] := DownhillOpt_ParamDownhillParam[I];
      end;
    end;
  end;
end;

```

```
Cells[j+1,i] := FloatToStr(DownhillLimit[j,i],fixed,6,2);
end;
Noise1.Caption := NoiseFileName[1];
Noise2.Caption := NoiseFileName[2];
end;
end;
end;

{}
{}
{} = {}
{}
{} = {}
{}

procedure InvTransferData;
{}
{} = {}
{}

Var I , j : Integer;
begin
with FDownhill.SG1, DownhillOpt do
begin
For I := 1 to 8 do
begin
For j := 1 to 2 do
begin
DownhillLimit[j,I] := StrToFloat(Cells[1+j,I]);
end;
end;
end;
end;
end;

{}
{}
{} = {}
{}
{}

procedure TFD downhill.Open1Click(Sender: TObject);
{}
{} = Rotina Abre Arquivo Configuracao Downhill = {}
{}
end;
```



```

If SaveF.Execute then
begin
  i := Length (SaveF.FileName);
  while (i>0) and (SaveF.FileName[i] > '.') do Dec(i);
  if i > 1 then
    SaveF.FileName := Copy (SaveF.FileName, 1, Pred (i));
    SaveF.FileName := SaveF.FileName+'.opt';
    AssignFile(ArgOpt, SaveF.FileName);
    Rewrite(ArgOpt,1);
    Seek(ArgOpt,0);
    TipOtimizacao := 2;
    BlockWrite(ArgOpt,TipOtimizacao,2);
    BlockWrite(ArgOpt,DownhillOpt,SizeOf(DownhillOpt));
    CloseFile(ArgOpt);
end;
end;
procedure TForm1.sglClick(Sender: TObject);
begin
  With SGI, CarFileD.SPar do
    begin
      IndPar := Row;
      Case Col of
        1 : begin
            LB1.Top := 60 + (Row-1)*18;
            LB1.Visible := True;
          end;
        else;
      end;
    end;
end;

```





```

} = Rotina Abre Arquivo de Ruído 2 = {
=====
}
procedure TFDownhill.Noise2Click(Sender: TObject);
begin
  OpenF.Title := 'Open VPG Data File';
  OpenF.Filter := 'VPG Data File (*.vpg)|*.vpg|';
  If OpenF.Execute then
    begin
      DownhillOpt.NoiseFileName[2] := OpenF.FileName;
    end;
  Noise2.Caption := DownhillOpt.NoiseFileName[2];
end;
} = Rotina CLOSE = {
=====
}
procedure TFDownhill.Exit1Click(Sender: TObject);
begin
  Close;
end;
procedure TFDownhill.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
  (* não faz nada *)
end;
} = Rotina RUN SIMULATION = {
=====
}
procedure TFDownhill.Run1Click(Sender: TObject);

```

```

const SWarningText = 'Save changes to %s?';
var I, J, K : Integer;
Cancela : Boolean;
p : DimSimplexEval;
y : DimSimplexExt;
ndim : Integer;
fcol : Single;
nfunc : Integer;
best : Integer;
Factor : DimBEval;
ix,jx : integer;
begin
  Cancela := False;
  if ModelChange then
    begin
      case MessageDlg(Format(SWarningText, [ArgEntradaN]), mtConfirmation,
        [mbYes, mbNo, mbCancel], 0) of
        id_Yes:
          begin
            SalvaArquivoDados;
          end;
        id_Cancel:
          begin
            Cancela := True;
          end;
        end;
      end;
    end;
end;

```

```

If not(Cancela) then
begin
InvTransferData;
CurrFileName := ArgEntradan;
Present:=Now;
DecodeDate(Present, Year, Month, Day);
DecodeTime(Present, Hour, Min, Sec, MSec);
Label3.Visible := True;
Label4.Visible := True;
Label5.Visible := True;
Label4.Caption := 'Initial Time: ' + timetostr(now);
Label5.Caption := 'Current Time: ' + timetostr(now);
Label8.Visible := True;
Refresh;
(* Inicializa Simplex *)
For I := 1 to 9 do
begin
For J := 1 to 8 do
begin
Factor[J] := DownhillOpt.DownhillLimit[1,J];
p[I,J] := DownhillOpt.DownhillLimit[1,J];
end;
If I > 1 then
begin
Factor[I-1] := DownhillOpt.DownhillLimit[2,I-1];
p[I,I-1] := DownhillOpt.DownhillLimit[2,I-1];
end;
y[I] := func(Factor);
end;
end;

```

```

nfunc := 0;
fhol := 10;
ndim := 8;
Amoeba(p, y, ndim, fhol, nfunc, best);

```

```

For I := 1 to 12 do

```

```

begin

```

```

Factor[I] := p[best,I];

```

```

end;

```

```

y[best] := func(Factor);

```

```

ArgEntradan := CurrFileName;

```

```

LeArquivoDatos;

```

```

Label3.Visible := False;

```

```

Label8.Visible := False;

```

```

Label6.Visible := True;

```

```

Label7.Visible := True;

```

```

SG2.Visible := True;

```

```

SG3.Visible := True;

```

```

With SG2 do

```

```

begin

```

```

Cells[0,0] := 'N1';

```

```

Cells[1,0] := 'N2';

```

```

Cells[2,0] := 'Average';

```

```

Cells[0,1] := FloatToStr(DownhillRes[1,6],ffixed,6,1);

```

```

Cells[1,1] := FloatToStr(DownhillRes[2,6],ffixed,6,1);

```

```

Cells[2,1] := FloatToStr((DownhillRes[1,6] + DownhillRes[2,6])/2,ffixed,6,1);

```

```

end;

```

```

For I := 1 to 8 do

```

```

begin

```

```

With SG3 do

```



```

NoLimite := False;
func := 100;
end;
end;
end;
If NoLimite then
begin
With DownhillOpt do
begin
For Noise := 1 to 2 do
begin
ArgEntradan := NoiseFileName[Noise];
LeArquivoDados;
For J := 1 to 8 do
begin
CarFileNA.ScalingFactor[DownhillParam[J]] :=
CarFileNA.ScalingFactor[DownhillParam[J]]*Factor[J];
end;
MontaModeloGS(False);
For IEventos := 1 to 5 do
begin
NoSim := NoSimEvento[IEventos];
IEventX := IEventos;
If IEventX > 3 then (* não faz 3o. mandamento mais *)
begin
For ISim := 1 to NoSim do
begin
IndSim := IndSim+1;
FVRISim.ZerEstadisticasVRI;
OpenFilesVRIDE(ISim);
PreliminaresSimGS(ISIM,VRIDE);

```

```

=====
{ = Rotina de Otimização por Método de Simplex Descendente Multidimensional = }
{ = (Downhill Simplex Method in Multidimensions) = }
{ = Daniel Vilela - Setembro/2002 = }
{ = }
{ = p -> Matriz n+1 x n cujas n+1 linhas são vetores n-dimensionais com os = }
{ = vértices do simplex inicial. Na saída contém o simplex final = }
{ = dentro da tolerância especificada em flol = }
{ = y -> Vetor de dimensão n+1 com os valores da função de mérito avaliada = }
{ = nos vértices do simplex inicial. Na saída contém os valores da = }

```

```

}
end;
end;
func := 2/(DownhillRes[1,6]+DownhillRes[2,6]);
end;
end;
end;
end;
end;
end;
CalculaGMUTSDownhill(Noise);
FechaEstatísticasVRIDE;
end;
GSSimulationStep(ISimulacaoGS,DumX,DumY,VRIDE);
TempoReal := Tempo + TempoMin;
Tempo := (ISimulacaoGS-1)*dtGS;
ISimulacaoGS := ISimGS;
begin
For ISimGS := 1 to NoAmssimGS do
FimSim := False;
Hanela := 0;

```



```

Function amoetry(Var p: DimSimplexEval; Var y: DimSimplexExt; Var sum:
DimEval;
ndim, ihi: Integer; Var nfunc: Integer; fac: Single): Single;
Var j
: Integer;
fac1, fac2, ytry : Single;
pty : ^DimEval;

```

```

Var mpts, j, inhi, ilo, ihl, i : Integer;
ytry, ysave, sum, rtol : Single;
psum : ^DimEval;
(* alpha, beta, gamma : Single;
tolcount : Integer;*)

```

```

Const nfuncmax = 5000; (* número máximo de avaliações permitido *)
alpha = 1.0; (* parâmetros de expansão e contração *)
beta = 0.5;
gamma = 2.0;

```

Label 99;

```

Procedure Armoeba(Var p: DimSimplexEval; Var y: DimSimplexExt; ndim: Integer;
ftol: Single; Var nfunc, best: Integer);
=====
=====
}
{ = ndim -> Número de dimensões do problema
{ = ftol -> Tolerância de convergência fracional a ser atingida pela função =
{ = nfunc -> Número de avaliações da função utilizados
} =
} =
função dentro da tolerância ftol.
} =

```

```

begin
  new(ptr);
  fac1 := (1.0-fac)/ndim;
  fac2 := fac1-fac;
  For j := 1 to ndim do
    ptr√[j] := sum[j]*fac1 - p[ih1,j]*fac2;
  end;
  ytry := func(ptr√); (* avalia a função no ponto tentativa *)
  nfunc := nfunc + 1;
  If ytry < y[ih1] then (* se é melhor que o maior, então substitui o maior *)
    begin
      y[ih1] := ytry;
      For j := 1 to ndim do
        begin
          sum[j] := sum[j] + ptr√[j] - p[ih1,j];
          p[ih1,j] := ptr√[j];
        end;
      end;
      amtry := ytry;
      Dispose(ptr);
    end;
  end;
  For i := 1 to mpts do
    begin
      New(psum);
      mpts := ndim+1;
      nfunc := 0;
      For j := 1 to ndim do
        nfunc := 0;
        For i := 1 to mpts do
          sum := 0.0;
          For i := 1 to mpts do
            sum := 0.0;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

begin
  sum := sum + p[i,j];
end;
psum√[j] := sum;
end;
(* tolcoun := 0; (* variável para controlar queda em mínimos locais *)
While true do
  begin
    ilo := 1; (* primeiramente determina-se o ponto de máximo (pior), 2o.
    maior e menor (melhor) *)
    If y[1] > y[2] then
      begin
        ih1 := 1;
        ih2 := 2;
      end
    else
      begin
        ih1 := 2;
        ih2 := 1;
      end
    end
    For i := 1 to mpts do
      begin
        If y[i] < y[ilo] then ilo := i;
        If y[i] > y[ihi] then
          begin
            ih1 := ih1;
            ih2 := ih2;
          end
        else
          begin
            ih1 := ih1;
            ih2 := ih2;
          end
        end
      end
    end
  end
end;

```

```

begin
  If i > ihi then
    begin
      inhi := i;
    end;
  end;
end;
end;
end;
end;

(* Computa a faixa fracional do maior pro menor *)
rtol := 2.0*abs(y[ihi]-y[iio])/(abs(y[ihi])+abs(y[iio]));

(* If rtol > ftoi/50 then
begin
  inc(toilcount);
  alpha := (2+toilcount)*alpha0;
  beta := 0.5*beta0;
  gamma := (2+2*toilcount)*gamma0;
end
else
begin
  toilcount := 0;
  alpha := alpha0;
  beta := beta0;
  gamma := gamma0;
end;*)

(* Não estou usando a faixa fracional - o critério aqui é que o pior
resultado (y[ihi]) está abaixo da tolerância *)
(* rtol := y[ihi];*)

```

```

FDownhill.Label5.Caption := 'Current Time: ' + timetostr(now);
FDownhill.Label8.Caption := FloatToStr(1/ytry, ffixed, 6, 2);
FDownhill.Refresh;
(* Retorna se satisfatório *)
If rtol < flol/1000 then
begin
Goto 99;
end;
If nfunc >= nfuncmax then Goto 99; (* número máximo de iterações *)
(* Inicia nova iteração - primeiramente extrapola por um fator alpha
pela face do simplex através do ponto mais alto, i.e. reflete o
simplex do ponto mais alto *)
ytry := amoty(p,y,psum^ndim,ih1,nfunc,-alpha);
(* Se resultado é melhor que o melhor ponto, tenta um fator gamma de
extrapolação *)
If ytry <= y[ilo] then
begin
ytry := amoty(p,y,psum^ndim,ih1,nfunc,gamma);
end
else
begin
(* Se o ponto refletido é pior que o 2o. maior, procura por um ponto
intermediário, i.e. realiza uma contração uni-dimensional *)
If ytry >= y[inh1] then
begin
ysave := y[ih1];
ytry := amoty(p,y,psum^ndim,ih1,nfunc,beta);
(* Se não consegue se livrar do ponto alto, faz a contração em

```

torno do ponto baixo (melhor)

\*)

```
If ytry >= ysave then
  begin
    For i := 1 to mpts do
      begin
        If i > ilo then
          begin
            For j := 1 to ndim do
              begin
                psum√[j] := 0.5*(p[i,j] + p[ilo,j]);
                p[i,j] := psum√[j];
              end;
            y[i] := func(psum√);
          end;
        end;
      end;
      nfunc := nfunc + ndim;
    end;
    For j := 1 to ndim do
      begin
        sum := 0.0;
        For i := 1 to mpts do
          begin
            sum := sum + p[i,j];
          end;
        psum√[j] := sum;
      end;
    end;
  end;
end;
end;
end;
end;
99: Dispose(psum);
```

best := ilo;  
end;  
end.

## Apêndice B – Código do Programa do

### Método Taguchi

unit VPG\_VRide\_Taguchi;

type

TFVRTaguchi = class(TForm)

Noise1: TLabel;

SaveF: TSaveDialog;

LNoise1: TLabel;

sg1: TStringGrid;

LB1: TListBox;

Label1: TLabel;

OpenF: TOpenDialog;

MainMenu1: TMainMenu;

Run1: TMenuItem;

LNoise2: TLabel;

Noise2: TLabel;

Label2: TLabel;

Label3: TLabel;

File1: TMenuItem;

Open1: TMenuItem;

Save1: TMenuItem;

Exit1: TMenuItem;

sg2: TStringGrid;

sg3: TStringGrid;

Label4: TLabel;

PRB1: TProgressBar;

Label6: TLabel;



```

Labels: TLabel;
procedure Noise1Click(Sender: TObject);
procedure FormShow(Sender: TObject);
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
procedure LB1Click(Sender: TObject);
procedure sg1Click(Sender: TObject);
procedure sg1DbClick(Sender: TObject);
procedure Exit1Click(Sender: TObject);
procedure Run1Click(Sender: TObject);
procedure Noise2Click(Sender: TObject);
procedure Open1Click(Sender: TObject);
procedure Save1Click(Sender: TObject);
procedure InvTransferData;
procedure CalculaGMUTSTaguichi(Rodada, Ruído : Integer);
procedure AtualizaTelaParametros;
procedure MarcaArquivoComponente(Parametro, Nivel : Integer);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

Const L18_Matrix : Array[1..18, 1..8] of Integer =
(
    ((1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1),
    (1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2),
    (1, 1, 3, 3, 3, 3, 3, 3),
    (1, 2, 1, 1, 2, 2, 3, 3),
    (1, 2, 2, 2, 3, 3, 1, 1),
    (1, 2, 3, 3, 1, 1, 2, 2))
}
}
= Constantes Otimização Taguchi =
}
}

```

(1, 3, 1, 2, 1, 3, 2, 3),  
 (1, 3, 2, 3, 2, 1, 3, 1),  
 (1, 3, 3, 1, 3, 2, 1, 2),  
 (2, 1, 1, 3, 3, 2, 2, 1),  
 (2, 1, 2, 1, 1, 3, 3, 2),  
 (2, 1, 3, 2, 2, 1, 1, 3),  
 (2, 2, 1, 2, 3, 1, 3, 2),  
 (2, 2, 2, 3, 1, 2, 1, 3),  
 (2, 2, 3, 1, 2, 3, 2, 1),  
 (2, 3, 1, 3, 2, 3, 1, 2),  
 (2, 3, 2, 1, 3, 1, 2, 3),  
 (2, 3, 3, 2, 1, 2, 3, 1));

Const Taguchi\_Opt\_Param : Array[1..12] of String[25] =

('Front Spring',  
 'Rear Spring',  
 'Front Shock Absorber',  
 'Rear Shock Absorber',  
 'Front Jounce Bumper',  
 'Rear Jounce Bumper',  
 'Front Rebound Bumper',  
 'Rear Rebound Bumper',  
 'Front Tire Pressure',  
 'Rear Tire Pressure',  
 'Front Antiroll Bar',  
 'Rear Antiroll Bar');

Type TaguchiOptType = Record

NoiseFileName : Array[1..2] of String[255];  
 TaguchiParam : Array[1..8] of Integer;  
 TaguchiLevelType : Array[1..8, 1..3] of SmallInt;  
 (\* 0 - Scaling Factor

I - Component ASCII File \*)

TaguchiLevelScaling : Array[1..8,1..3] of Single;  
TaguchiLevelFile : Array[1..8,1..3] of String[255];

end;

var

FVRTaguchi : TFVRTaguchi;

TipOtimizacao : Integer;

ArqOpt : File;

CurrFileName : FileNameType;

TaguchiOpt : TaguchiOptType;

TaguchiRes : Array[1..19,1..2,1..6] of Single; (\* rodada, ruído e mandamento -

190. é o melhor \*)

SignalToNoise : Array[1..19] of Single;

SNParam : Array[1..8,1..3] of Single;

NParam : Array[1..8,1..3] of Integer;

BestParam : Array[1..8] of Integer;

BestRes : Single;

BestSN : Single;

MajorSN : Single;

implementation

uses VPG\_Par;

{SR \* DFM}

Var IndPar : Integer;

}  
} = Rotina Abre Arquivo de Ruído 1 =  
}

```

procedure TFVTRTaguchi.Noise1Click(Sender: TObject);
begin
  OpenF.Title := 'Open VPG Data File';
  OpenF.Filter := 'VPG Data File (*.vpg)|*.vpg|';
  If OpenF.Execute then
  begin
    TaguchiOpt.NoiseFileName[1] := OpenF.FileName;
    Noise1.Caption := TaguchiOpt.NoiseFileName[1];
  end;
end;

procedure TFVTRTaguchi.Noise2Click(Sender: TObject);
begin
  OpenF.Title := 'Open VPG Data File';
  OpenF.Filter := 'VPG Data File (*.vpg)|*.vpg|';
  If OpenF.Execute then
  begin
    TaguchiOpt.NoiseFileName[2] := OpenF.FileName;
    Noise2.Caption := TaguchiOpt.NoiseFileName[2];
  end;
end;

{
  =
  Rotina Abre Archivo de Ruido 2
  =
}
procedure TFVTRTaguchi.NoiseShow(Sender: TObject);
{
  =
  Rotina FormShow
  =
}
end;
Var I, J : Integer;

```

```

begin
Label6.Visible := False;
PRB1.Visible := False;
Label4.Visible := False;
Label5.Visible := False;
SG2.Visible := False;
SG3.Visible := False;
LB1.Clear;
with LB1 do
begin
For I := 1 to 12 do
begin
j := Items.Add(InToStr(I)+' - '+Taguchi_Param[I]);
end;
end;
LB1.Visible := False;
with TaguchiOpt do
begin
For I := 1 to 8 do
begin
TaguchiParam[I] := I;
For J := 1 to 3 do
begin
TaguchiLevelScaling[I,J] := 1;
end;
end;
end;
end;
end;
AtualizaTelParametros;
PRB1.Max := (18+1)*2*5; (* (18 rodadas + best) x 2 níveis de ruído x 5
mandamentos *)
PRB1.Position := 0;
end;

```

```

=====
}
= Rotina AtualizaTelaParametros =
=====
procedure TFVRTaguchi.AtualizaTelaParametros;
var I, J : Integer;
begin
  with SGI, TaguchiOpt do
    begin
      Cells[0,0] := 'Param.';
      Cells[1,0] := 'Parameter Name';
      Cells[2,0] := 'Level 1';
      Cells[3,0] := 'Level 2';
      Cells[4,0] := 'Level 3';
      For I := 1 to 8 do
        begin
          Cells[0,I] := IntToStr(I);
          Cells[1,I] := Taguchi_Opt_Param[TaguchiParam[I]];
          For J := 1 to 3 do
            begin
              Cells[1+J,I] := FloatToStr(TaguchiLevelScaling[I,J],fixed,6,4);
            end;
          end;
          Cells[4,I] := '0';
          Noise1.Caption := NoiseFileName[1];
          Noise2.Caption := NoiseFileName[2];
        end;
      end;
    end;
  end;
=====
}

```

procedure TFVRTaguchi.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);

```
end;  
Close;  
begin  
  procedure TFVRTaguchi.ExitClick(Sender: TObject);  
  {  
  =====  
  }  
  { = Rotina CLOSE = }  
  {  
  =====  
  }  
end;
```

```
end;  
end;  
end;  
end;  
end;  
  TaguchiLevelScaling[I,J] := StrToFloat(Cells[1+J,I]);  
begin  
  IF TaguchiLevelType[I,J] = 0 then  
    begin  
      For J := 1 to 3 do  
        begin  
          For I := 1 to 8 do  
            begin  
              with SGI, TaguchiOpt do  
                begin
```

```
Var I, J : Integer;  
procedure TFVRTaguchi.InvTransferData;  
{  
=====}  
{ = Rotina InvTransferData = }  
{  
=====}
```

```

begin
  InvTransferData;
end;

procedure TFVRTaguchi.Run1Click(Sender: TObject);
{
  =====
  = Rotina RUN SIMULATION =
  =====
}
const SWarningText = 'Save changes to %s?';
var Noise : Integer;
    I, J : Integer;
    Cancela : Boolean;
    IEventos : Integer;
    ISim : Integer;
    ISimGS : Integer;
    DummX, DummY : Single;
    LeuOK : Boolean;
begin
  Label4.Visible := False;
  Label5.Visible := False;
  SG2.Visible := False;
  SG3.Visible := False;
  Cancela := False;
  if ModelChange then
  begin
    case MessageDlg(Format(SWarningText, [ArgEntradaN]), mtConfirmation,
      [mbYes, mbNo, mbCancel], 0) of
      id_Yes:

```



```

begin
  SalvaArquivoDados;
end;

id_Cancel:
begin
  Cancela := True;
end;

end;
end;
end;

end;
end;

end;

If not(Cancela) then
begin
  With TaguchiOpt do
begin
  Label6.Visible := True;
  PRB1.Visible := True;
  Refresh;
  InvTransferData;
  CurrFileName := ArqEntradan;
  For Noise := 1 to 2 do
begin
  ArqEntradan := NoiseFileName[Noise];
  For I := 1 to 18 do
begin
  LeArquivoDados;
  For J := 1 to 8 do
begin
  If TaguchiLevelType[J,L18_Matrix[1,J]] = 0 then
begin
    CarFileNA.ScalingFactor[TaguchiParam[J]] :=

```

```

CarFileNA.ScalingFactor[TaguchiParam[J]]*TaguchiLevelScaling[J,L18_Matrix[I,J]
];
end
else
begin
LeASCIIComponent(TaguchiLevelFile[J,L18_Matrix[I,J]],
TaguchiParam[J], LeOK);
end;
end;
MontaModeloGS(False);
For IEventos := 1 to 5 do
begin
NoSim := NoSimEvento[IEventos];
IEventX := IEventos;
If IEventX > 3 then
begin
For ISim := 1 to NoSim do
begin
FVRISim.ZeraEstatisticasVRI;
OpenFilesVRIDE(ISim);
PreliminarEssimGS(ISIM,VRIDE);
IJanela := 0;
FimSim := False;
For ISimGS := 1 to NoAmssimGS do
begin
ISimulacaoGS := ISimGS;
Tempo := (ISimulacaoGS-1)*dtGS;
TempoReal := Tempo + TempoMin;
GSSimulationStep(ISimulacaoGS,DumX,DumY,VRIDE);
end;
end;

```

```

FecharEstatisticasVRIDE;
CalculaGMUTSTaguchi(I, Noise);
end;
PRB1.Position := PRB1.Position+1;
end;
begin
  For I := 1 to 18 do
    SignalToNoise[I] :=
      10*Log10(((1/2)*((1/Sqr(TaguchiRes[1,6]))+(1/Sqr(TaguchiRes[1,2,6])))));
    end;
    For I := 1 to 3 do
      begin
        For J := 1 to 8 do
          begin
            SNParam[J,I] := 0;
            NParam[J,I] := 0;
          end;
        end;
        For I := 1 to 18 do
          begin
            For I := 1 to 18 do
              divisão *)
            SNParam[J, L18_Matrix[I,J]] := SNParam[J, L18_Matrix[I,J]] +
            SignalToNoise[I];
            Inc(NParam[J, L18_Matrix[I,J]]);
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

end;
end;
end;
SNParam[J,I] := SNParam[J,I]/NParam[J,I];
begin
  For J := 1 to 8 do
    For I := 1 to 3 do
      end;
    end;
  begin
    For J := 1 to 8 do
      For I := 1 to 3 do
        MajorSN := -1e10;
        begin
          For J := 1 to 8 do
            MajorSN := -1e10;
            begin
              For I := 1 to 3 do
                If SNParam[J,I] > MajorSN then
                  begin
                    For I := 1 to 3 do
                      MajorSN := SNParam[J,I];
                    end;
                  end;
                end;
              end;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
    MajorSN := SNParam[J,I];
  end;
end;
end;
end;
For Noise := 1 to 2 do
  begin
    ArgEntradan := NoiseFileName[Noise];
    LeArquivoDados;
    For J := 1 to 8 do
      begin
        If TaguchiLevelType[J,BestParam[J]] = 0 then
          begin
            CarFileNA.ScalingFactor[TaguchiParam[J]] :=

```

```

CarFileNA.ScalingFactor[TaguchiParam[J]]*TaguchiLevelScaling[J,BestParam[J]];
end
else
begin
LeASCIIComponent[TaguchiLevelFile[J,BestParam[J]], TaguchiParam[J],
LeuOK);
end;
end;
MontaModeloGS(False);
For IEventos := 1 to 5 do
begin
NoSim := NoSimEvento[IEventos];
IEventX := IEventos;
For ISim := 1 to NoSim do
begin
IndSim := IndSim+1;
FVRISim.ZerEstadisticasVRI;
OpenFilesVRIDE(ISim);
PreliminarEssSimGS(ISIM,VRIDE);
IJanela := 0;
FirmSim := False;
For ISimGS := 1 to NoAmssimGS do
begin
ISimlacaogs := ISimGS;
Tempo := (ISimlacaogs-1)*dtGS;
TempoReal := Tempo + TempoMin;
GSSimulationStep(ISimlacaogs,DumX,DumY,VRIDE);
end;
FechaEstadisticasVRIDE;
CalculaGMUTSTaguchi(19,Noise);
PRB1.Position := PRB1.Position+1;

```

```

end;
end;
SignalToNoise[19]
:=
10*Log10(((1/2)*((1/Sqr(Taguchires[19,1,6]))+(1/Sqr(Taguchires[19,2,6])))));
ArgEntradan := CurrFileName;
LeArquivoDatos;
Label6.Visible := False;
PRB1.Visible := False;
Label4.Visible := True;
Label5.Visible := True;
SG2.Visible := True;
SG3.Visible := True;
For I := 1 to 19 do
begin
With SG2 do
begin
Cells[I,0] := IntToStr(I);
Cells[I,1] := FloatToStr(Taguchires[I,1,6],ffixed,6,1);
Cells[I,2] := FloatToStr(Taguchires[I,2,6],ffixed,6,1);
Cells[I,3] :=
FloatToStr((Taguchires[I,1,6]
+
Taguchires[I,2,6])/2,ffixed,6,1);
Cells[I,4] := FloatToStr(SignalToNoise[I],ffixed,6,2);
end;
end;
SG2.Cells[0,0] := 'Run';
SG2.Cells[19,0] := 'Best';
SG2.Cells[0,1] := 'N1';
SG2.Cells[0,2] := 'N2';
SG2.Cells[0,3] := 'Average';

```

```

SG2.Cells[0,4] := 'S/N';
For J := 1 to 8 do
begin
  With SG3 do
begin
    Cells[J,0] := IntToStr(J);
    Cells[J,5] := IntToStr(BestParam[J]);
    For I := 1 to 3 do
begin
    Cells[J,I] := FloatToStr(SNParam[J,I],ffixed,6,2);
end;
end;
end;
SG3.Cells[0,0] := 'Param';
SG3.Cells[0,1] := 'L1';
SG3.Cells[0,2] := 'L2';
SG3.Cells[0,3] := 'L3';
SG3.Cells[0,5] := 'Best';
SG3.Cells[1,3] := '';
end;
end;
end;
procedure TFVRTaguchi.LB1Click(Sender: TObject);
begin
  with LB1, SG1, TaguchiOpt do
begin
    TaguchiParam[IndPar] := ItemIndex+1;
    Cells[1,IndPar] := TaguchiOpt_Param[TaguchiParam[IndPar]];
  }
  { = Rotina LABEL CB1 CHANGE = }
  { ===== }
end;
end;
end;

```





```

begin
  With SGI, TaguchiOpt do
    begin
      Case Col of
        2, 3, 4 : begin
          If TaguchiOpt.TaguchiLevelType[Row,Col-1] = 1 then
            begin
              TaguchiOpt.TaguchiLevelType[Row,Col-1] := 0;
              Cells[Col, Row] := FloatToStr(TaguchiLevelScaling[Row,Col-
                1],ffixed,6,4);
            end
          else
            begin
              TaguchiOpt.TaguchiLevelType[Row,Col-1] := 1;
              MarcaArquivoComponente(Row, Col-1);
            end
          end;
        else;
      end;
    end;
  end;
end;

var I, J : Integer;

procedure TFVRTaguchi.Open1Click(Sender: TObject);
=====
{ = Rotina Abre Arquivo Configuracao Taguchi = }
=====
end;

```

```

OpenF.Title := 'Open OPT Data File';
OpenF.Filter := 'OPT Data File (*.opt)|*.opt|';

```

```

If OpenF.Execute then
begin
AssignFile(ArgOpt, OpenF.FileName);
Reset(ArgOpt, 1);
Seek(ArgOpt, 0);
BlockRead(ArgOpt, TipoOtimizacao, 2);
If TipoOtimizacao = 1 then
begin
BlockRead(ArgOpt, TaguchiOpt, SizeOf(TaguchiOptType));
end;
CloseFile(ArgOpt);
AtualizaTelaParametros;
end;
end;
end;
=====
{
= Rotina Salva Arquivo Configuracao Taguchi =
}
=====
procedure TFVRTaguchi.Save1Click(Sender: TObject);
var i : SmallInt;
begin
SaveF.Title := 'Save OPT Data File';
SaveF.Filter := 'OPT Data File (*.opt)|*.opt';
If SaveF.Execute then
begin
i := Length(SaveF.FileName);
while (i > 0) and (SaveF.FileName[i] < '.') do Dec(i);
if i > 1 then
SaveF.FileName := Copy(SaveF.FileName, 1, Pred(i));
end;
end;
end;

```

```

SaveF.FileName := SaveF.FileName+'opt';
InvTransferData;
AssignFile(ArgOpt, SaveF.FileName);
Rewrite(ArgOpt, 1);
Seek(ArgOpt, 0);
TipOtimizacao := 1;
BlockWrite(ArgOpt, TipOtimizacao, 2);
BlockWrite(ArgOpt, TaguchiOpt, SizeOf(TaguchiOpt));
CloseFile(ArgOpt);
end;
end;

{
=====
}
{ = Rotina Marca Arquivo Componente = }
{
=====
}
procedure TFVRTaguchi.MarcarArquivoComponente(Parametro, Nivel : Integer);
var LeuOK : Boolean;
ArgComp : TextFile;
Dummy : String;
CompType : String;
begin
OpenF.FileName := TaguchiOpt.TaguchiLevelFile[Parametro, Nivel];
OpenF.Title := 'Component ASCII File';
OpenF.Filter := 'Component ASCII File (*.txt)|*.txt!';
If OpenF.Execute then
begin
AssignFile(ArgComp, OpenF.FileName);
Reset(ArgComp);
ReadLn(ArgComp, Dummy);
ReadLn(ArgComp, Dummy);
end;
end;

```



```

LeuOK := True;
end;
end;
LeuOK := True;
begin
  IF TaguchiParam[Parametro] in [11,12] then
    begin
      IF CompType = 'ANTIROLL BAR' then
        end;
      end;
      LeuOK := True;
      begin
        IF TaguchiParam[Parametro] in [9,10] then
          begin
            IF CompType = 'TIRE' then
              end;
            end;
            LeuOK := True;
            begin
              IF TaguchiParam[Parametro] in [7,8] then
                begin
                  IF CompType = 'REBOUND BUMPER' then
                    end;
                  end;
                  LeuOK := True;
                  begin
                    IF TaguchiParam[Parametro] in [5,6] then
                      begin
                        IF CompType = 'JOUNCE BUMPER' then
                          end;
                        end;
                        LeuOK := True;

```

```

end.

end;
end;
end;
FloatToStr(TaguchiLevelScaling[Parametro,Nivel],ffixed,6,4);
:=
    Cell[Nivel+1, Parametro]
    TaguchiLevelType[Parametro, Nivel] := 0;
begin
    With SGI, TaguchiOpt do
begin
end
else
end
CloseFile(ArgComp);
end;
end;
FloatToStr(TaguchiLevelScaling[Parametro,Nivel],ffixed,6,4);
:=
    Cell[Nivel+1, Parametro]
    TaguchiLevelType[Parametro, Nivel] := 0;
begin
end
else
end
    Cell[Nivel+1, Parametro] := 'File';
    TaguchiLevelFile[Parametro, Nivel] := OpenF.FileName;
    TaguchiLevelType[Parametro, Nivel] := 1;
begin
If LeuOK then

```

1920  
1921  
1922  
1923  
1924  
1925  
1926  
1927  
1928  
1929  
1930  
1931  
1932  
1933  
1934  
1935  
1936  
1937  
1938  
1939  
1940  
1941  
1942  
1943  
1944  
1945  
1946  
1947  
1948  
1949  
1950  
1951  
1952  
1953  
1954  
1955  
1956  
1957  
1958  
1959  
1960  
1961  
1962  
1963  
1964  
1965  
1966  
1967  
1968  
1969  
1970  
1971  
1972  
1973  
1974  
1975  
1976  
1977  
1978  
1979  
1980  
1981  
1982  
1983  
1984  
1985  
1986  
1987  
1988  
1989  
1990  
1991  
1992  
1993  
1994  
1995  
1996  
1997  
1998  
1999  
2000  
2001  
2002  
2003  
2004  
2005  
2006  
2007  
2008  
2009  
2010  
2011  
2012  
2013  
2014  
2015  
2016  
2017  
2018  
2019  
2020  
2021  
2022  
2023  
2024  
2025  
2026  
2027  
2028  
2029  
2030  
2031  
2032  
2033  
2034  
2035  
2036  
2037  
2038  
2039  
2040  
2041  
2042  
2043  
2044  
2045  
2046  
2047  
2048  
2049  
2050  
2051  
2052  
2053  
2054  
2055  
2056  
2057  
2058  
2059  
2060  
2061  
2062  
2063  
2064  
2065  
2066  
2067  
2068  
2069  
2070  
2071  
2072  
2073  
2074  
2075  
2076  
2077  
2078  
2079  
2080  
2081  
2082  
2083  
2084  
2085  
2086  
2087  
2088  
2089  
2090  
2091  
2092  
2093  
2094  
2095  
2096  
2097  
2098  
2099  
2100