

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.

SÃO PAULO

2003

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.

Mensagem

*“Aquele que somente segue os outros estará sempre atrás”
(anônimo)*

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	1
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 (<i>DOWNHILL SIMPLEX METHOD</i>)	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 Esférica do Braço de Controle (Azul – medido / Vermelho – simulado)	30
Figura 3.11 – Espectro de Frequência das Acelerações Verticais Medidas na Junta Esférica do Braço de Controle (Azul – medido / Vermelho – simulado).....	31
Figura 4.1 – Trecho de Pista de Paralelepípedos Utilizado na Simulação de Aspereza .	34
Figura 4.2 – Trecho de Pista com Olhos de Gato à Esquerda Utilizado na Simulação de Capacidade de Absorção.....	34
Figura 4.3 – Trechos de Pista com Buracos de Maior Amplitude Utilizados na Simulação de Entrada de Batente	35
Figura 4.4 – Trecho de Pista com Vala de Chuva Seguida por Pista Plana Utilizado na 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 Aspereza	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 Batente	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 Aspereza	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 Batente	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 do método 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>Mc Pherson</i> com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados.....	70
Figura 7.4 – Batente da Suspensão Dianteira do Tipo <i>Mc Pherson</i> com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados.....	71
Figura 7.5 – Barra Estabilizadora da Suspensão Dianteira do Tipo <i>Mc Pherson</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 Batente 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 Batente 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 Sinal / Ruído 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 Sinal / Ruído 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 Sinal / Ruído 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 Torção	77
Tabela 8.1 – Tempos de Processamento Computacional 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 Sinal / Ruído dos Parâmetros de Otimização para o Caso de Variação de $\pm 10\%$	93
Tabela 8.13 – Diferenças Percentuais na Relação Sinal / Ruído dos Parâmetros de Otimização para o Caso de Variação de $\pm 20\%$	93
Tabela 8.14 – Diferenças Percentuais na Relação Sinal / Ruído 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 Sinal / Ruído Inferior a 2% para o Caso de Variação de $\pm 10\%$	94
Tabela 8.16 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação Sinal / Ruído Inferior a 2% para o Caso de Variação de $\pm 20\%$	94
Tabela 8.17 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação Sinal / Ruído Inferior a 2% para o Caso de Variação de $\pm 30\%$	94
Tabela 8.18 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação Sinal / Ruído Superior a 2% para o Caso de Variação de $\pm 10\%$	95

Tabela 8.19 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação Sinal / Ruído Superior a 2% para o Caso de Variação de $\pm 20\%$	95
Tabela 8.20 – Estudo dos Parâmetros de Otimização com Diferença da Relação Sinal / Ruído 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

β – Posição angular

$\dot{\beta}$ – Velocidade angular

η – Resultado individual de experimento da matriz ortogonal

λ – Constante característica do simplex

μE – 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_{AMORT} – Força de amortecimento

F_{MOLA} – 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 as 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 permitem 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, Vilela 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 obtida 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[®] (sigla em inglês para “Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems”, ou Análise Dinâmica Automática para Sistemas Mecânicos). O ADAMS[®] 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[®] 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 multicorpos 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[®]), 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 multicorpos 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[®]/Simulink[®].

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, não estando especificamente voltada à 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 arfagem 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 arfagem 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, Schmechtig 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 (FRANCESCHINI, 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

analiticamente 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 batente 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

Tabela 3.1 – Organização da Matriz de Influência

	Massas Valores (kg)	Inércias Valores (kg.m ²)	Excitações
Sistemas de Ligação			
Elementos de Restrição			

Os valores da matriz de influência nas colunas das massas são os cosenos 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 cosenos 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 cosenos diretores dos sistemas de coordenadas relativos dos sistemas de ligação excitados.

A convenção 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 convenção. 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 as siglas m_1 e m_2 referem-se às duas massas do sistema, SL_1 e SL_2 aos dois sistemas de ligação e exc_1 é a excitação do sistema.

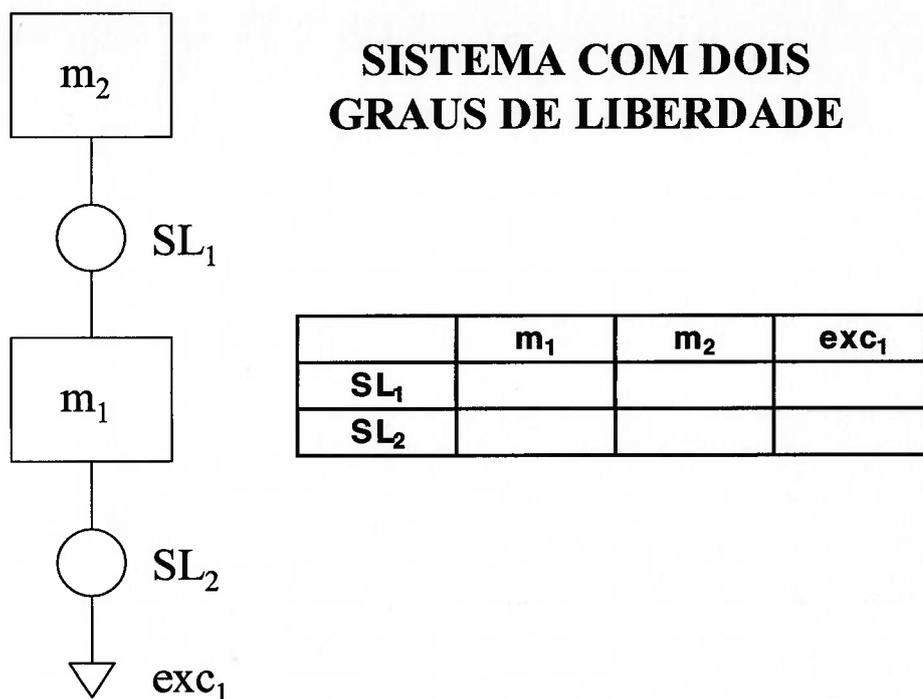


Figura 3.2 – Sistema com Dois Graus de Liberdade e Matriz de Influência Correspondente

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 obtém-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

Seguindo 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

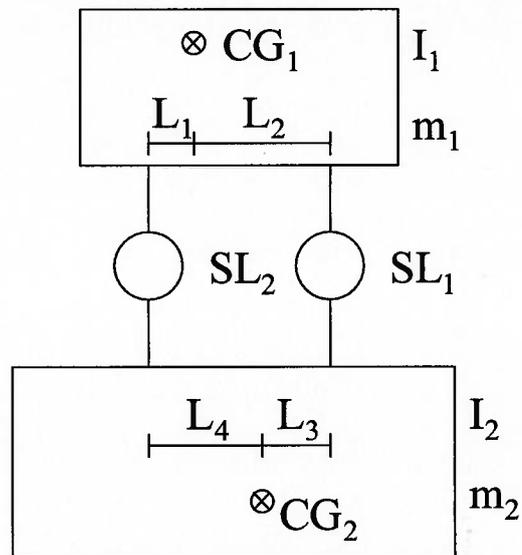


Figura 3.3 – Sistema com Quatro Graus de Liberdade Incluindo Rotações

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 11 graus de liberdade:

SISTEMA SIMPLIFICADO DE AUTOMÓVEL COM BARRA ESTABILIZADORA DIANTEIRA

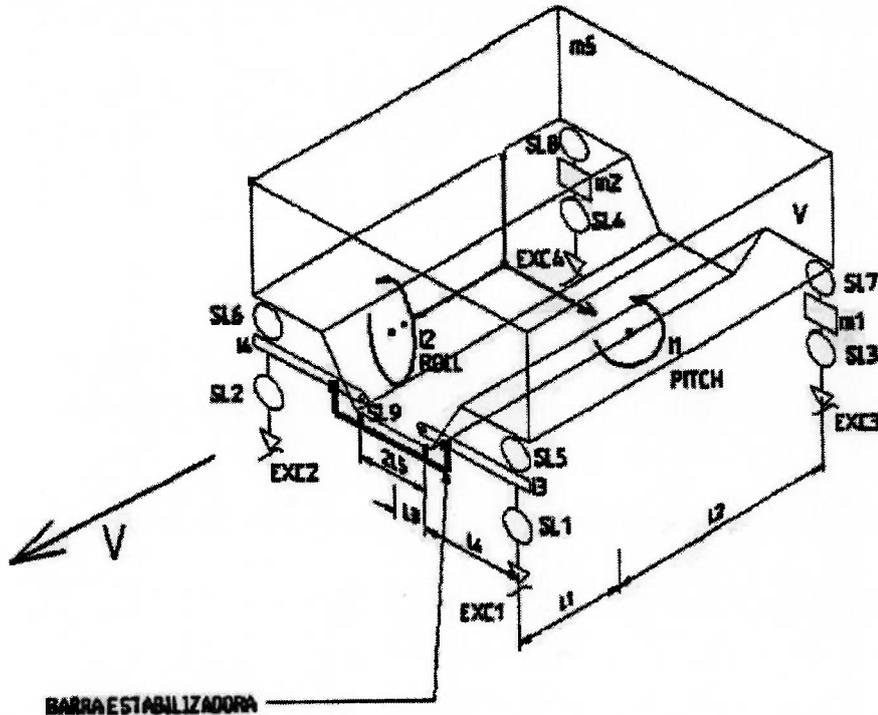


Figura 3.4 – Sistema Simplificado de um Veículo

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
SL₁	0	0	1	$-L_1$	L_3	L_4	0	-1	0	0	0
SL₂	0	0	1	$-L_1$	$-L_3$	0	$-L_4$	0	-1	0	0
SL₃	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
SL₄	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
SL₅	0	0	0	0	0	L_4	0	0	0	0	0
SL₆	0	0	0	0	0	0	L_4	0	0	0	0
SL₇	-1	0	1	L_2	L_3+L_4	0	0	0	0	0	0
SL₈	0	-1	1	L_2	$-L_3-L_4$	0	0	0	0	0	0
SL₉	0	0	0	0	1	L_4/L_5	$-L_4/L_5$	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:

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

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.

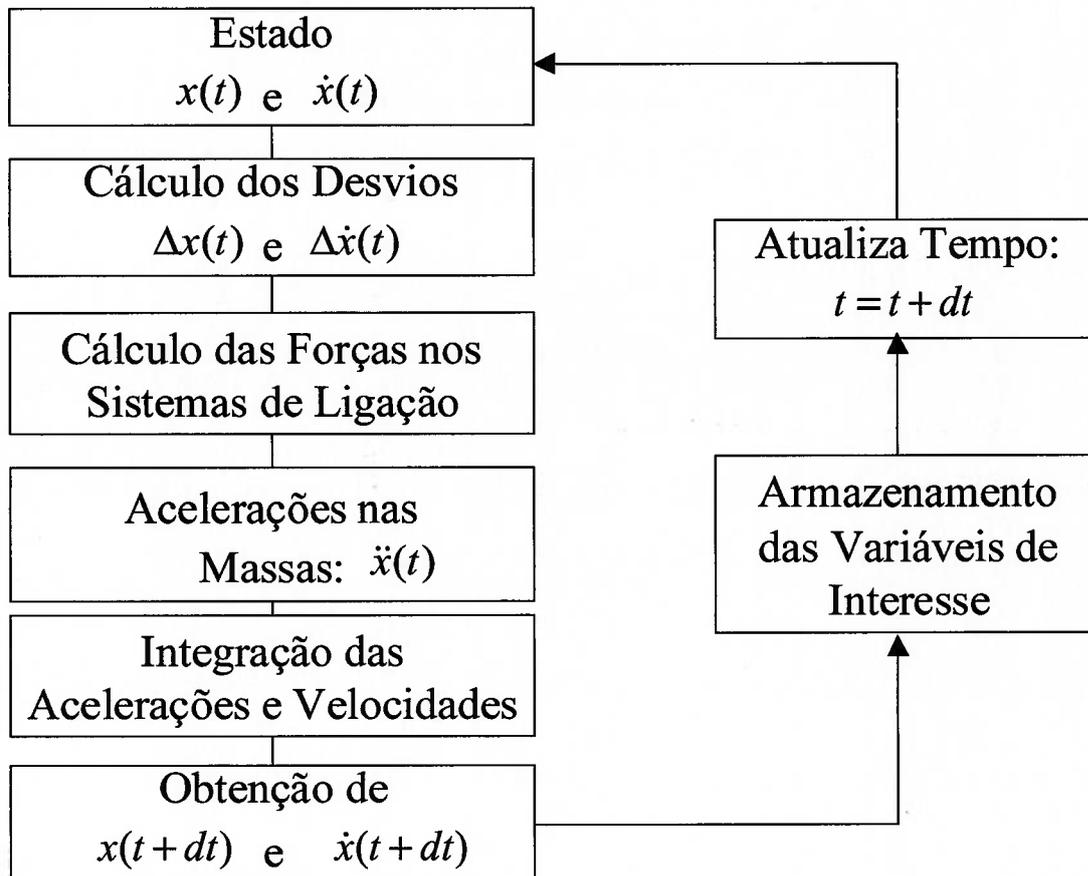


Figura 3.5 – Fluxograma Geral da Simulação Dinâmica do Veículo

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 :

$$\Delta x[i] = \sum_{j=1}^{N_M + N_I + N_{EX}} (Inf[i, j] x[j]) \quad (3.2)$$

$$\Delta \dot{x}[i] = \sum_{j=1}^{N_M + N_I + N_{EX}} (Inf[i, j] \dot{x}[j]) \quad (3.3)$$

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 :

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

onde $N_{SISTLIG}$ 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.

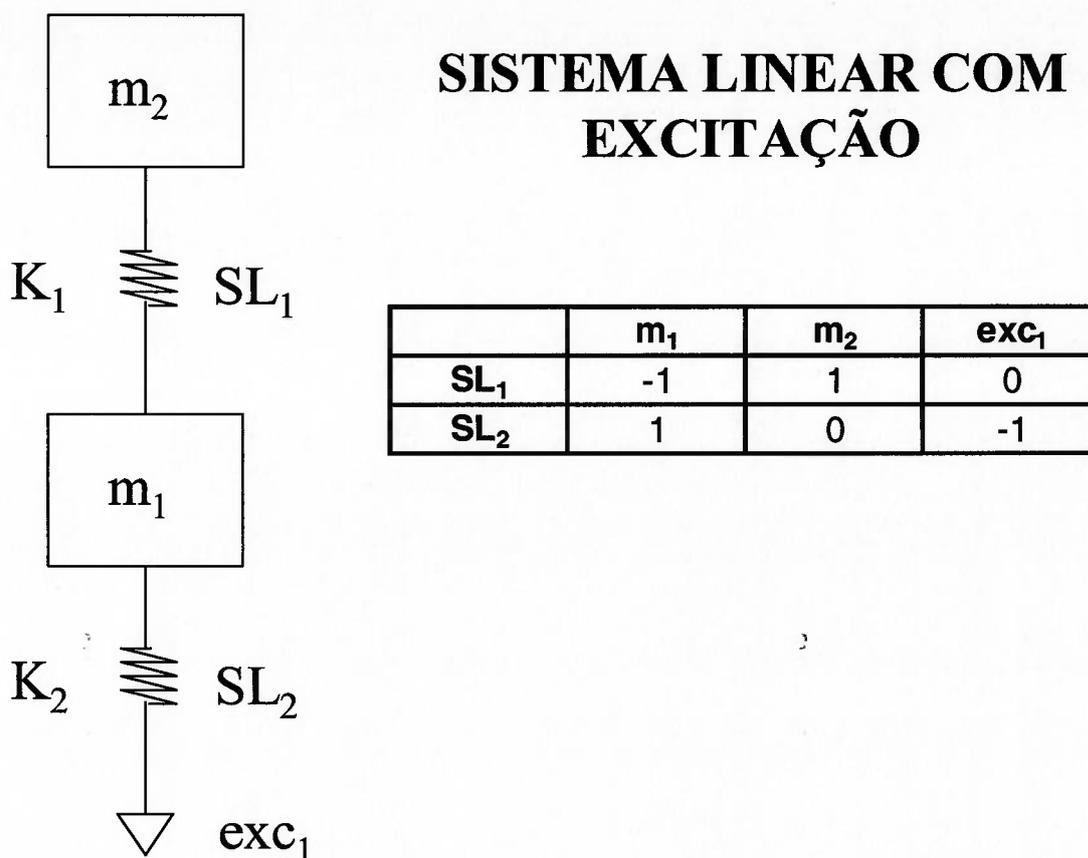


Figura 3.6 – Sistema Linear com Excitação e Matriz de Influência Respetiva

Seguindo-se os passos mostrados na seção 3.1, obtém-se o seguinte para os deslocamentos:

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

Da mesma forma, as velocidades resultam em:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{x}[1] &= -\dot{x}[1] + \dot{x}[2] \\ \Delta\dot{x}[2] &= \dot{x}[1] - \text{exc}[1]\end{aligned}\quad (3.6)$$

As forças nos sistemas de ligação ficam:

$$\begin{aligned}F_{SL}[1] &= K_1 \cdot \Delta x[1] \\ F_{SL}[2] &= K_2 \cdot \Delta x[2]\end{aligned}\quad (3.7)$$

E as forças nas massas:

$$\begin{aligned}F_M[1] &= -(Inf[1,1] \cdot F_{SL}[1] + Inf[2,1] \cdot F_{SL}[2]) \\ F_M[1] &= -((-1) \cdot F_{SL}[1] + 1 \cdot F_{SL}[2]) \\ F_M[1] &= K_1 \cdot \Delta x[1] - K_2 \cdot \Delta x[2] \\ F_M[2] &= -(Inf[1,2] \cdot F_{SL}[1] + Inf[2,2] \cdot F_{SL}[2]) \\ F_M[2] &= -(1 \cdot F_{SL}[1] + 0 \cdot F_{SL}[2]) \\ F_M[2] &= -K_1 \cdot \Delta x[1]\end{aligned}\quad (3.8)$$

O que leva às seguintes acelerações nas massas:

$$\begin{aligned}\ddot{x}[1] &= \frac{F_M[1]}{m_1} = \frac{K_1 \cdot \Delta x[1] - K_2 \cdot \Delta x[2]}{m_1} \\ \ddot{x}[1] &= \frac{K_1 \cdot (x[2] - x[1]) - K_2 \cdot (x[1] - \text{exc}[1])}{m_1} \\ \ddot{x}[2] &= \frac{F_M[2]}{m_2} = \frac{-K_1 \cdot \Delta x[1]}{m_2} \\ \ddot{x}[2] &= \frac{-K_1 \cdot (-x[1] + x[2])}{m_2} = \frac{K_1 \cdot (x[1] - x[2])}{m_2}\end{aligned}\quad (3.9)$$

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

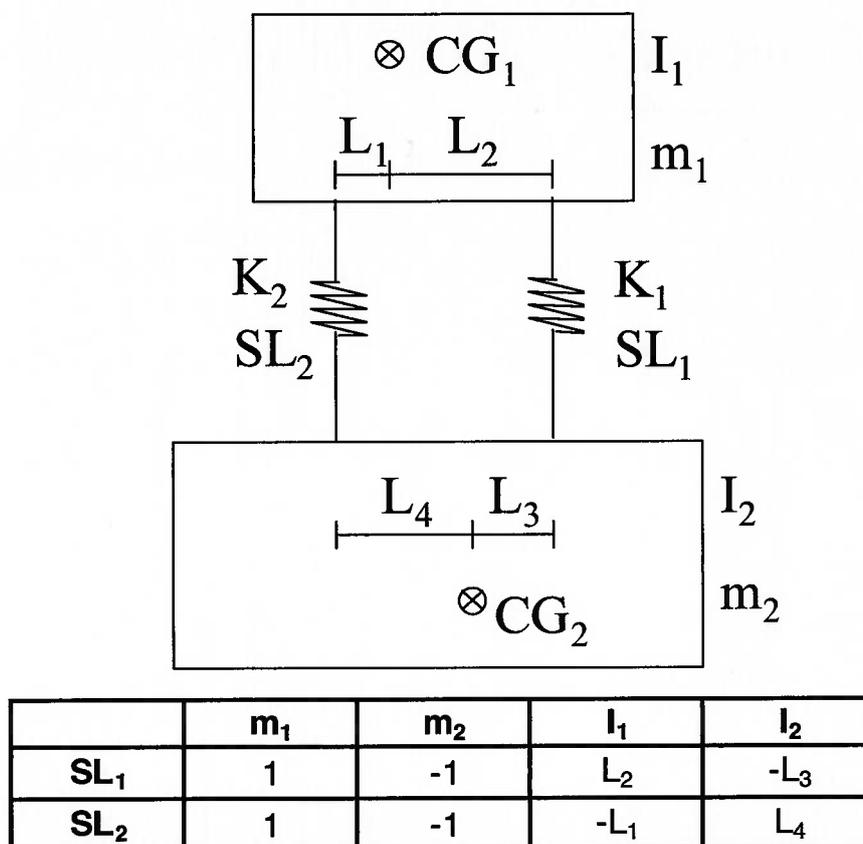


Figura 3.7 – Sistema Linear + Rotacional e Matriz de Influência Respectiva

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

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

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

$$\begin{aligned}
F_{SL}[1] &= K_1.\Delta x[1] \\
F_{SL}[2] &= K_2.\Delta x[2]
\end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned}
F_M[1] &= -(\text{Inf}[1,1].F_{SL}[1] + \text{Inf}[2,1].F_{SL}[2]) \\
F_M[1] &= -(1.F_{SL}[1] + 1.F_{SL}[2]) \\
F_M[1] &= -K_1.\Delta x[1] - K_2.\Delta x[2] \\
F_M[2] &= -(\text{Inf}[1,2].F_{SL}[1] + \text{Inf}[2,2].F_{SL}[2]) \\
F_M[2] &= -((-1).F_{SL}[1] + (-1).F_{SL}[2]) \\
F_M[2] &= K_1.\Delta x[1] + K_2.\Delta x[2]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_I[1] &= -(\text{Inf}[1,3].F_{SL}[1] + \text{Inf}[2,3].F_{SL}[2]) \\
T_I[1] &= -(L_2.F_{SL}[1] + (-L_1).F_{SL}[2]) \\
T_I[1] &= -L_2.K_1.\Delta x[1] + L_1.K_2.\Delta x[2]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_I[2] &= -(\text{Inf}[1,4].F_{SL}[1] + \text{Inf}[2,4].F_{SL}[2]) \\
T_I[2] &= -((-L_3)L_2.F_{SL}[1] + L_4.F_{SL}[2]) \\
T_I[2] &= L_3.K_1.\Delta x[1] - L_4.K_2.\Delta x[2]
\end{aligned} \tag{3.13}$$

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

Novamente os resultados obtidos são os mesmos que se obtém com a solução analítica do problema.

3.3. Correlação com Resultados Experimentais

Esta metodologia de simulação multicorpos 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

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 (Celta 3 portas).

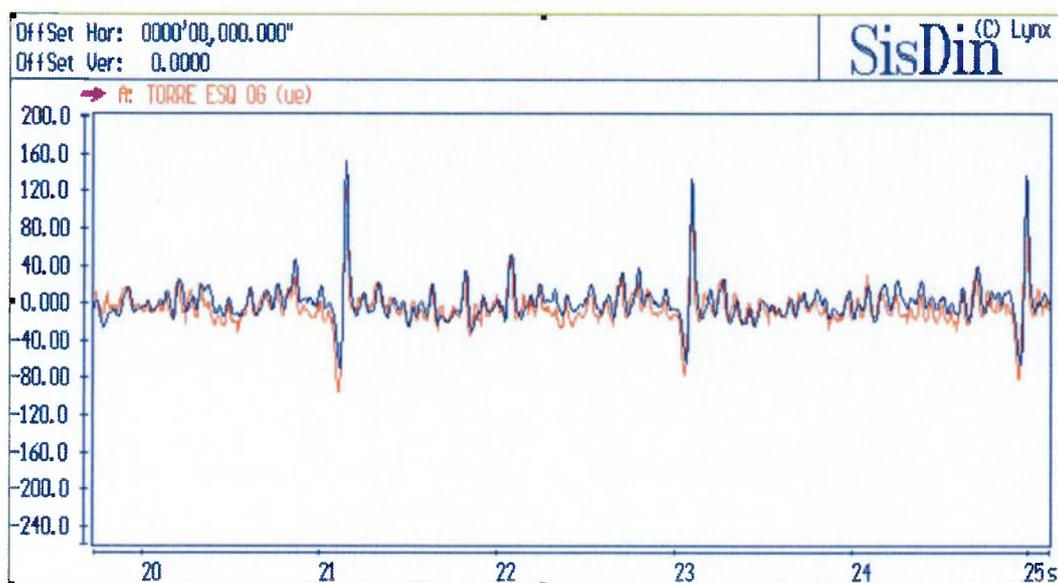


Figura 3.8 – Forças Medidas na Torre do Amortecedor Dianteiro
(Azul – medido / Vermelho – simulado)

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

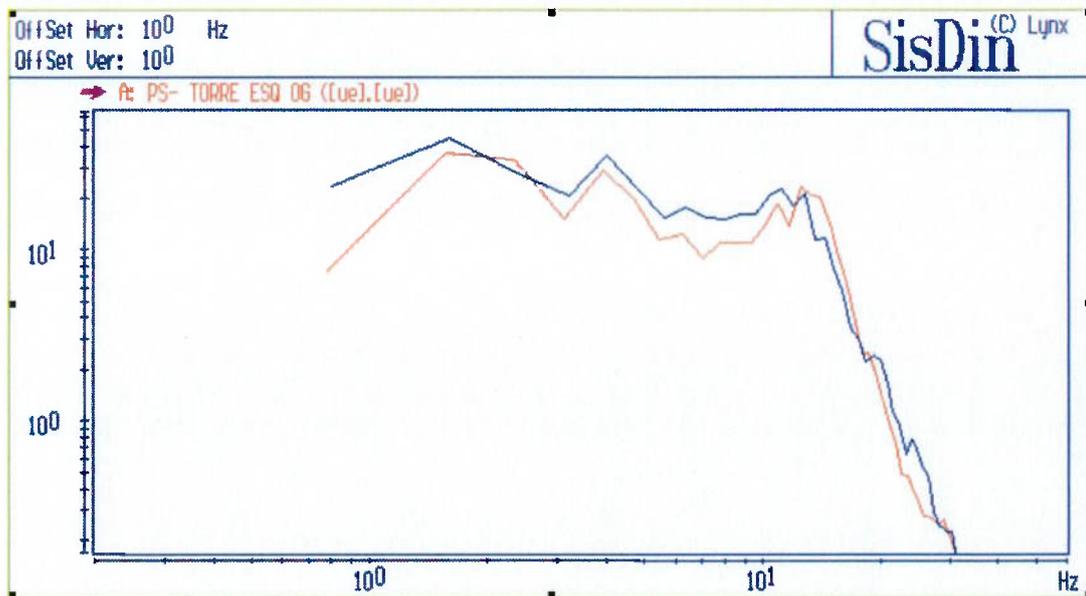


Figura 3.9 - Espectro de Freqüência das Forças Medidas na Torre do Amortecedor Dianteiro (Azul – medido / Vermelho – simulado)

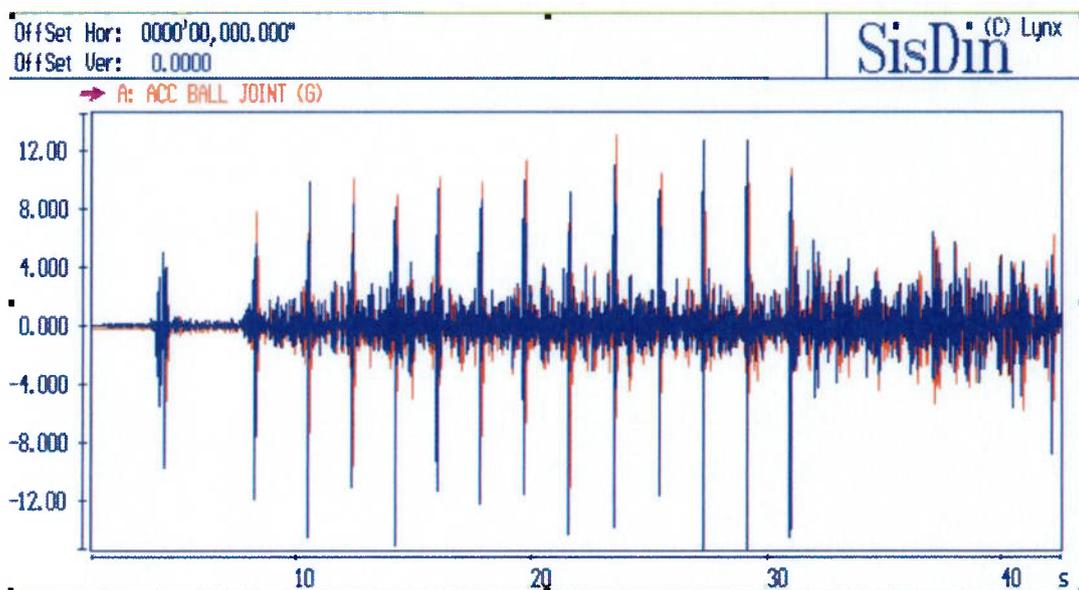


Figura 3.10 – Acelerações Verticais Medidas na Junta Esférica do Braço de Controle (Azul – medido / Vermelho – simulado)

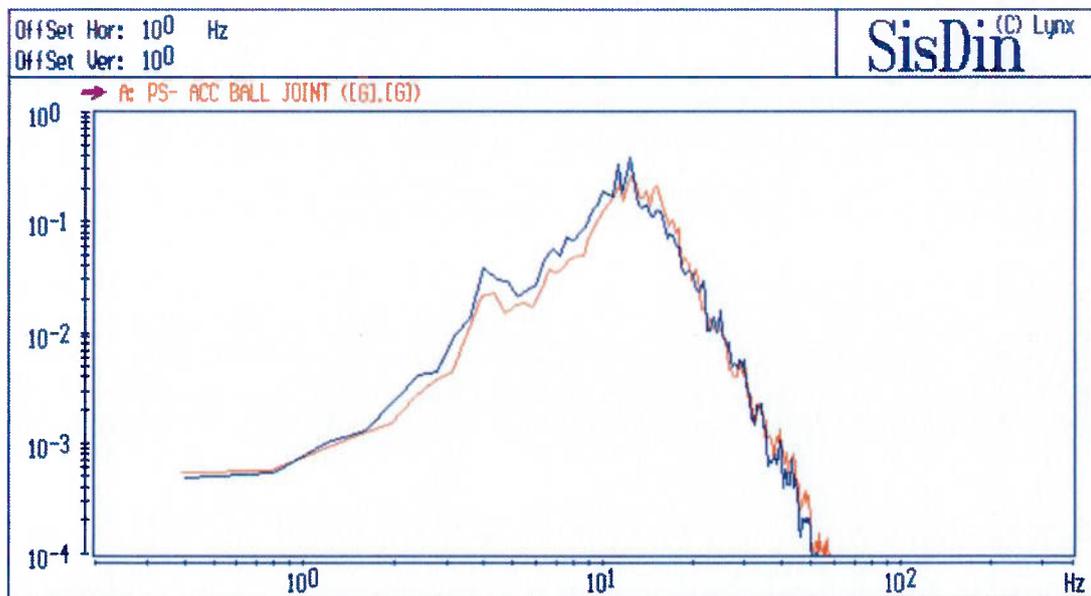


Figura 3.11 – Espectro de Frequência das Acelerações Verticais Medidas na Junta Esférica do Braço de Controle (Azul – medido / Vermelho – simulado)

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:

- *Aspereza*: 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 Batente*: reflete o comportamento do veículo quando passando por obstáculos maiores (amplitude superior a 50 mm), como buracos ou valas, no tocante ao impacto do batente de compressão da suspensão que é sentido pelo motorista.
- *Balanço*: avalia o comportamento do veículo em relação à estabilidade rotacional em torno do eixo lateral (eixo Y – movimentação de arfagem), 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 (aspereza, 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:

- *Aspereza*: 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 (as fotos são do Campo de Provas de Cruz Alta em Indaiatuba-SP e a excitação de pista utilizada na simulação reflete exatamente os trechos em questão).



Figura 4.1 – Trecho de Pista de Paralelepípedos Utilizado na Simulação de Aspereza



Figura 4.2 – Trecho de Pista com Olhos de Gato à Esquerda Utilizado na Simulação de Capacidade de Absorção



Figura 4.3 – Trechos de Pista com Buracos de Maior Amplitude Utilizados na Simulação de Entrada de Batente



Figura 4.4 – Trecho de Pista com Vala de Chuva Seguida por Pista Plana Utilizado na Simulação de Balanço

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:

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

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

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

- 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.

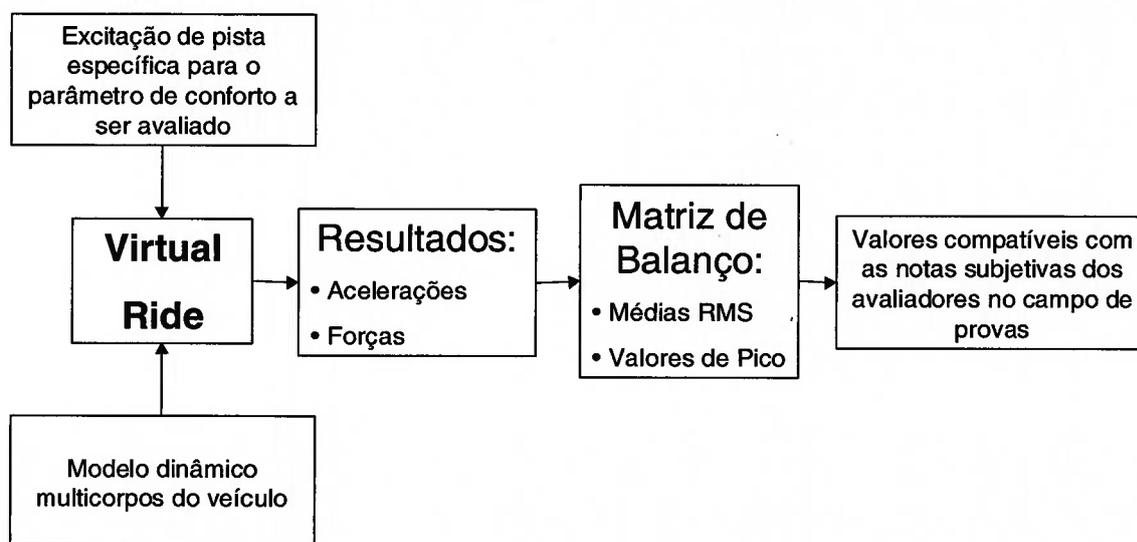


Figura 4.5 – Esquema Geral de Funcionamento - Virtual Ride

Utilizando-se esta metodologia, torna-se possível a obtenção de “notas” compatíveis com as avaliações subjetivas a partir das variáveis objetivas 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).

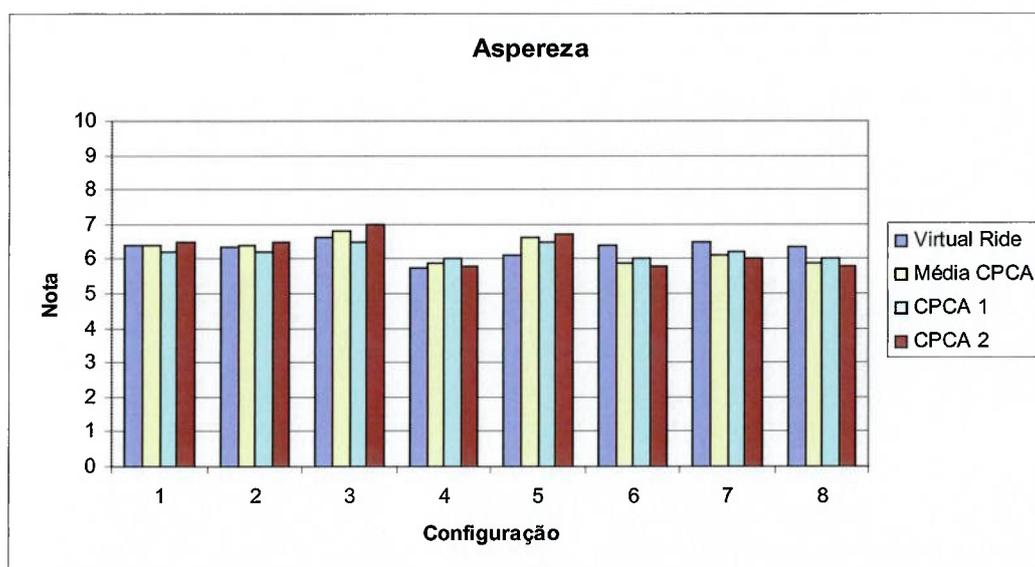


Figura 4.6 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Aspereza

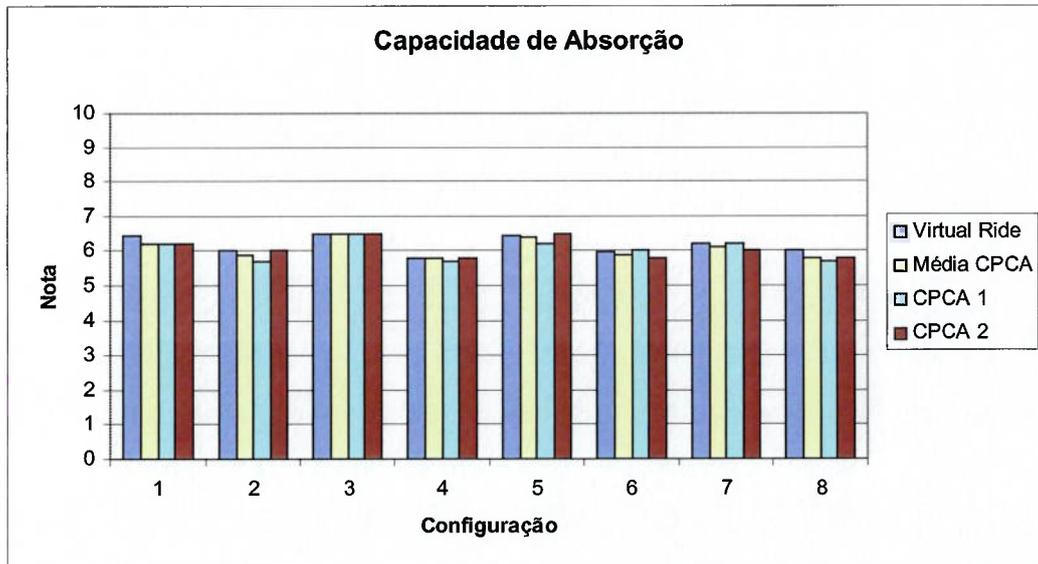


Figura 4.7 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Capacidade de Absorção

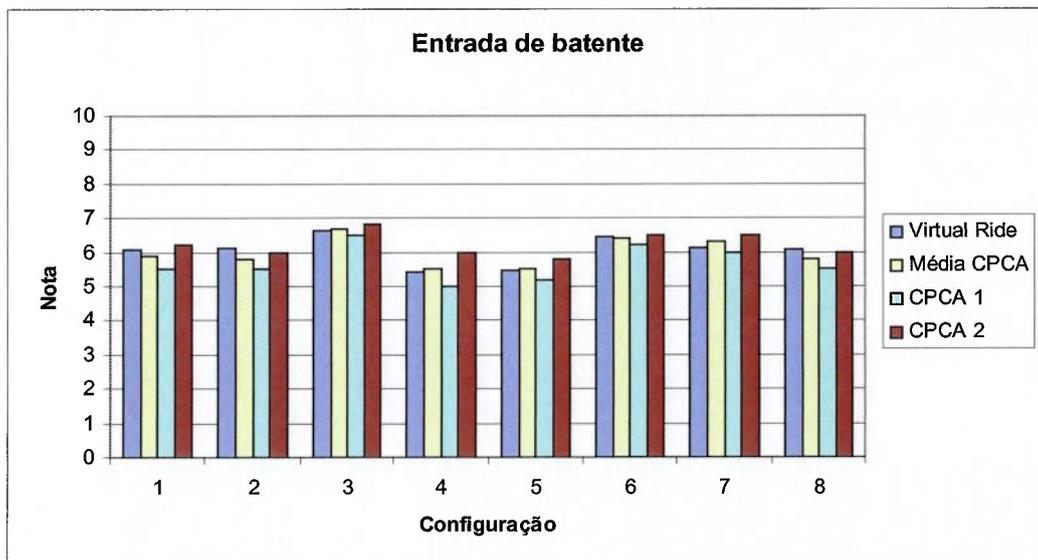


Figura 4.8 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Entrada de Batente

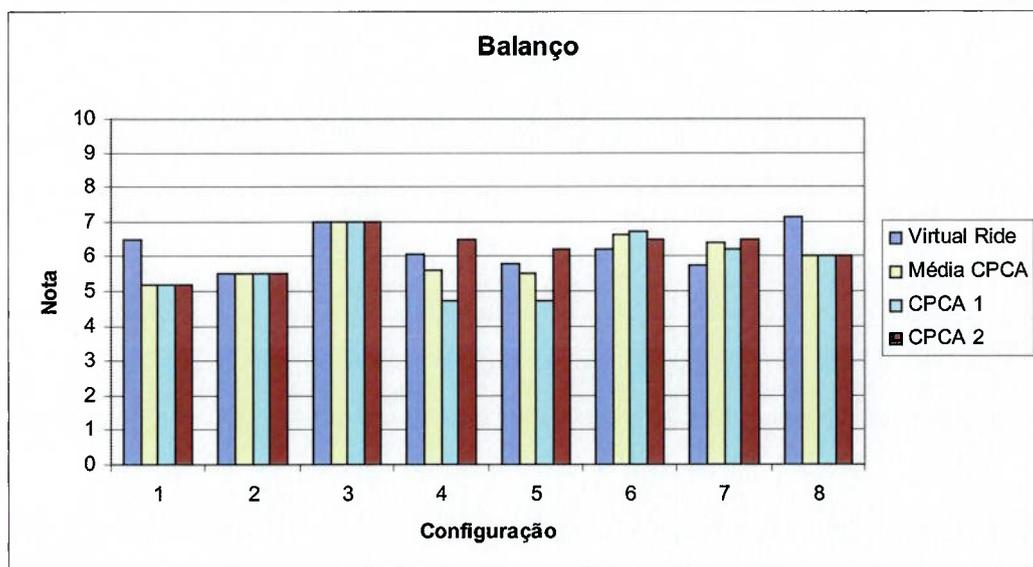


Figura 4.9 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Balanço

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 sedã 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 conduzem 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.

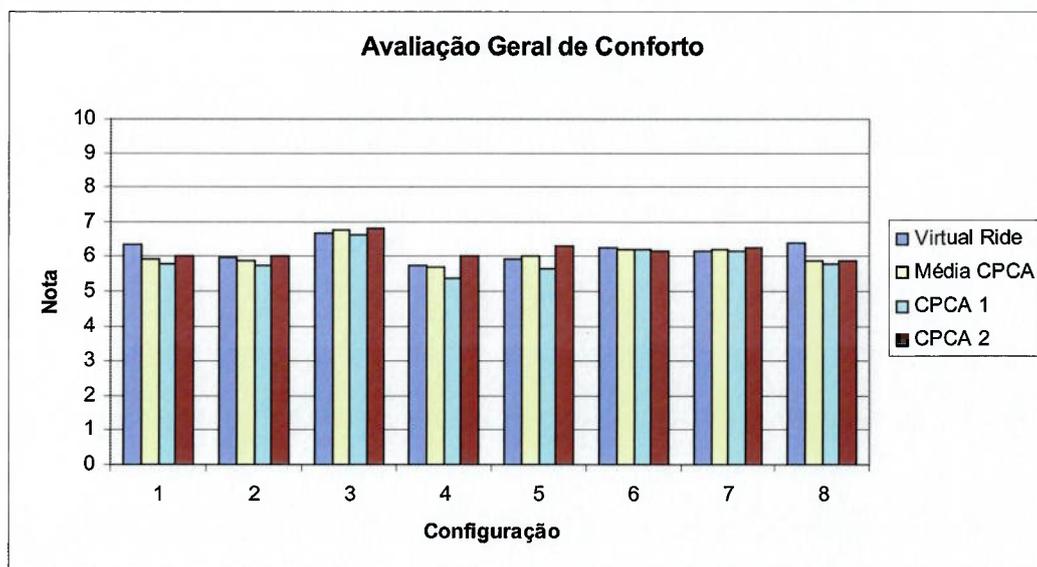


Figura 4.10 – Correlação Geral de Conforto Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas

4.2. Variação Nas Avaliações Subjetivas e Precisão dos

Resultados

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.

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:

- 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

resultados (equivalência esta que não existe no algoritmo de otimização, porém é utilizada na interpretação dos resultados).

- Duas configurações distintas (diferentes componentes de suspensão por exemplo) que apresentem diferença menor ou igual a 0,3 na avaliação geral de conforto são consideradas idênticas em termos de performance em conforto.

Tabela 4.1 – Variação Observada nas Avaliações Subjetivas

Config.	Aspereza				Capacidade de Absorção				Entrada de Batente				Balanço				Conforto Global			
	Av.1	Av.2	Média	Desvio Padrão	Av.1	Av.2	Média	Desvio Padrão	Av.1	Av.2	Média	Desvio Padrão	Av.1	Av.2	Média	Desvio Padrão	Av.1	Av.2	Média	Desvio Padrão
1	6,2	6,5	6,4	0,2	6,2	6,2	6,2	0,0	5,5	6,2	5,9	0,5	5,2	5,2	5,2	0,0	6,0	6,2	6,1	0,1
2	6,2	6,5	6,4	0,2	5,7	6,0	5,9	0,2	5,5	6,0	5,8	0,4	5,5	5,5	5,5	0,0	6,0	6,0	6,0	0,0
3	6,5	7,0	6,8	0,4	6,5	6,5	6,5	0,0	6,5	6,8	6,7	0,2	7,0	7,0	7,0	0,0	7,2	7,0	7,1	0,1
4	6,0	5,8	5,9	0,1	5,7	5,8	5,8	0,1	5,0	6,0	5,5	0,7	4,7	6,5	5,6	1,3	5,2	6,0	5,6	0,6
5	6,5	6,7	6,6	0,1	6,2	6,5	6,4	0,2	5,2	5,8	5,5	0,4	4,7	6,2	5,5	1,1	5,5	5,8	5,7	0,2
6	6,0	5,8	5,9	0,1	6,0	5,8	5,9	0,1	6,2	6,5	6,4	0,2	6,7	6,5	6,6	0,1	7,0	6,5	6,8	0,4
7	6,2	6,0	6,1	0,1	6,2	6,0	6,1	0,1	6,0	6,5	6,3	0,4	6,2	6,5	6,4	0,2	6,0	6,5	6,3	0,4
8	6,0	5,8	5,9	0,1	5,7	5,8	5,8	0,1	5,5	6,0	5,8	0,4	6,0	6,0	6,0	0,0	5,7	6,0	5,9	0,2
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.

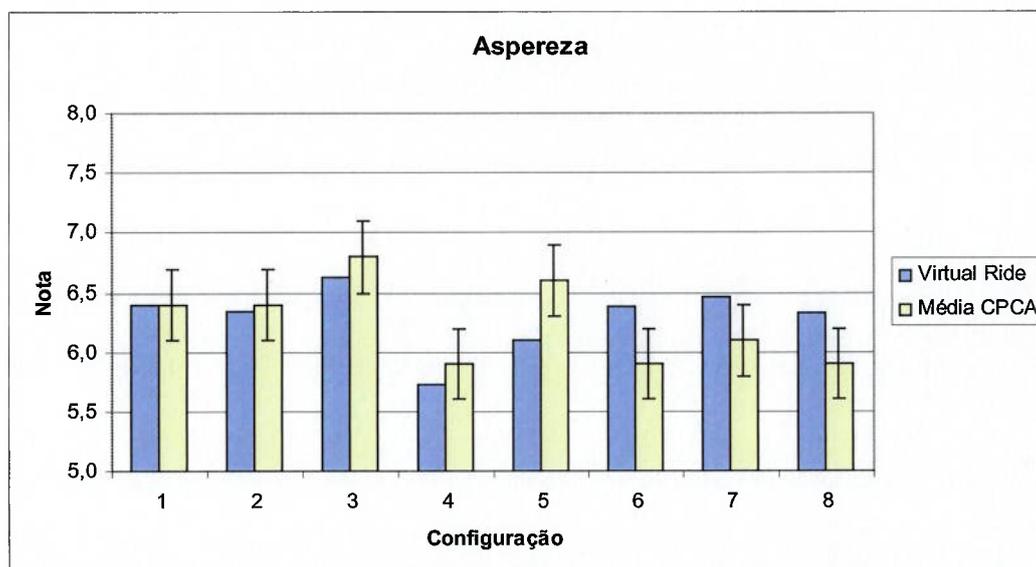


Figura 4.11 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Aspereza

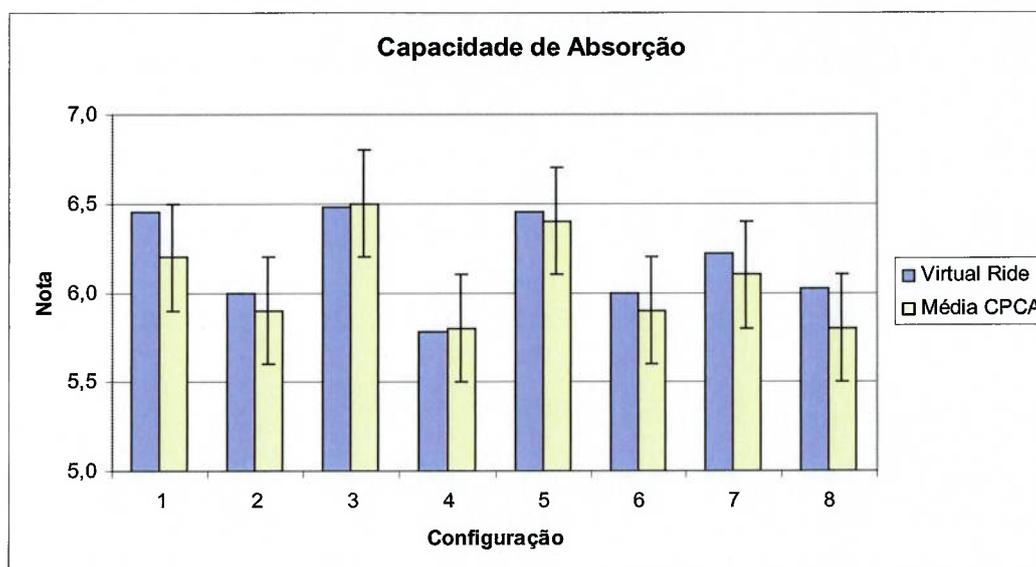


Figura 4.12 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Capacidade de Absorção

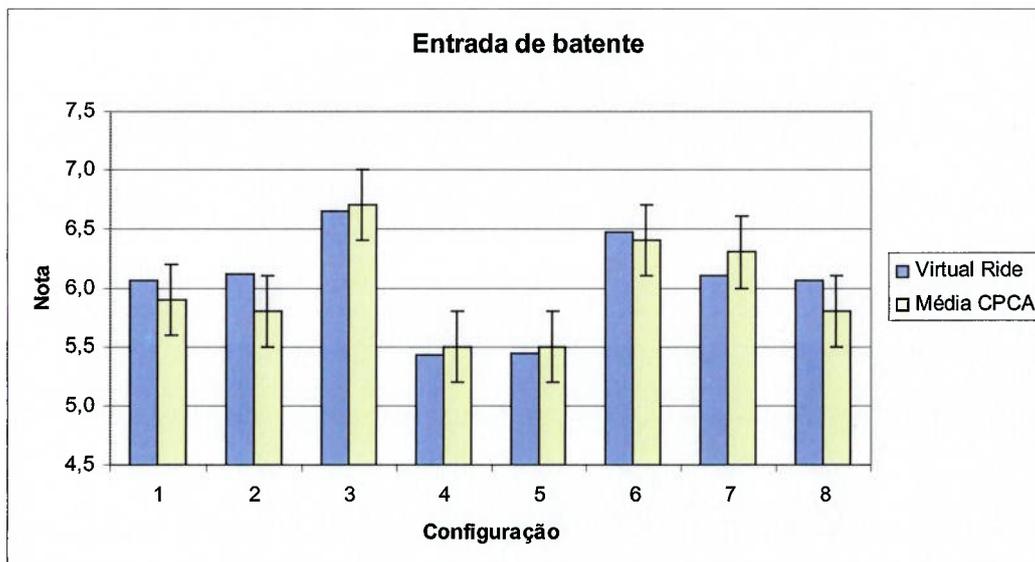


Figura 4.13 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Entrada de Batente

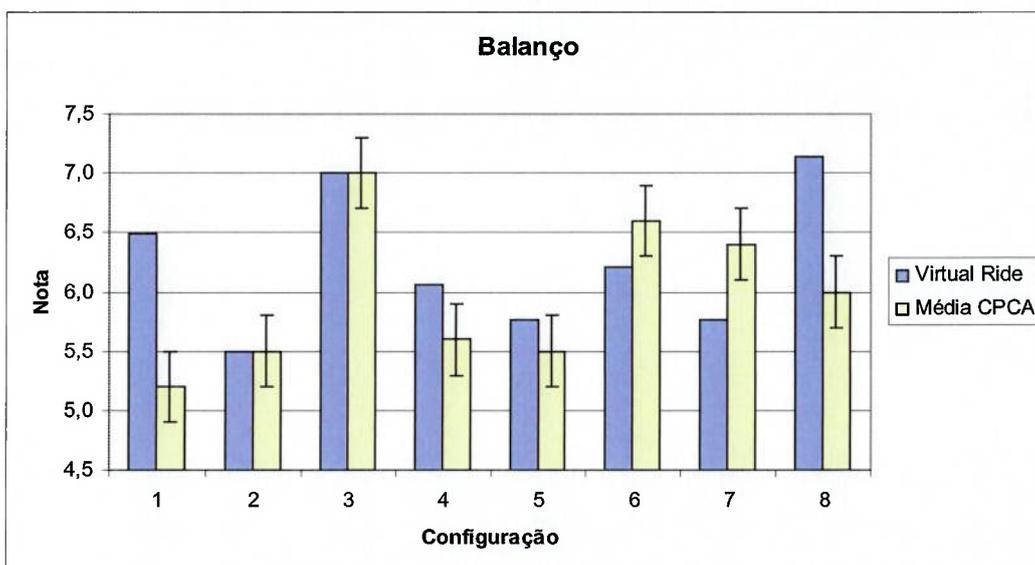


Figura 4.14 – Correlação Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas Para Balanço

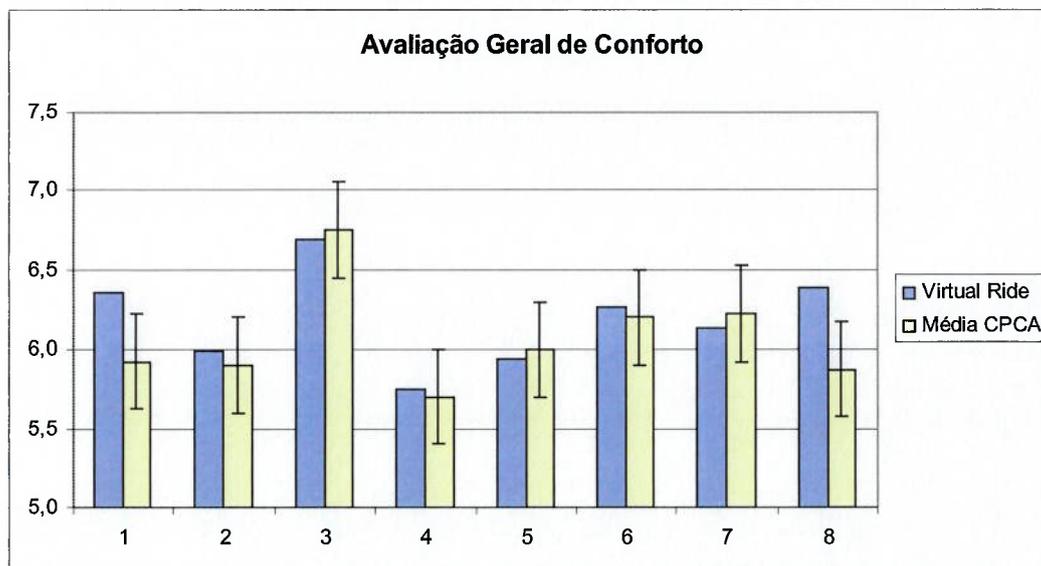


Figura 4.15 – Correlação Geral de Conforto Entre os Resultados do Virtual Ride e os Resultados Avaliados em Campo de Provas

Capítulo 5 - Método Simplex

Descendente (*Downhill Simplex Method*)

Este método, assim como a maioria dos outros utilizados para otimização de funções, 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 (algébrica) 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 análoga 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 λ_i é uma constante relativa à estimativa da escala característica do problema, podendo também ser utilizados diferentes λ_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-degeratividade. 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,

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

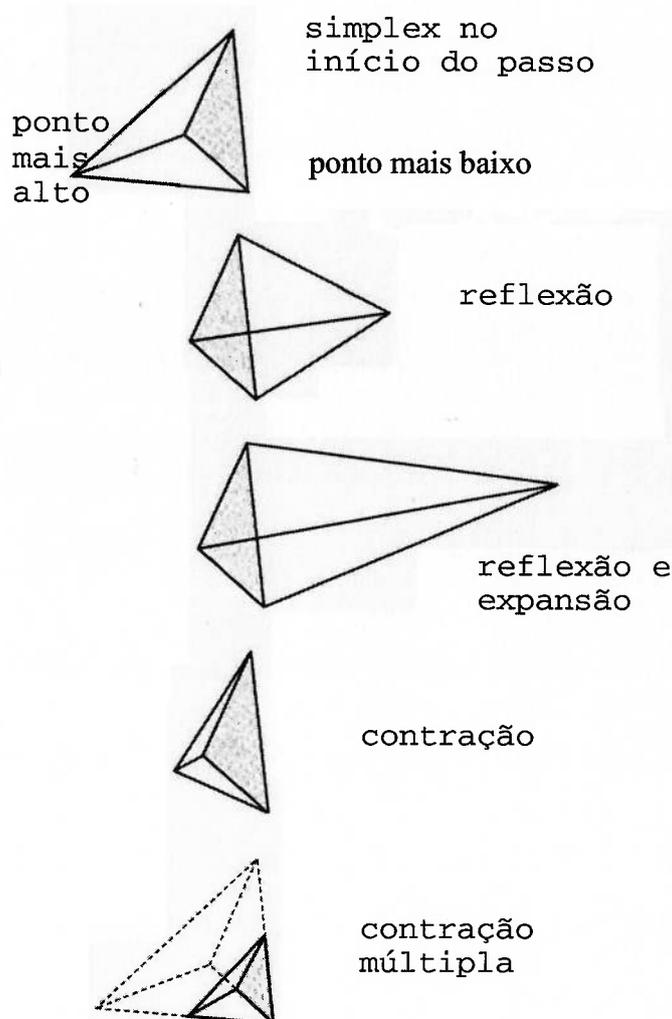


Figura 5.1 – Movimentos possíveis para um simplex (PRESS, 1992)

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*.

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 $f(x,y)$:

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

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, redefine-se a função da seguinte forma:

$$f(x, y) = \sin(x) + \sin(y) + \left(\frac{x}{5}\right)^2 + \left(\frac{y}{5}\right)^2, \text{ quando } x \in [-10, 10] \text{ e } y \in [-10, 10] \quad (5.3)$$

$$f(x, y) = 100, \text{ quando } x \notin [-10, 10] \text{ ou } y \notin [-10, 10]$$

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.

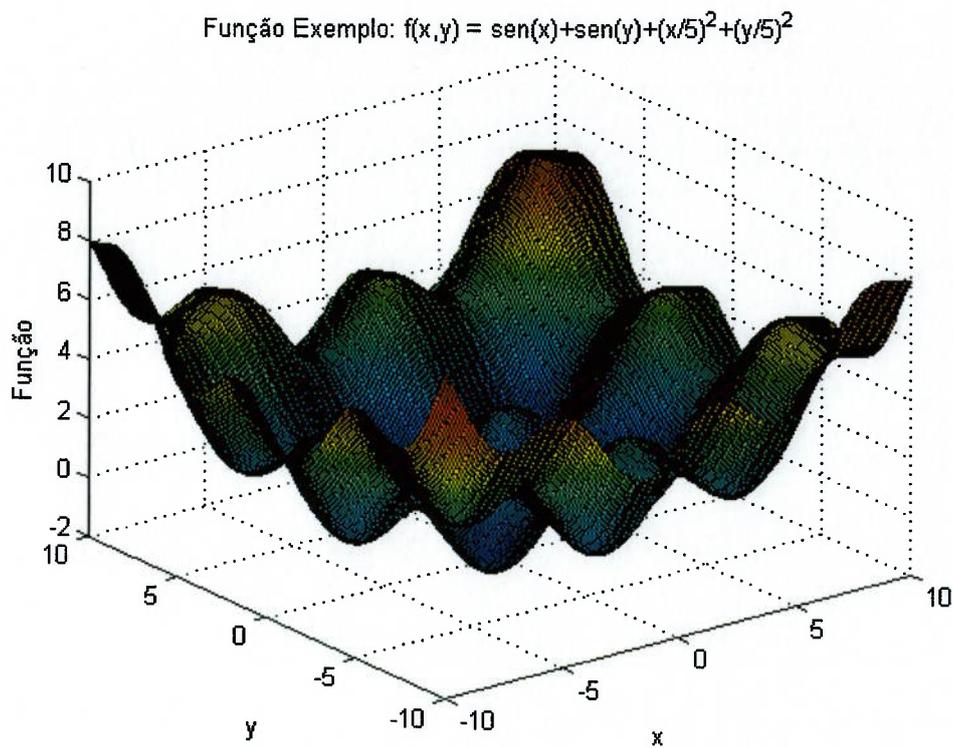


Figura 5.2 – Função usada para estudo do método de simplex descendente

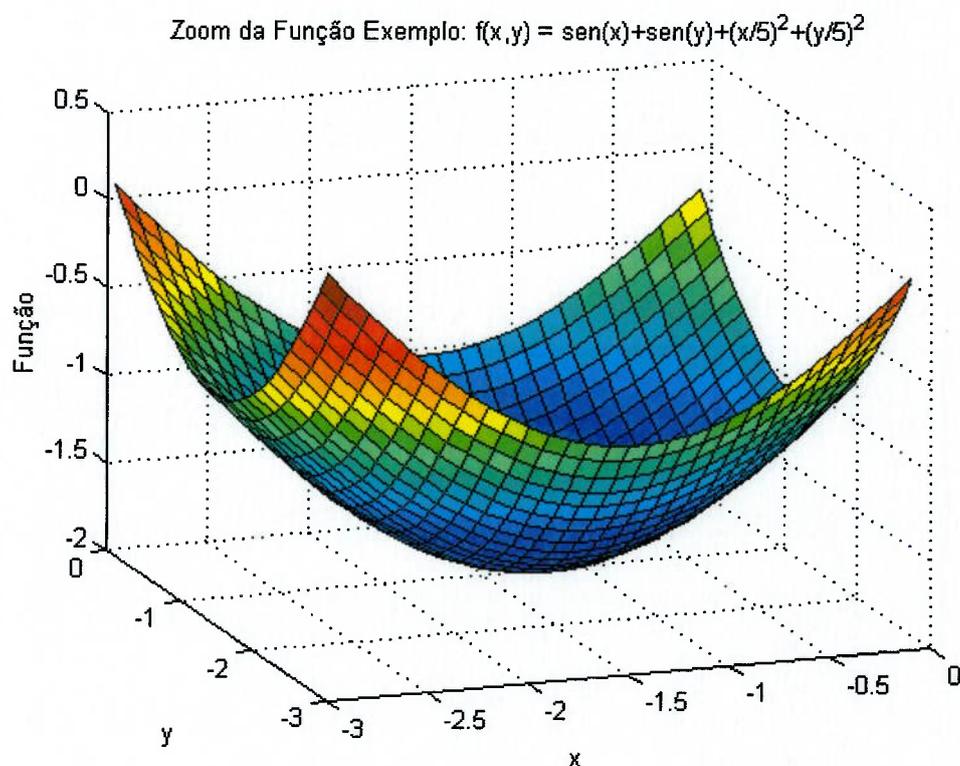


Figura 5.3 – Ampliação da função usada para estudo do método de simplex descendente na área de mínimo global

Definindo-se a tolerância $\text{tol} = 0,001$, o método do simplex convergente converge 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).

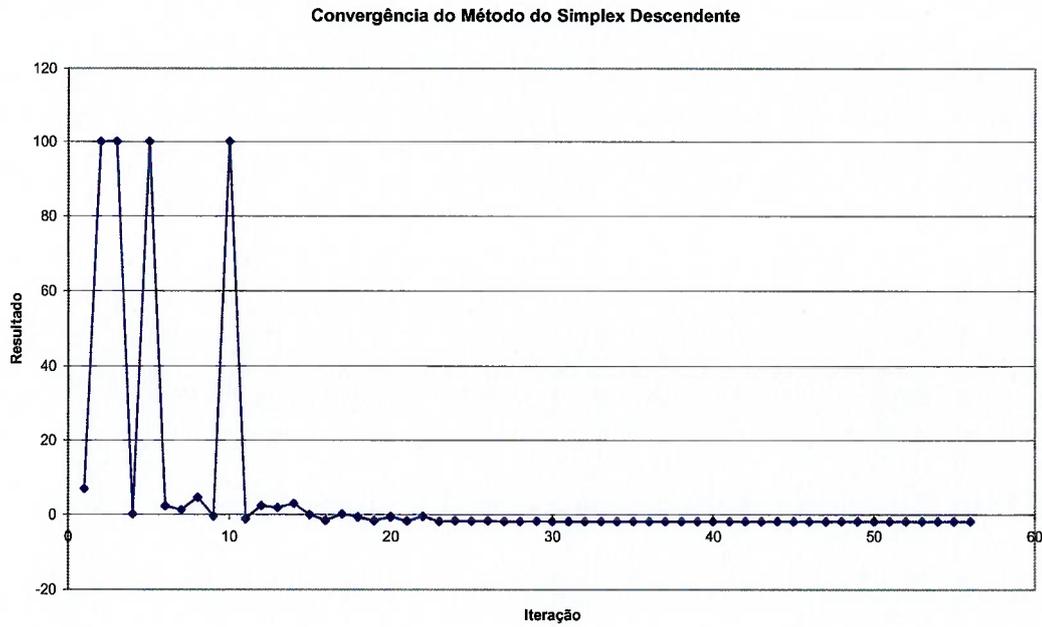


Figura 5.4 – Convergência do Método do Simplex Descendente para o Exemplo Criado

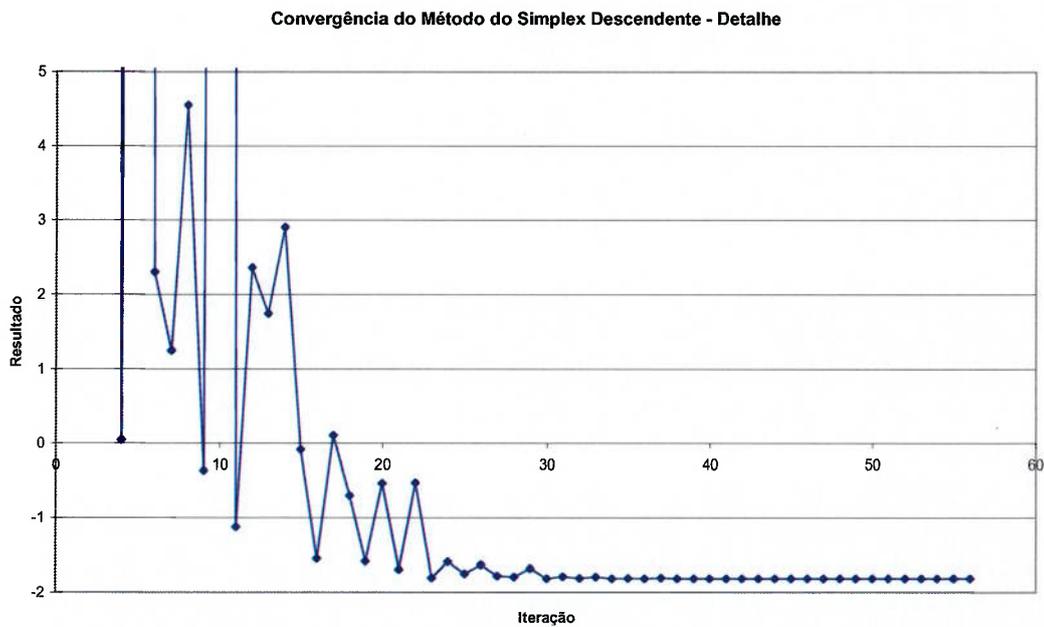


Figura 5.5 – Detalhe do Gráfico de Convergência do Método do Simplex Descendente para o Exemplo Criado

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;

- 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.

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.

6.1. Definição do Parâmetro de Ruído

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.

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.

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

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).

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.

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.

6.2. Matriz de Experimentos

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.

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

de otimização, bastando escolher a configuração com o melhor resultado. De toda forma, experimentos fatoriais somente 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)				Resultado
	Mola	Amortecedor	Batente	Pressão do 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 η_1, \dots, η_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:

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

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:

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

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 η_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:

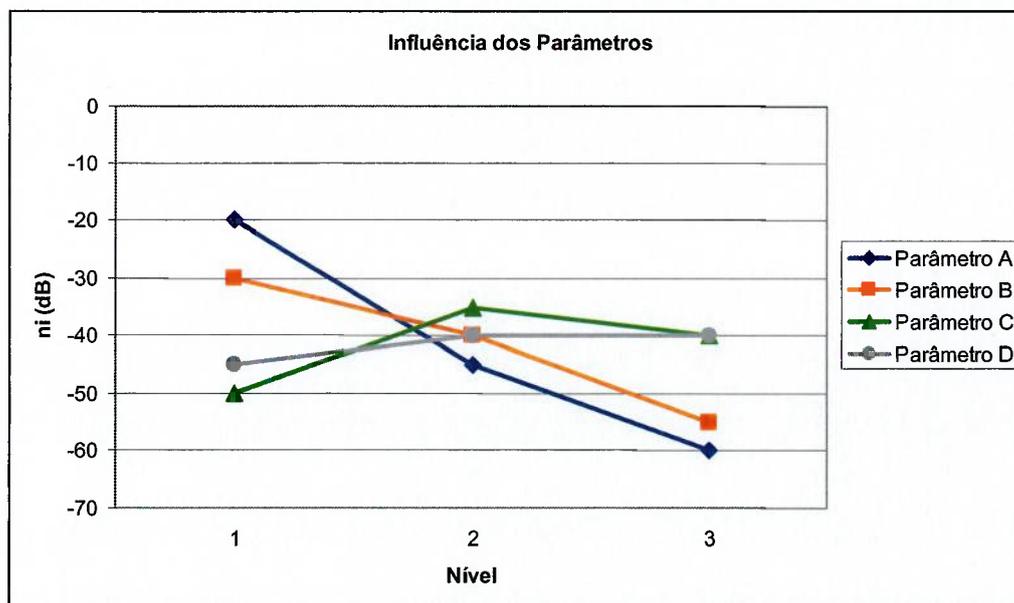


Figura 6.1 – Gráfico de Influência dos Diversos Parâmetros de Controle nos Níveis Considerados para a Otimização

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 está sendo empregada simulação computacional, torna-se mais prático avaliar o resultado desta configuração ótima diretamente através de uma outra avaliação por simulação.

6.4. Consideração dos Parâmetros de Ruído

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

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 η denota o nível de ruído considerado na avaliação.

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, obtém-se:

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

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

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*), obtém-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 Vazio	Resultado Carregado
	Mola	Amortecedor	Pressão dos Pneus		
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				
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

	Mola	Amortecedor	Pressão dos Pneus
nível 1	14.00	13.64	13.74
nível 2	13.44	13.81	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.

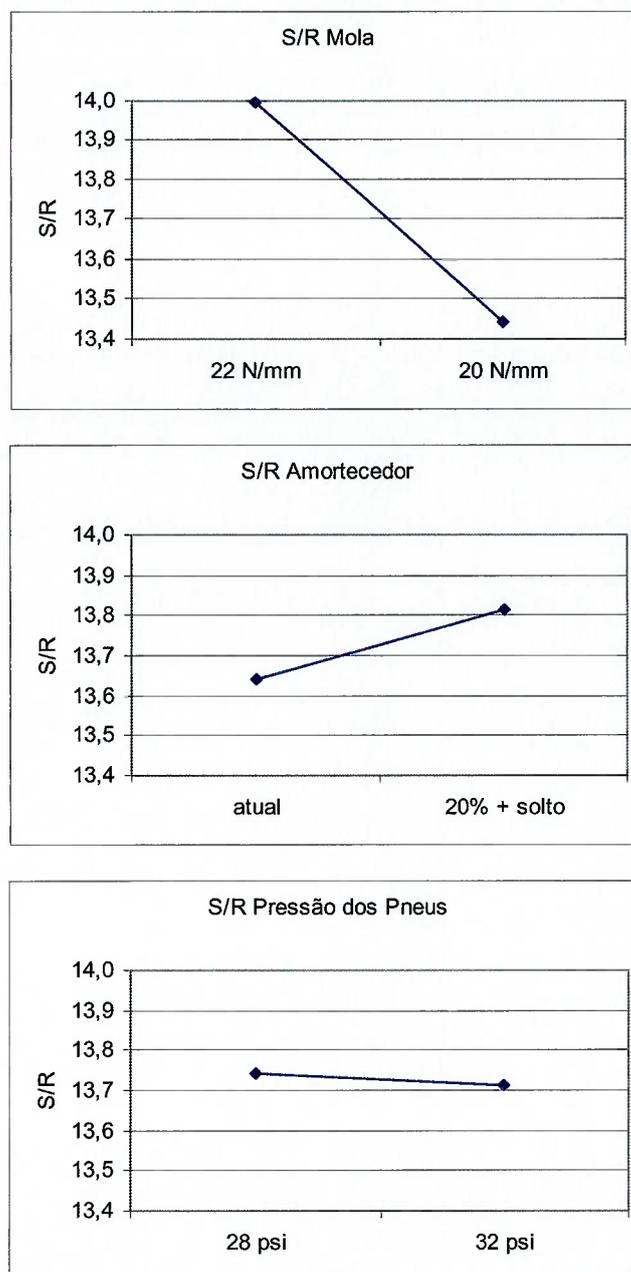


Figura 6.2 – Representação Gráfica da Relação S/R dos Parâmetros de Controle

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.

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

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 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
Ótimo	22 N/mm	20% + solto	28 psi	7,10	5,87	6,49	11,13

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

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

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

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.

Tabela 7.2 – Dados do Conjunto Motor/Transmissão

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

A dinâmica da suspensão dianteira (tipo *Mc Pherson*) 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

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*.

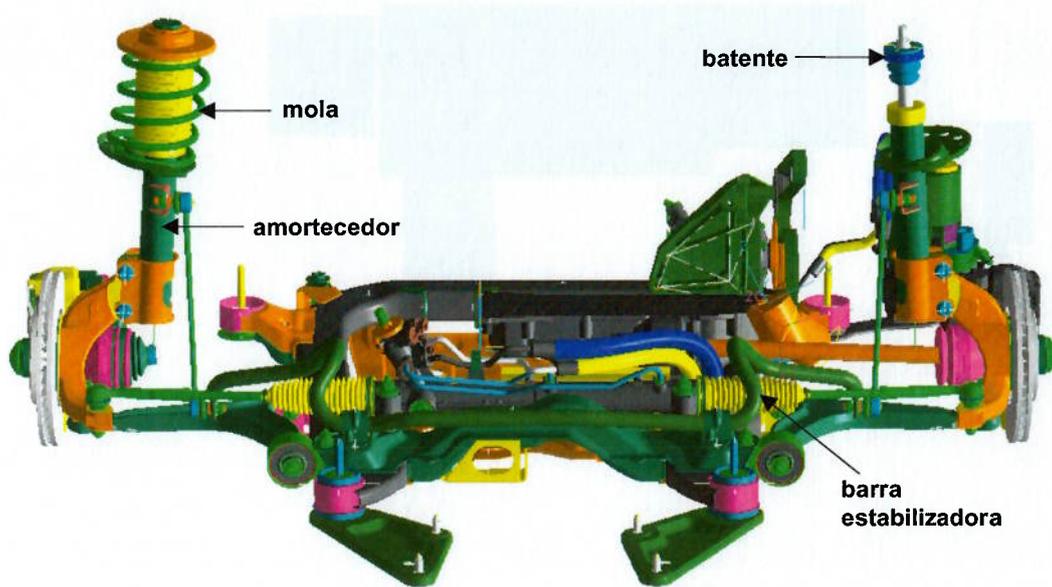


Figura 7.1 – Suspensão Dianteira do Tipo *Mc Pherson* com Componentes Dinâmicos Modelados

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

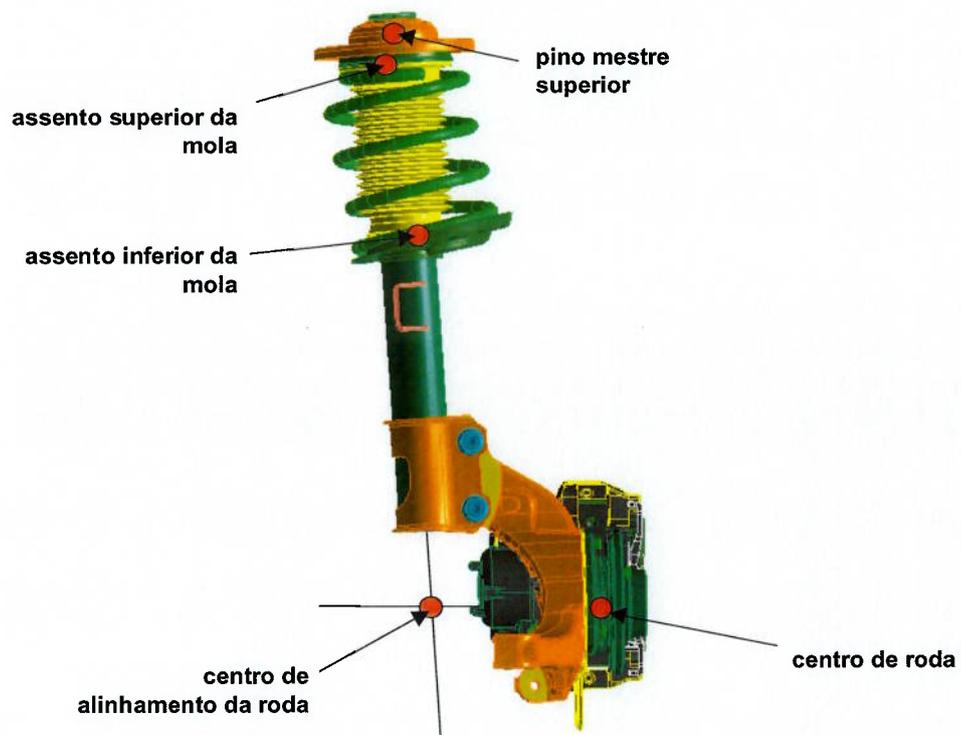


Figura 7.2 – Perna da Suspensão Dianteira do Tipo *Mc Pherson* com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados

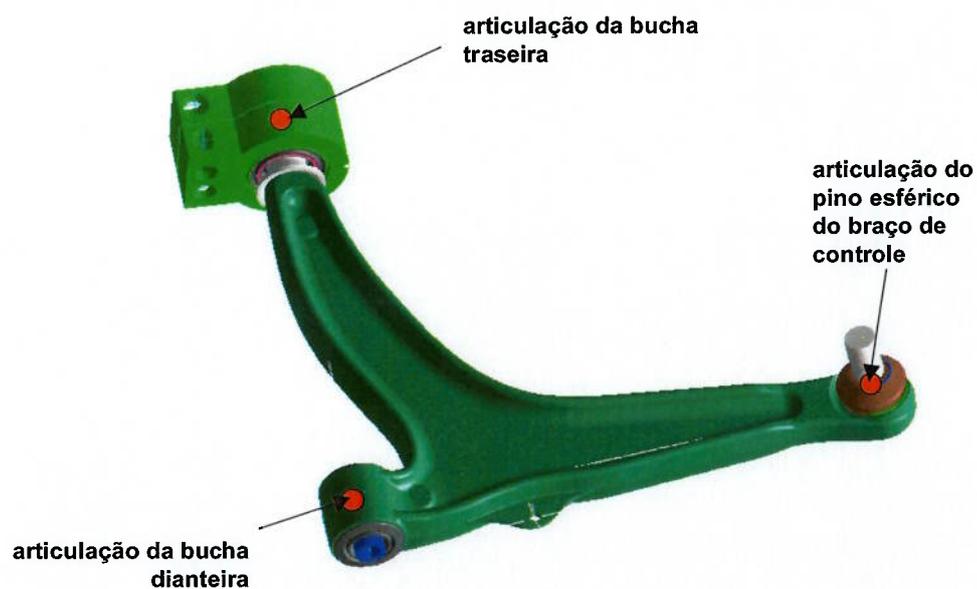


Figura 7.3 – Braço de Controle da Suspensão Dianteira do Tipo *Mc Pherson* com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados

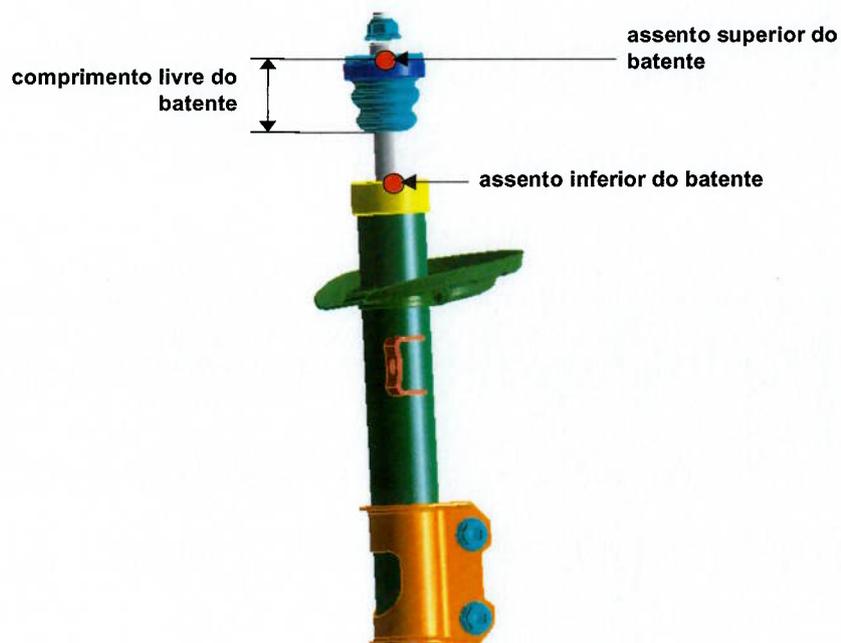


Figura 7.4 – Batente da Suspensão Dianteira do Tipo *Mc Pherson* com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados

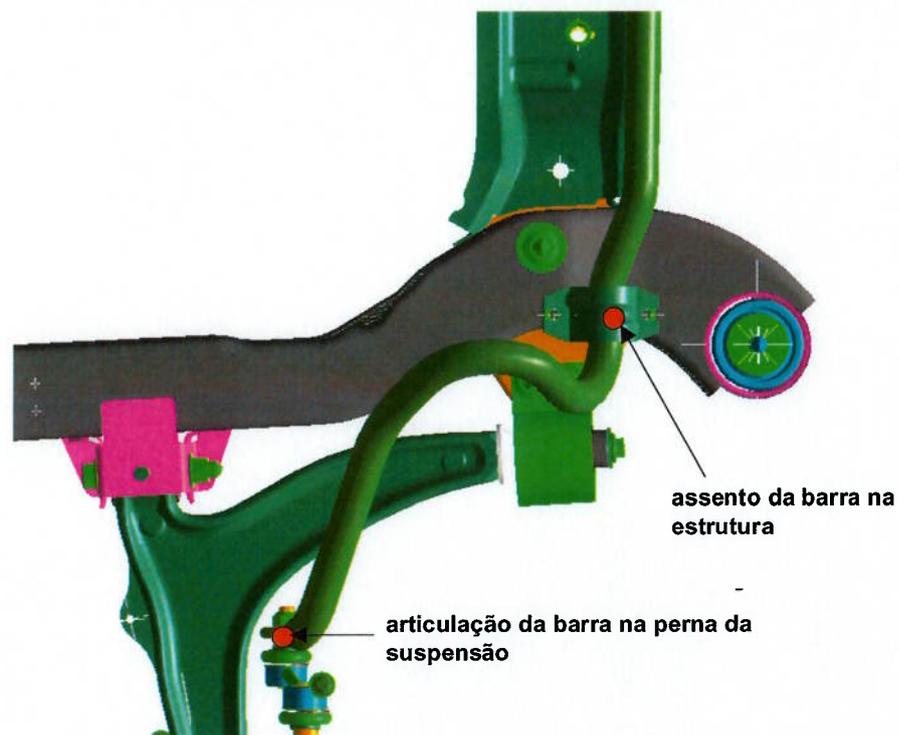


Figura 7.5 – Barra Estabilizadora da Suspensão Dianteira do Tipo *Mc Pherson* com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados

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

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

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.

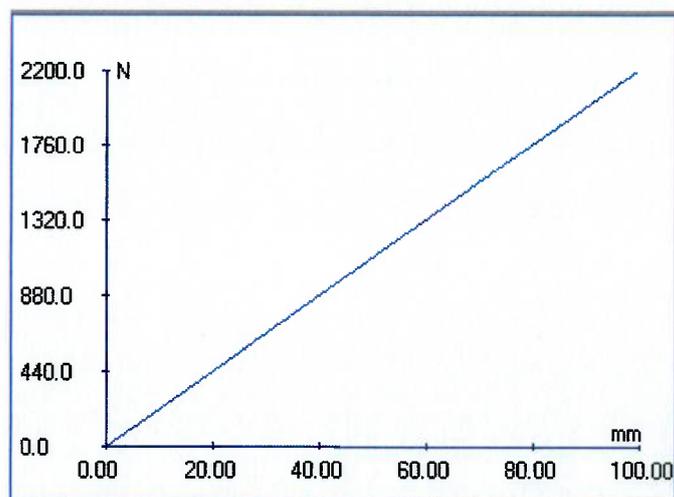


Figura 7.6 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) da Mola Dianteira Base do Estudo

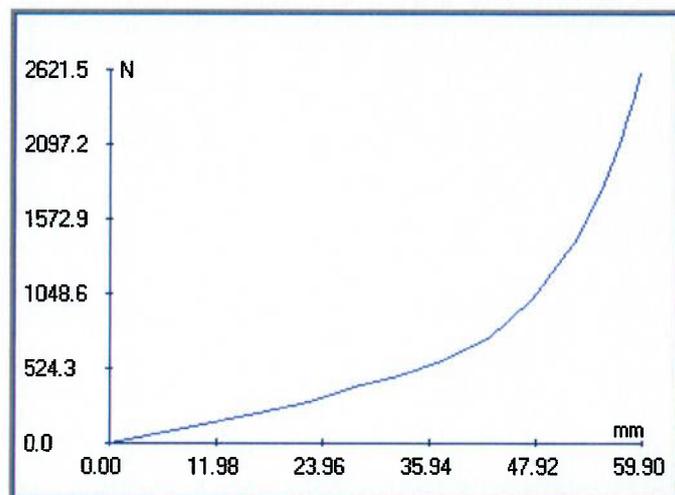


Figura 7.7 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) do Batente Dianteiro Base do Estudo

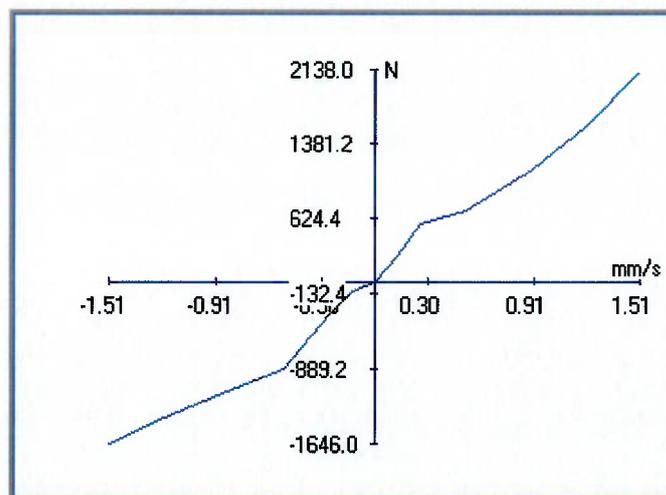


Figura 7.8 – Gráfico de Força (N) x Velocidade (mm/s) do Amortecedor Dianteiro Base do Estudo

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.

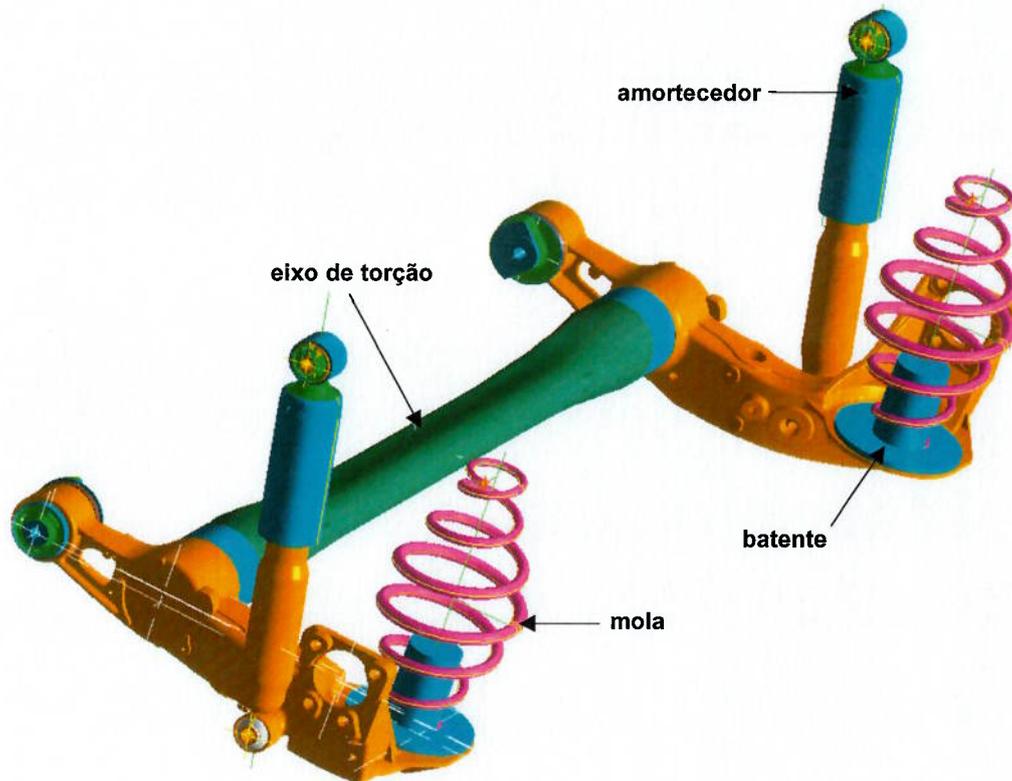


Figura 7.9 – Suspensão Traseira do Tipo Semi-Independente com Barra de Torção com Componentes Dinâmicos Modelados

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

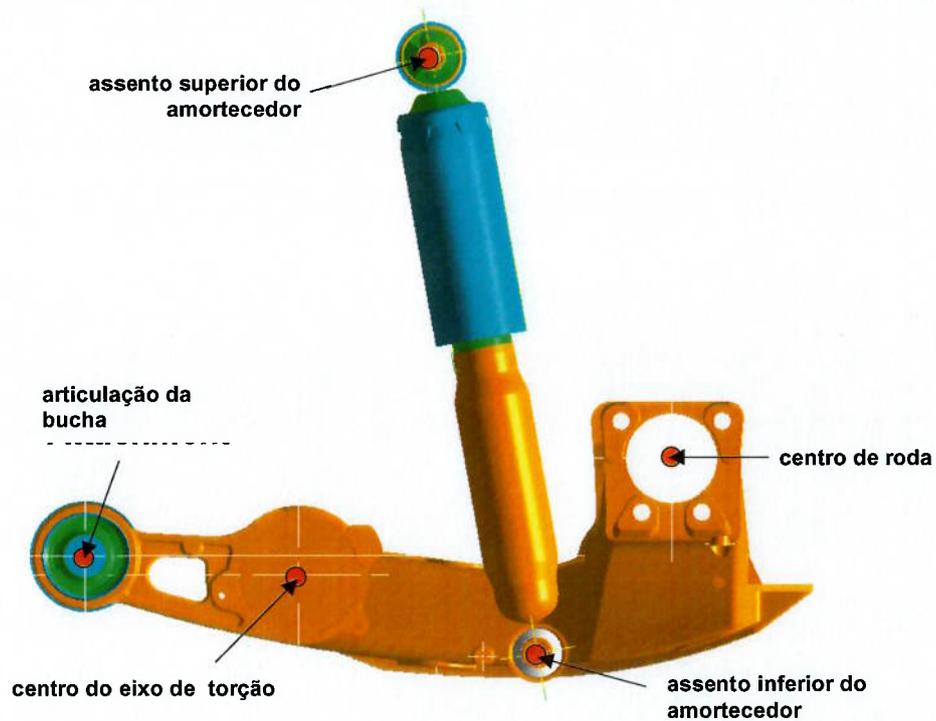


Figura 7.10 – Vista Lateral da Suspensão Traseira do Tipo Semi-Independente com Barra de Torção com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados

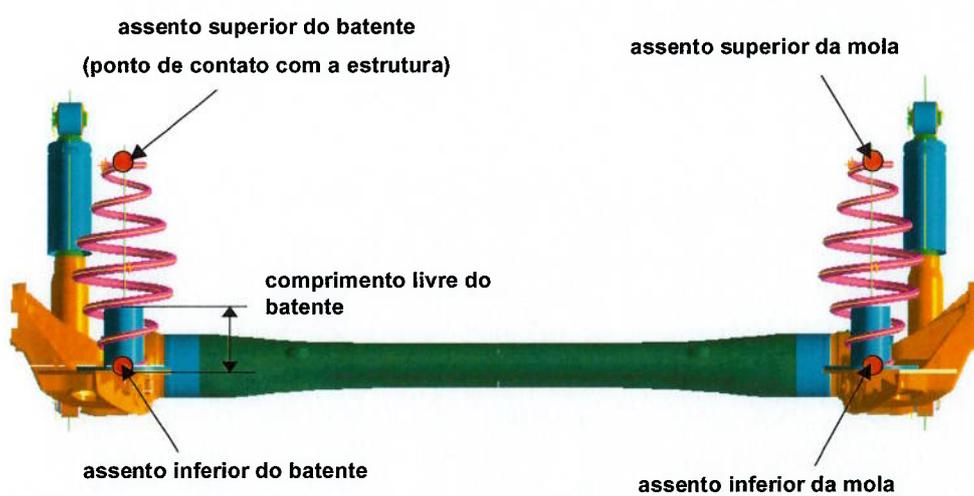


Figura 7.11 – Vista Longitudinal da Suspensão Traseira do Tipo Semi-Independente com Barra de Torção com Pontos de Articulação e Aplicação de Forças Modelados

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

Juntas Rotativas	Articulação da Bucha
	Assento Superior do Amortecedor
	Assento Inferior do Amortecedor
Pontos de Aplicação de Força	Centro de Roda
	Assento Superior da Mola
	Assento Inferior da Mola
	Assento Superior do Batente
	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.

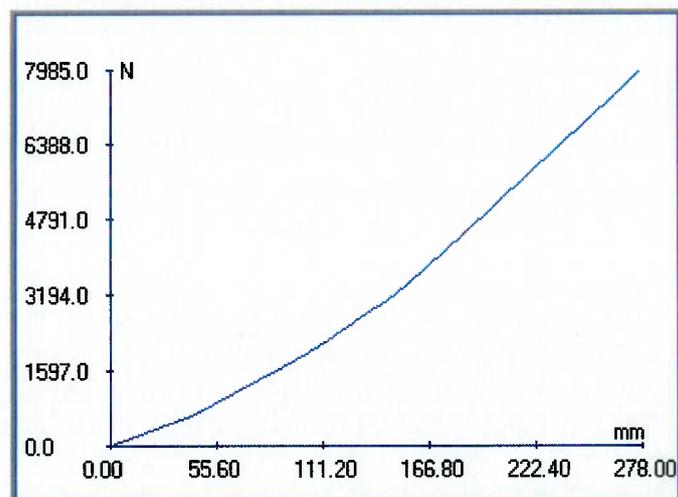


Figura 7.12 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) da Mola Traseira Base do Estudo

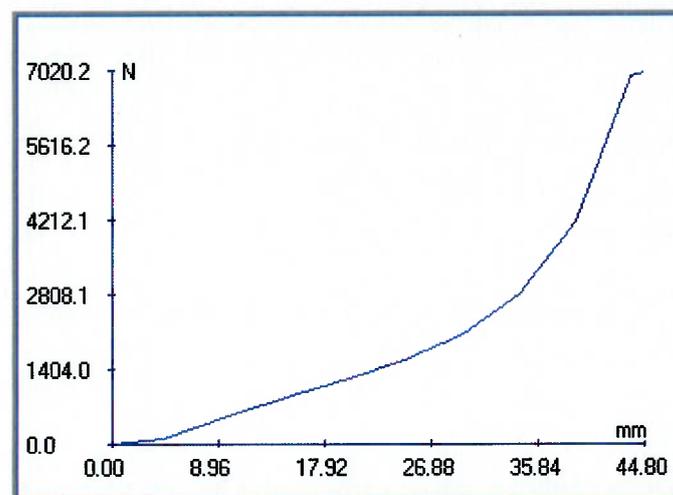


Figura 7.13 – Gráfico de Força (N) x Deflexão (mm) do Batente Dianteiro Base do Estudo

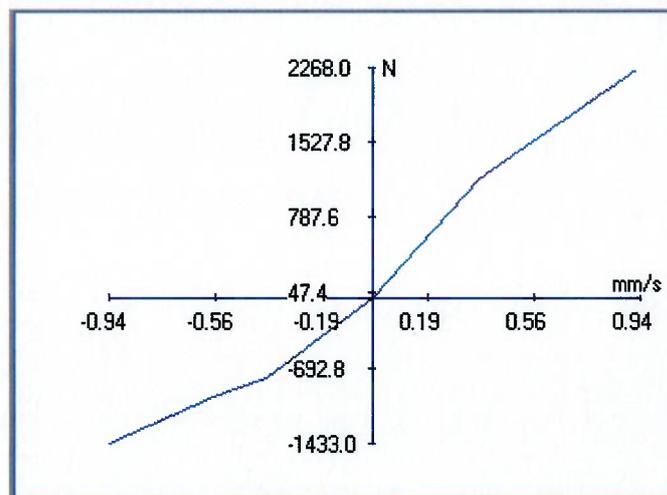


Figura 7.14 – Gráfico de Força (N) x Velocidade (mm/s) do Amortecedor Dianteiro Base do Estudo

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 àquela mostrada na figura 7.15.

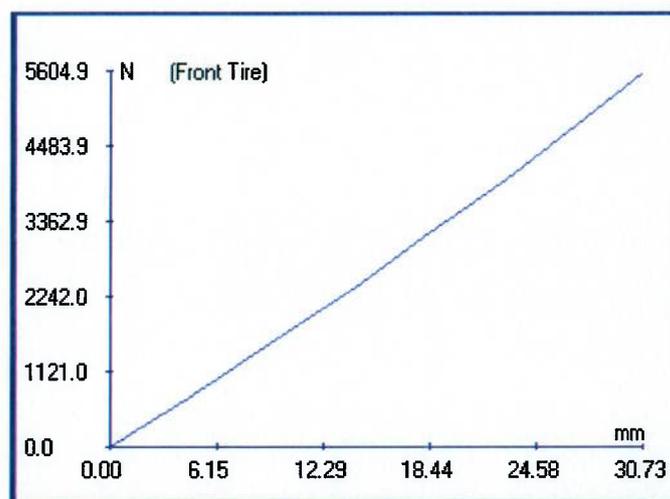


Figura 7.15 – Gráfico de Força (N) x Deflexão Radial (mm) dos Pneus Dianteiro e Traseiro Base do Estudo

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 coxinzado 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.

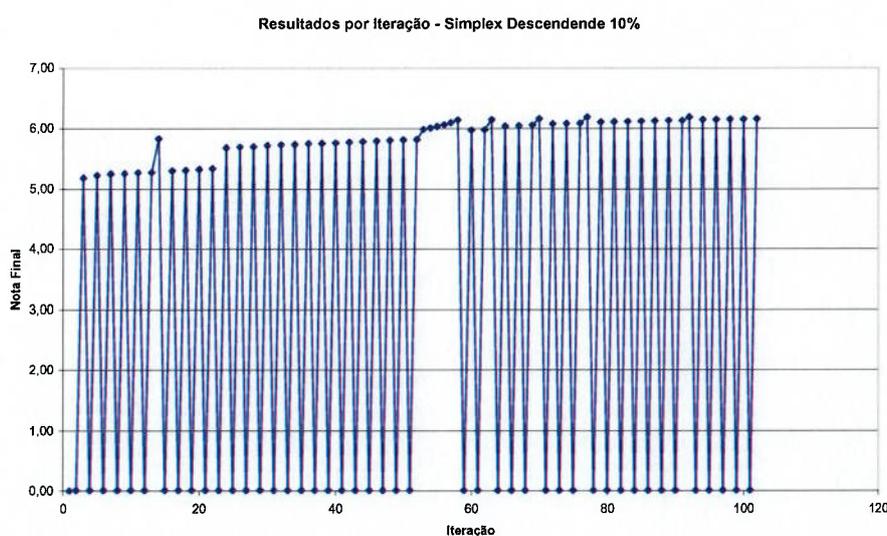


Figura 8.1 – Resultados das Iterações do Simplex Descendente para Variação de $\pm 10\%$

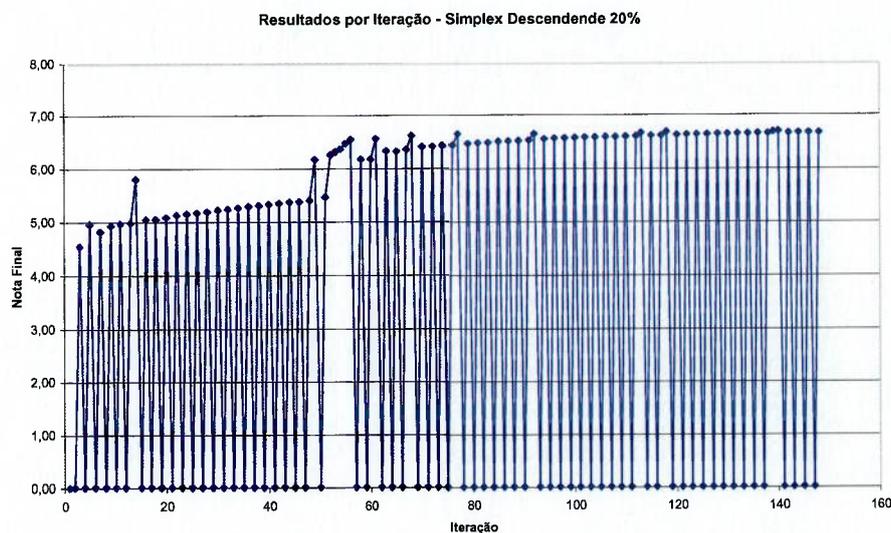


Figura 8.2 – Resultados das Iterações do Simplex Descendente para Variação de $\pm 20\%$

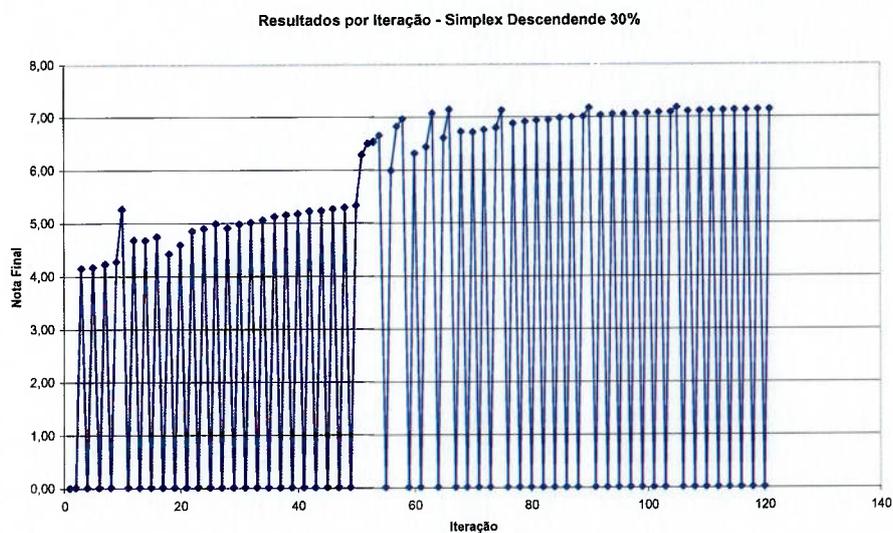


Figura 8.3 – Resultados das Iterações do Simplex Descendente para Variação de $\pm 30\%$

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

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

A tabela 8.1 mostra os tempos de processamento computacional 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 da Rotina do Simplex Descendente

Variação	Tempo de Processamento Computacional (s)
10%	31
20%	45
30%	36

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 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 do Pneu Traseiro
1	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%
2	-10%	-10%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
3	-10%	-10%	+10%	+10%	+10%	+10%	+10%	+10%
4	-10%	nominal	-10%	-10%	nominal	nominal	+10%	+10%
5	-10%	nominal	nominal	nominal	+10%	+10%	-10%	-10%
6	-10%	nominal	+10%	+10%	-10%	-10%	nominal	nominal
7	-10%	+10%	-10%	nominal	-10%	+10%	nominal	+10%
8	-10%	+10%	nominal	+10%	nominal	-10%	+10%	-10%
9	-10%	+10%	+10%	-10%	+10%	nominal	-10%	nominal
10	nominal	-10%	-10%	+10%	+10%	nominal	nominal	-10%
11	nominal	-10%	nominal	-10%	-10%	+10%	+10%	nominal
12	nominal	-10%	+10%	nominal	nominal	-10%	-10%	+10%
13	nominal	nominal	-10%	nominal	+10%	-10%	+10%	nominal
14	nominal	nominal	nominal	+10%	-10%	nominal	-10%	+10%
15	nominal	nominal	+10%	-10%	nominal	+10%	nominal	-10%
16	nominal	+10%	-10%	+10%	nominal	+10%	-10%	nominal
17	nominal	+10%	nominal	-10%	+10%	-10%	nominal	+10%
18	nominal	+10%	+10%	nominal	-10%	nominal	+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 Batente	Curva de Rigidez do Batente	Pressão do Pneu Traseiro
1	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%
2	-20%	-20%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
3	-20%	-20%	+20%	+20%	+20%	+20%	+20%	+20%
4	-20%	nominal	-20%	-20%	nominal	nominal	+20%	+20%
5	-20%	nominal	nominal	nominal	+20%	+20%	-20%	-20%
6	-20%	nominal	+20%	+20%	-20%	-20%	nominal	nominal
7	-20%	+20%	-20%	nominal	-20%	+20%	nominal	+20%
8	-20%	+20%	nominal	+20%	nominal	-20%	+20%	-20%
9	-20%	+20%	+20%	-20%	+20%	nominal	-20%	nominal
10	nominal	-20%	-20%	+20%	+20%	nominal	nominal	-20%
11	nominal	-20%	nominal	-20%	-20%	+20%	+20%	nominal
12	nominal	-20%	+20%	nominal	nominal	-20%	-20%	+20%
13	nominal	nominal	-20%	nominal	+20%	-20%	+20%	nominal
14	nominal	nominal	nominal	+20%	-20%	nominal	-20%	+20%
15	nominal	nominal	+20%	-20%	nominal	+20%	nominal	-20%
16	nominal	+20%	-20%	+20%	nominal	+20%	-20%	nominal
17	nominal	+20%	nominal	-20%	+20%	-20%	nominal	+20%
18	nominal	+20%	+20%	nominal	-20%	nominal	+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 Mola	Curva de Rigidez da Mola	Curva de Amortecimento do Amortecedor	Curva de Amortecimento do Amortecedor	Curva de Rigidez do Batente	Curva de Rigidez do Batente	Pressão do Pneu Traseiro
1	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%	-30%
2	-30%	-30%	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal	nominal
3	-30%	-30%	+30%	+30%	+30%	+30%	+30%	+30%
4	-30%	nominal	-30%	-30%	nominal	nominal	+30%	+30%
5	-30%	nominal	nominal	nominal	+30%	+30%	-30%	-30%
6	-30%	nominal	+30%	+30%	-30%	-30%	nominal	nominal
7	-30%	+30%	-30%	nominal	-30%	+30%	nominal	+30%
8	-30%	+30%	nominal	+30%	nominal	-30%	+30%	-30%
9	-30%	+30%	+30%	-30%	+30%	nominal	-30%	nominal
10	nominal	-30%	-30%	+30%	+30%	nominal	nominal	-30%
11	nominal	-30%	nominal	-30%	-30%	+30%	+30%	nominal
12	nominal	-30%	+30%	nominal	nominal	-30%	-30%	+30%
13	nominal	nominal	-30%	nominal	+30%	-30%	+30%	nominal
14	nominal	nominal	nominal	+30%	-30%	nominal	-30%	+30%
15	nominal	nominal	+30%	-30%	nominal	+30%	nominal	-30%
16	nominal	+30%	-30%	+30%	nominal	+30%	-30%	nominal
17	nominal	+30%	nominal	-30%	+30%	-30%	nominal	+30%
18	nominal	+30%	+30%	nominal	-30%	nominal	+30%	-30%

As tabelas 8.5 a 8.7 mostram os resultados para os dois níveis de ruído estudados (condições de carregamento do veículo – vazio 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.

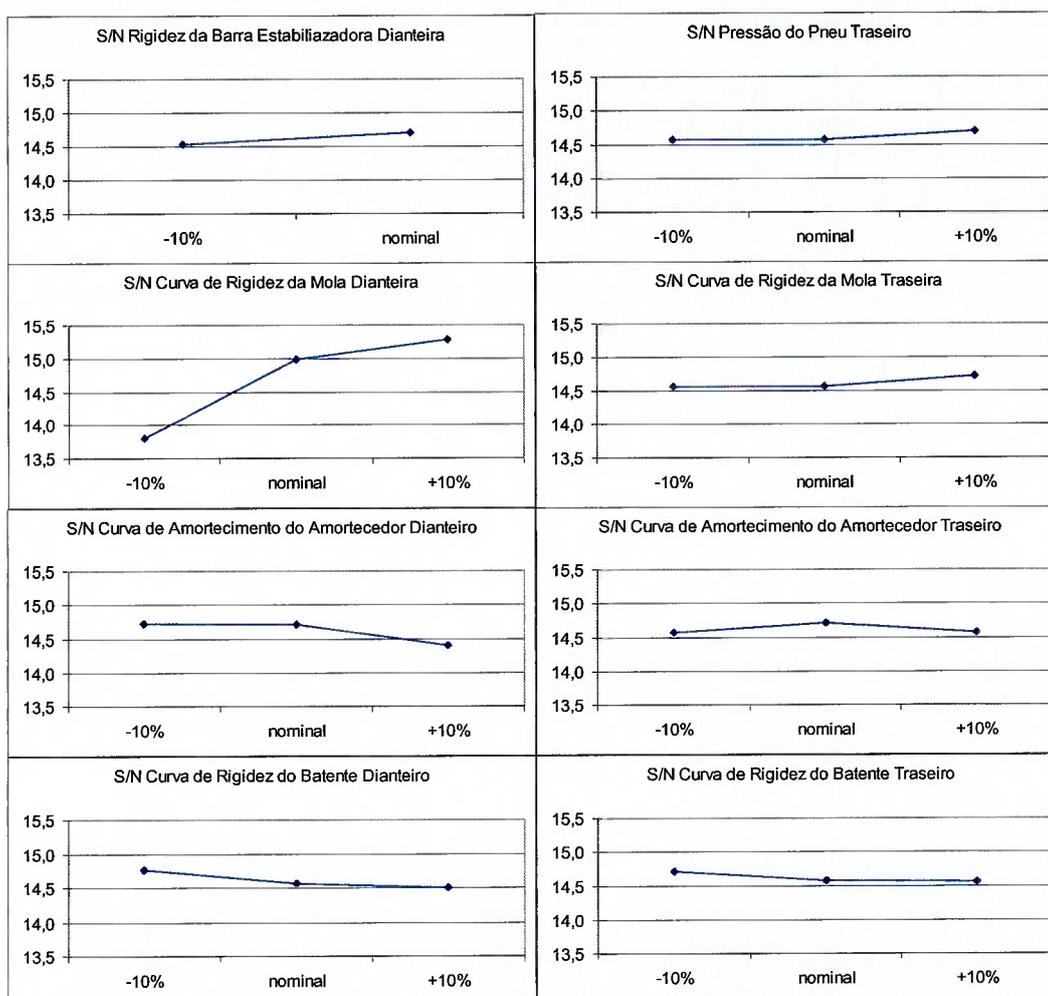


Figura 8.4 – Gráficos dos Resultados em Termos de Relação S/R para os Parâmetros de Otimização, para o Estudo de $\pm 10\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização

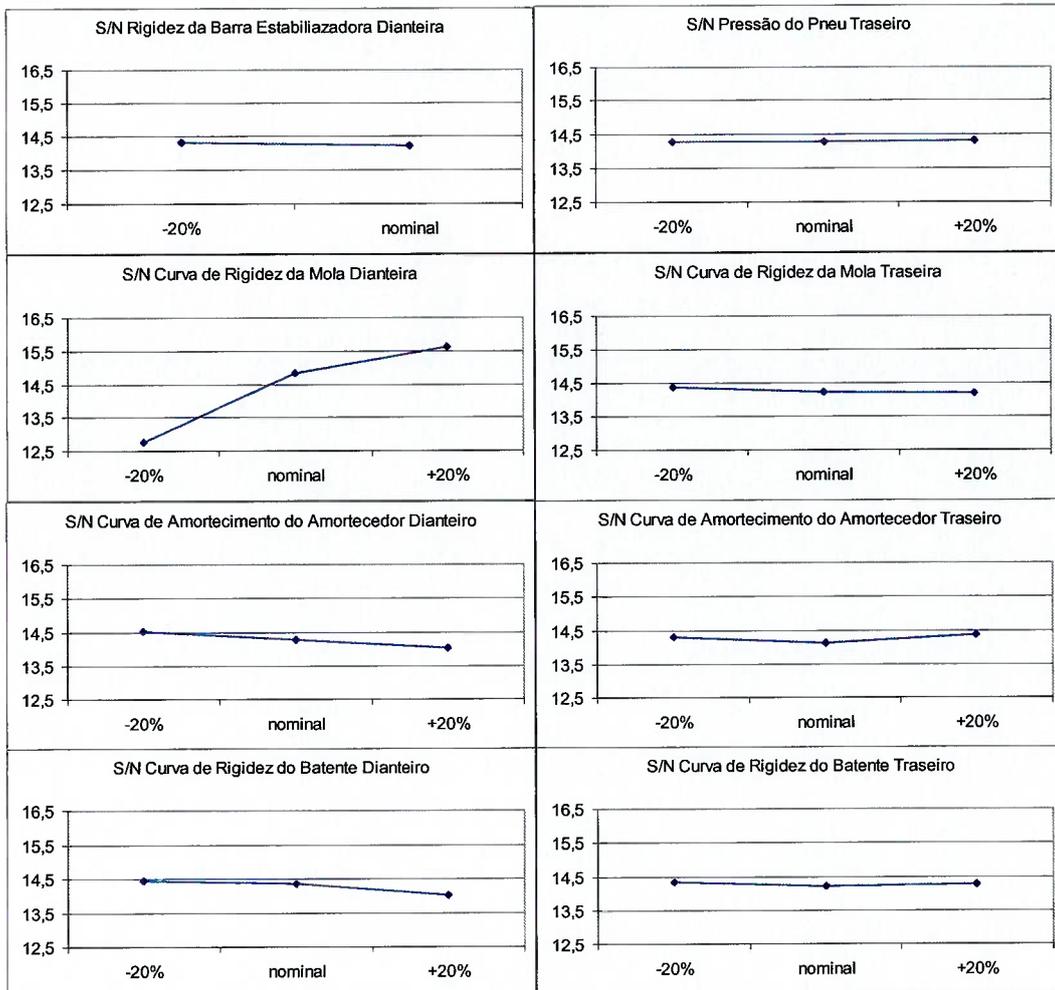


Figura 8.5 – Gráficos dos Resultados em Termos de Relação S/R para os Parâmetros de Otimização, para o Estudo de $\pm 20\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização

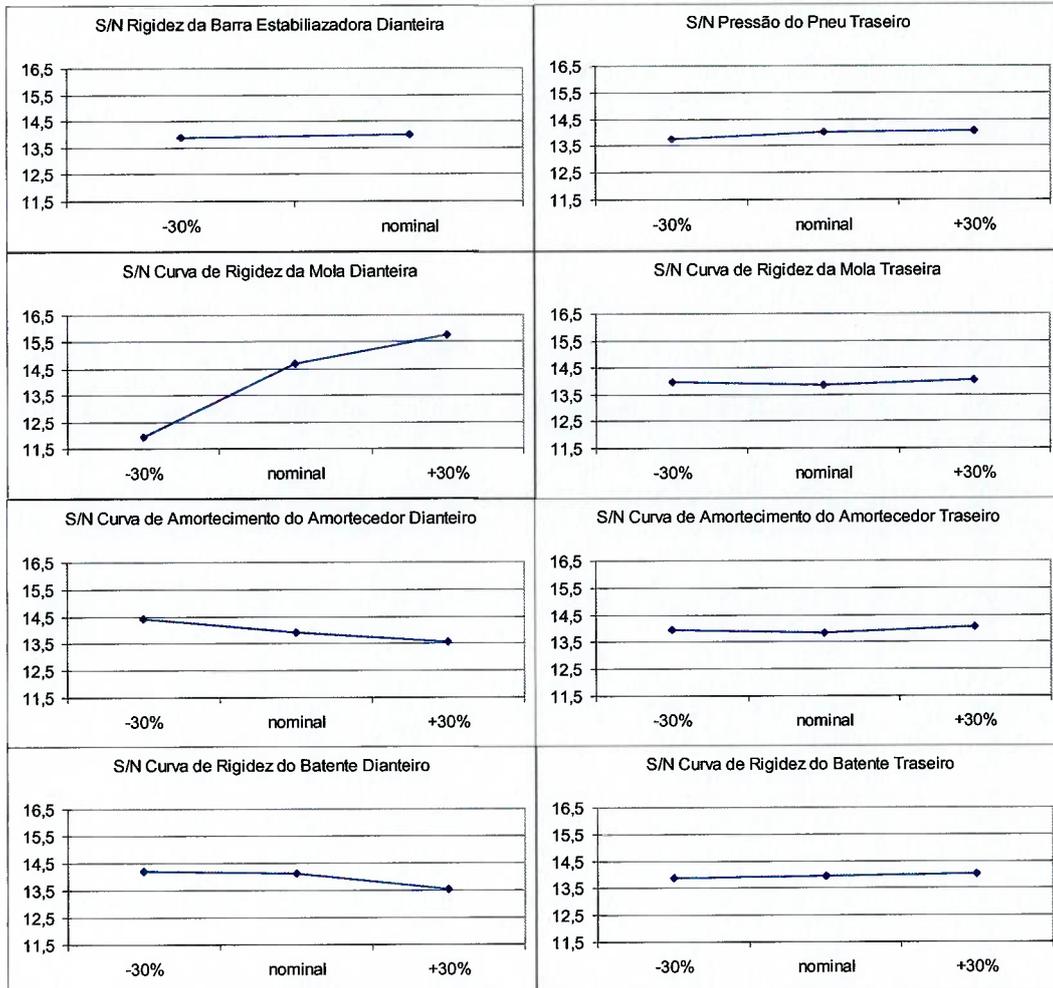


Figura 8.6 – Gráficos dos Resultados em Termos de Relação S/R para os Parâmetros de Otimização, para o Estudo de $\pm 30\%$ em Torno dos Valores Nominais dos Parâmetros de Otimização

Finalmente, as tabelas 8.8 e 8.9 mostram os parâmetros e os resultados das configurações ótimas para os casos de variação de $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ e $\pm 30\%$.

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

Experimento	Parâmetros de Otimização (níveis)							
	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 do Pneu Traseiro
Ótima 10%	nominal	+10%	+10%	-10%	nominal	-10%	-10%	+10%
Ótima 20%	-20%	+20%	-20%	-20%	+20%	-20%	-20%	+20%
Ótima 30%	nominal	+30%	+30%	-30%	+30%	-30%	+30%	+30%

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

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

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).

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

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 utilizado varia para cada caso de estudo.

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

variáveis dinâmicas em notas de conforto veicular já são bastante otimizadas em termos de tempo de execução. A tabela 8.10 mostra a comparação dos tempos obtidos em um microcomputador PC com processador Intel Pentium III 800 MHz e 256 Mb de memória RAM.

Tabela 8.10 – Tempos de Processamento Computacional das Rotinas dos Métodos do Simplex Descendente e da Engenharia Robusta

Método	Variação	Tempo de Rodagem (s)
Taguchi	10%	10
Simplex	10%	31
Taguchi	20%	10
Simplex	20%	45
Taguchi	30%	10
Simplex	30%	36

A tabela 8.11 mostra a comparação em termos de parâmetros ótimos e resultados, destacando os pontos onde ocorreram divergências.

Tabela 8.11 – Parâmetros Ótimos e Resultados das Rotinas dos Métodos do Simplex Descendente e da Engenharia Robusta (Taguchi)

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

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 $\pm 10\%$

Variação	S/N Parâmetros							
	Barra Estabilizadora	Mola Dianteira	Mola Traseira	Amortecedor Dianteiro	Amortecedor Traseiro	Batente Dianteiro	Batente Traseiro	Pressão dos Pneus
-10%	0,00%	0,00%	0,07%	2,29%	0,00%	1,86%	0,96%	0,21%
nominal	0,76%	10,07%	0,00%	2,15%	1,03%	0,48%	0,07%	0,00%
+10%	-	12,35%	1,03%	0,00%	0,14%	0,00%	0,00%	0,96%

Tabela 8.13 – Diferenças Percentuais na Relação S/R dos Parâmetros de Otimização para o Caso de Variação de $\pm 20\%$

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

Tabela 8.14 – Diferenças Percentuais na Relação S/R dos Parâmetros de Otimização para o Caso de Variação de $\pm 30\%$

Variação	S/N Parâmetros							
	Barra Estabilizadora	Mola Dianteira	Mola Traseira	Amortecedor Dianteiro	Amortecedor Traseiro	Batente Dianteiro	Batente Traseiro	Pressão dos Pneus
-30%	0,00%	0,00%	1,08%	6,13%	0,87%	4,58%	0,00%	0,00%
nominal	0,65%	28,97%	0,00%	2,58%	0,00%	4,13%	0,65%	1,60%
+30%	-	38,28%	1,23%	0,00%	1,59%	0,00%	0,79%	1,96%

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								Variação % de S/N do Parâmetro
Método	Nota Média	Barra Estabilizadora	Mola Dianteira	Mola Traseira	Amortecedor Dianteiro	Amortecedor Traseiro	Batente Dianteiro	Batente Traseiro	Pressão dos Pneus	
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	-
-	6,1	0,90	1,10	1,10	0,90	1,00	0,90	0,90	1,10	0,76%
-	6,1	1,00	1,10	0,90	0,90	1,00	0,90	0,90	1,10	1,03%
-	6,1	1,00	1,10	1,10	0,90	0,90	0,90	0,90	1,10	1,03%
-	6,2	1,00	1,10	1,10	0,90	1,00	0,90	0,90	0,90	0,96%

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								Variação % de S/N do Parâmetro
Método	Nota Média	Barra Estabilizadora	Mola Dianteira	Mola Traseira	Amortecedor Dianteiro	Amortecedor Traseiro	Batente Dianteiro	Batente Traseiro	Pressão dos Pneus	
Taguchi	6,6	0,80	1,20	0,80	0,80	1,20	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	-
-	6,7	0,80	1,20	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	1,20	1,84%
-	6,7	0,80	1,20	0,80	0,80	1,20	0,80	0,80	0,80	0,28%

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								Variação % de S/N do Parâmetro
Método	Nota Média	Barra Estabilizadora	Mola Dianteira	Mola Traseira	Amortecedor Dianteiro	Amortecedor Traseiro	Batente Dianteiro	Batente Traseiro	Pressão dos Pneus	
Taguchi	6,9	1,00	1,30	1,30	0,70	1,30	0,70	1,30	1,30	-
Simplex	7,2	0,70	1,30	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	-
-	6,9	0,70	1,30	1,30	0,70	1,30	0,70	1,30	1,30	0,65%
-	6,9	1,00	1,30	0,70	0,70	1,30	0,70	1,30	1,30	1,23%
-	6,9	1,00	1,30	1,30	0,70	0,70	0,70	1,30	1,30	1,59%
-	6,9	1,00	1,30	1,30	0,70	1,30	0,70	0,70	1,30	0,79%
-	7,0	1,00	1,30	1,30	0,70	1,30	0,70	1,30	0,70	1,96%

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									Variação % de S/N do Parâmetro
Método	Nota Média	Barra Estabilizadora	Mola Dianteira	Mola Traseira	Amortecedor Dianteiro	Amortecedor Traseiro	Batente Dianteiro	Batente Traseiro	Pressão dos Pneus		
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	-	
-	5,5	1,00	0,90	1,10	0,90	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									Variação % de S/N do Parâmetro
Método	Nota Média	Barra Estabilizadora	Mola Dianteira	Mola Traseira	Amortecedor Dianteiro	Amortecedor Traseiro	Batente Dianteiro	Batente Traseiro	Pressão dos Pneus		
Taguchi	6,6	0,80	1,20	0,80	0,80	1,20	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	-	
-	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	1,20	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									Variação % de S/N do Parâmetro
Método	Nota Média	Barra Estabilizadora	Mola Dianteira	Mola Traseira	Amortecedor Dianteiro	Amortecedor Traseiro	Batente Dianteiro	Batente Traseiro	Pressão dos Pneus		
Taguchi	6,9	1,00	1,30	1,30	0,70	1,30	0,70	1,30	1,30	-	
Simplex	7,2	0,70	1,30	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	-	
-	4,3	1,00	0,70	1,30	0,70	1,30	0,70	1,30	1,30	38,28%	
-	5,3	1,00	1,30	1,30	1,30	1,30	0,70	1,30	1,30	6,13%	
-	6,7	1,00	1,30	1,30	0,70	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 à 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 somente 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 desempenho em 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. Inglaterra, 1991.

GILLESPIE, T.D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale (EUA): SAE, 1992.

FRANCESCHINI, F.H., VILELA, 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.

GUELER, G.F. **Suspensão de Veículos: Projeto e Análise – Vol. 1: Conceitos Básicos**. São Paulo, 1992. 2ª edição.

GUELER, 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 (Áustria), 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_{it}) 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_{it}
1	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,0627	5,2045	5,1459	5,2159	5,1798	0,0000
2	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,0627	5,2045	5,1459	5,2159	5,1798	0,0100
3	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,0627	5,2045	5,1459	5,2159	5,1798	5,1810
4	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,1459	5,2159	5,1798	0,0100
5	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,1459	5,2159	5,1798	5,2280
6	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,2280	5,2159	5,1798	0,0100
7	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,2280	5,2159	5,1798	5,2498
8	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,2280	5,2159	5,2498	0,0100
9	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,1810	5,2045	5,2280	5,2159	5,2498	5,2547
10	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,2547	5,2045	5,2280	5,2159	5,2498	0,0100
11	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,2547	5,2045	5,2280	5,2159	5,2498	5,2705
12	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,2547	5,2705	5,2280	5,2159	5,2498	0,0100
13	5,2159	5,2228	6,2106	5,2080	5,2547	5,2705	5,2280	5,2159	5,2498	5,2776
14	5,2159	5,2228	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,2280	5,2159	5,2498	5,8363
15	5,8363	5,2228	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,2280	5,2159	5,2498	0,0100
16	5,8363	5,2228	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,2280	5,2159	5,2498	5,3027
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	5,3109
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	5,3394
23	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	0,0100
24	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,2547	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	5,6802
25	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,6802	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	0,0100
26	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,6802	5,2705	5,3232	5,3027	5,3394	5,6937
27	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,6802	5,6937	5,3232	5,3027	5,3394	0,0100
28	5,8363	5,3109	6,2106	5,2776	5,6802	5,6937	5,3232	5,3027	5,3394	5,7031
29	5,8363	5,3109	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,3027	5,3394	0,0100
30	5,8363	5,3109	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,3027	5,3394	5,7201
31	5,8363	5,3109	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
32	5,8363	5,3109	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	5,7284
33	5,8363	5,7284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	0,0100
34	5,8363	5,7284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,3232	5,7201	5,3394	5,7360
35	5,8363	5,7284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,7360	5,7201	5,3394	0,0100
36	5,8363	5,7284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,7360	5,7201	5,3394	5,7486
37	5,8363	5,7284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,7360	5,7201	5,7486	0,0100
38	5,8363	5,7284	6,2106	5,7031	5,6802	5,6937	5,7360	5,7201	5,7486	5,7555
39	5,8363	5,7284	6,2106	5,7031	5,7555	5,6937	5,7360	5,7201	5,7486	0,0100
40	5,8363	5,7284	6,2106	5,7031	5,7555	5,6937	5,7360	5,7201	5,7486	5,7668
41	5,8363	5,7284	6,2106	5,7031	5,7555	5,7668	5,7360	5,7201	5,7486	0,0100
42	5,8363	5,7284	6,2106	5,7031	5,7555	5,7668	5,7360	5,7201	5,7486	5,7751
43	5,8363	5,7284	6,2106	5,7751	5,7555	5,7668	5,7360	5,7201	5,7486	0,0100
44	5,8363	5,7284	6,2106	5,7751	5,7555	5,7668	5,7360	5,7201	5,7486	5,7866
45	5,8363	5,7284	6,2106	5,7751	5,7555	5,7668	5,7360	5,7866	5,7486	0,0100
46	5,8363	5,7284	6,2106	5,7751	5,7555	5,7668	5,7360	5,7866	5,7486	5,7945
47	5,8363	5,7945	6,2106	5,7751	5,7555	5,7668	5,7360	5,7866	5,7486	0,0100
48	5,8363	5,7945	6,2106	5,7751	5,7555	5,7668	5,7360	5,7866	5,7486	5,8024
49	5,8363	5,7945	6,2106	5,7751	5,7555	5,7668	5,8024	5,7866	5,7486	0,0100
50	5,8363	5,7945	6,2106	5,7751	5,7555	5,7668	5,8024	5,7866	5,7486	5,8121
51	5,8363	5,7945	6,2106	5,7751	5,7555	5,7668	5,8024	5,7866	5,8121	0,0100
52	5,8363	5,7945	6,2106	5,7751	5,7555	5,7668	5,8024	5,7866	5,8121	5,8191
53	5,8363	5,7945	6,2106	5,7751	5,8191	5,7668	5,8024	5,7866	5,8121	5,9875
54	5,8363	5,7945	6,2106	5,7751	5,8191	5,9875	5,8024	5,7866	5,8121	6,0139
55	5,8363	5,7945	6,2106	6,0139	5,8191	5,9875	5,8024	5,7866	5,8121	6,0387
56	5,8363	5,7945	6,2106	6,0139	5,8191	5,9875	5,8024	6,0387	5,8121	6,0669
57	5,8363	6,0669	6,2106	6,0139	5,8191	5,9875	5,8024	6,0387	5,8121	6,1027
58	5,8363	6,0669	6,2106	6,0139	5,8191	5,9875	6,1027	6,0387	5,8121	6,1434
59	5,8363	6,0669	6,2106	6,0139	5,8191	5,9875	6,1027	6,0387	6,1434	0,0100
60	5,8363	6,0669	6,2106	6,0139	5,8191	5,9875	6,1027	6,0387	6,1434	5,9772

Iteração	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z ₁₁
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	6,1671	6,1434	0,0100
72	6,0424	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0489	6,1027	6,1671	6,1434	6,0805
73	6,0805	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0489	6,1027	6,1671	6,1434	0,0100
74	6,0805	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0489	6,1027	6,1671	6,1434	6,0854
75	6,0805	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0854	6,1027	6,1671	6,1434	0,0100
76	6,0805	6,0669	6,2106	6,0610	6,1504	6,0854	6,1027	6,1671	6,1434	6,0917
77	6,0805	6,0669	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,1671	6,1434	6,1930
78	6,0805	6,1930	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,1671	6,1434	0,0100
79	6,0805	6,1930	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,1671	6,1434	6,1097
80	6,1097	6,1930	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,1671	6,1434	0,0100
81	6,1097	6,1930	6,2106	6,0917	6,1504	6,0854	6,1027	6,1671	6,1434	6,1140
82	6,1097	6,1930	6,2106	6,0917	6,1504	6,1140	6,1027	6,1671	6,1434	0,0100
83	6,1097	6,1930	6,2106	6,0917	6,1504	6,1140	6,1027	6,1671	6,1434	6,1192
84	6,1097	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1140	6,1027	6,1671	6,1434	0,0100
85	6,1097	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1140	6,1027	6,1671	6,1434	6,1265
86	6,1097	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1140	6,1265	6,1671	6,1434	0,0100
87	6,1097	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1140	6,1265	6,1671	6,1434	6,1312
88	6,1312	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1140	6,1265	6,1671	6,1434	0,0100
89	6,1312	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1140	6,1265	6,1671	6,1434	6,1344
90	6,1312	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1344	6,1265	6,1671	6,1434	0,0100
91	6,1312	6,1930	6,2106	6,1192	6,1504	6,1344	6,1265	6,1671	6,1434	6,1379
92	6,1312	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1265	6,1671	6,1434	6,1905
93	6,1312	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1905	6,1671	6,1434	0,0100
94	6,1312	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1905	6,1671	6,1434	6,1486
95	6,1486	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1905	6,1671	6,1434	0,0100
96	6,1486	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1344	6,1905	6,1671	6,1434	6,1512
97	6,1486	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1512	6,1905	6,1671	6,1434	0,0100
98	6,1486	6,1930	6,2106	6,1379	6,1504	6,1512	6,1905	6,1671	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	6,1569	0,0100
102	6,1486	6,1930	6,2106	6,1539	6,1504	6,1512	6,1905	6,1671	6,1569	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	4,5445	4,8173	4,7306	0,0100
5	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,5445	4,8173	4,7306	4,9599
6	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,9599	4,8173	4,7306	0,0100
7	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,5570	4,7795	4,9599	4,8173	4,7306	4,8215
8	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,8215	4,7795	4,9599	4,8173	4,7306	0,0100
9	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,8215	4,7795	4,9599	4,8173	4,7306	4,9319
10	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,8215	4,7795	4,9599	4,8173	4,9319	0,0100
11	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,8215	4,7795	4,9599	4,8173	4,9319	4,9687
12	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,8215	4,9687	4,9599	4,8173	4,9319	0,0100
13	4,8173	4,8405	6,7307	4,7899	4,8215	4,9687	4,9599	4,8173	4,9319	4,9872
14	4,8173	4,8405	6,7307	4,9872	4,8215	4,9687	4,9599	4,8173	4,9319	5,8036
15	5,8036	4,8405	6,7307	4,9872	4,8215	4,9687	4,9599	4,8173	4,9319	0,0100
16	5,8036	4,8405	6,7307	4,9872	4,8215	4,9687	4,9599	4,8173	4,9319	5,0456
17	5,8036	4,8405	6,7307	4,9872	4,8215	4,9687	4,9599	5,0456	4,9319	0,0100
18	5,8036	4,8405	6,7307	4,9872	4,8215	4,9687	4,9599	5,0456	4,9319	5,0538
19	5,8036	4,8405	6,7307	4,9872	5,0538	4,9687	4,9599	5,0456	4,9319	0,0100
20	5,8036	4,8405	6,7307	4,9872	5,0538	4,9687	4,9599	5,0456	4,9319	5,0840
21	5,8036	5,0840	6,7307	4,9872	5,0538	4,9687	4,9599	5,0456	4,9319	0,0100
22	5,8036	5,0840	6,7307	4,9872	5,0538	4,9687	4,9599	5,0456	4,9319	5,1317
23	5,8036	5,0840	6,7307	4,9872	5,0538	4,9687	4,9599	5,0456	5,1317	0,0100
24	5,8036	5,0840	6,7307	4,9872	5,0538	4,9687	4,9599	5,0456	5,1317	5,1538
25	5,8036	5,0840	6,7307	4,9872	5,0538	4,9687	5,1538	5,0456	5,1317	0,0100
26	5,8036	5,0840	6,7307	4,9872	5,0538	4,9687	5,1538	5,0456	5,1317	5,1721
27	5,8036	5,0840	6,7307	4,9872	5,0538	5,1721	5,1538	5,0456	5,1317	0,0100
28	5,8036	5,0840	6,7307	4,9872	5,0538	5,1721	5,1538	5,0456	5,1317	5,1928
29	5,8036	5,0840	6,7307	5,1928	5,0538	5,1721	5,1538	5,0456	5,1317	0,0100
30	5,8036	5,0840	6,7307	5,1928	5,0538	5,1721	5,1538	5,0456	5,1317	5,2285
31	5,8036	5,0840	6,7307	5,1928	5,0538	5,1721	5,1538	5,2285	5,1317	0,0100
32	5,8036	5,0840	6,7307	5,1928	5,0538	5,1721	5,1538	5,2285	5,1317	5,2388
33	5,8036	5,0840	6,7307	5,1928	5,2388	5,1721	5,1538	5,2285	5,1317	0,0100
34	5,8036	5,0840	6,7307	5,1928	5,2388	5,1721	5,1538	5,2285	5,1317	5,2678
35	5,8036	5,2678	6,7307	5,1928	5,2388	5,1721	5,1538	5,2285	5,1317	0,0100
36	5,8036	5,2678	6,7307	5,1928	5,2388	5,1721	5,1538	5,2285	5,1317	5,2962
37	5,8036	5,2678	6,7307	5,1928	5,2388	5,1721	5,1538	5,2285	5,2962	0,0100
38	5,8036	5,2678	6,7307	5,1928	5,2388	5,1721	5,1538	5,2285	5,2962	5,3139
39	5,8036	5,2678	6,7307	5,1928	5,2388	5,1721	5,3139	5,2285	5,2962	0,0100
40	5,8036	5,2678	6,7307	5,1928	5,2388	5,1721	5,3139	5,2285	5,2962	5,3335
41	5,8036	5,2678	6,7307	5,1928	5,2388	5,3335	5,3139	5,2285	5,2962	0,0100
42	5,8036	5,2678	6,7307	5,1928	5,2388	5,3335	5,3139	5,2285	5,2962	5,3502
43	5,8036	5,2678	6,7307	5,3502	5,2388	5,3335	5,3139	5,2285	5,2962	0,0100
44	5,8036	5,2678	6,7307	5,3502	5,2388	5,3335	5,3139	5,2285	5,2962	5,3745
45	5,8036	5,2678	6,7307	5,3502	5,2388	5,3335	5,3139	5,3745	5,2962	0,0100
46	5,8036	5,2678	6,7307	5,3502	5,2388	5,3335	5,3139	5,3745	5,2962	5,3832
47	5,8036	5,2678	6,7307	5,3502	5,3832	5,3335	5,3139	5,3745	5,2962	0,0100
48	5,8036	5,2678	6,7307	5,3502	5,3832	5,3335	5,3139	5,3745	5,2962	5,4075
49	5,8036	5,4075	6,7307	5,3502	5,3832	5,3335	5,3139	5,3745	5,2962	6,1707
50	5,8036	5,4075	6,7307	5,3502	5,3832	5,3335	5,3139	5,3745	6,1707	0,0100
51	5,8036	5,4075	6,7307	5,3502	5,3832	5,3335	5,3139	5,3745	6,1707	5,4719
52	5,8036	5,4075	6,7307	5,3502	5,3832	5,3335	5,4719	5,3745	6,1707	6,2624
53	5,8036	5,4075	6,7307	5,3502	5,3832	6,2624	5,4719	5,3745	6,1707	6,3162
54	5,8036	5,4075	6,7307	6,3162	5,3832	6,2624	5,4719	5,3745	6,1707	6,3684
55	5,8036	5,4075	6,7307	6,3162	5,3832	6,2624	5,4719	6,3684	6,1707	6,4775
56	5,8036	5,4075	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	5,4719	6,3684	6,1707	6,5483
57	5,8036	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	5,4719	6,3684	6,1707	0,0100
58	5,8036	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	5,4719	6,3684	6,1707	6,1760
59	5,8036	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	6,1760	6,3684	6,1707	0,0100
60	5,8036	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	6,1760	6,3684	6,1707	6,1785

Iteração	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z ₁₀
61	6,1785	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	6,1760	6,3684	6,1707	6,5592
62	6,1785	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	6,1760	6,3684	6,5592	0,0100
63	6,1785	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	6,1760	6,3684	6,5592	6,3280
64	6,1785	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	6,3280	6,3684	6,5592	0,0100
65	6,1785	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	6,3280	6,3684	6,5592	6,3227
66	6,3227	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	6,3280	6,3684	6,5592	0,0100
67	6,3227	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,2624	6,3280	6,3684	6,5592	6,3584
68	6,3227	6,5483	6,7307	6,3162	6,4775	6,3584	6,3280	6,3684	6,5592	6,6145
69	6,3227	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,3584	6,3280	6,3684	6,5592	0,0100
70	6,3227	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,3584	6,3280	6,3684	6,5592	6,4060
71	6,4060	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,3584	6,3280	6,3684	6,5592	0,0100
72	6,4060	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,3584	6,3280	6,3684	6,5592	6,4133
73	6,4060	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,3584	6,4133	6,3684	6,5592	0,0100
74	6,4060	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,3584	6,4133	6,3684	6,5592	6,4330
75	6,4060	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4330	6,4133	6,3684	6,5592	0,0100
76	6,4060	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4330	6,4133	6,3684	6,5592	6,4417
77	6,4060	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4330	6,4133	6,4417	6,5592	6,6544
78	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4330	6,4133	6,4417	6,5592	0,0100
79	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4330	6,4133	6,4417	6,5592	6,4766
80	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4330	6,4766	6,4417	6,5592	0,0100
81	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4330	6,4766	6,4417	6,5592	6,4872
82	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4872	6,4766	6,4417	6,5592	0,0100
83	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4872	6,4766	6,4417	6,5592	6,4943
84	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4872	6,4766	6,4943	6,5592	0,0100
85	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4872	6,4766	6,4943	6,5592	6,5160
86	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4872	6,5160	6,4943	6,5592	0,0100
87	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,4775	6,4872	6,5160	6,4943	6,5592	6,5184
88	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5184	6,4872	6,5160	6,4943	6,5592	0,0100
89	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5184	6,4872	6,5160	6,4943	6,5592	6,5288
90	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5184	6,5288	6,5160	6,4943	6,5592	0,0100
91	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5184	6,5288	6,5160	6,4943	6,5592	6,5368
92	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5184	6,5288	6,5160	6,5368	6,5592	6,6538
93	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5184	6,5288	6,6538	6,5368	6,5592	0,0100
94	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5184	6,5288	6,6538	6,5368	6,5592	6,5611
95	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5611	6,5288	6,6538	6,5368	6,5592	0,0100
96	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5611	6,5288	6,6538	6,5368	6,5592	6,5697
97	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5611	6,5697	6,6538	6,5368	6,5592	0,0100
98	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5611	6,5697	6,6538	6,5368	6,5592	6,5758
99	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5611	6,5697	6,6538	6,5758	6,5592	0,0100
100	6,6544	6,5483	6,7307	6,6145	6,5611	6,5697	6,6538	6,5758	6,5592	6,5821
101	6,6544	6,5821	6,7307	6,6145	6,5611	6,5697	6,6538	6,5758	6,5592	0,0100
102	6,6544	6,5821	6,7307	6,6145	6,5611	6,5697	6,6538	6,5758	6,5592	6,5892
103	6,6544	6,5821	6,7307	6,6145	6,5611	6,5697	6,6538	6,5758	6,5892	0,0100
104	6,6544	6,5821	6,7307	6,6145	6,5611	6,5697	6,6538	6,5758	6,5892	6,5927
105	6,6544	6,5821	6,7307	6,6145	6,5927	6,5697	6,6538	6,5758	6,5892	0,0100
106	6,6544	6,5821	6,7307	6,6145	6,5927	6,5697	6,6538	6,5758	6,5892	6,5979
107	6,6544	6,5821	6,7307	6,6145	6,5927	6,5979	6,6538	6,5758	6,5892	0,0100
108	6,6544	6,5821	6,7307	6,6145	6,5927	6,5979	6,6538	6,5758	6,5892	6,6022
109	6,6544	6,5821	6,7307	6,6145	6,5927	6,5979	6,6538	6,6022	6,5892	0,0100
110	6,6544	6,5821	6,7307	6,6145	6,5927	6,5979	6,6538	6,6022	6,5892	6,6063
111	6,6544	6,6063	6,7307	6,6145	6,5927	6,5979	6,6538	6,6022	6,5892	0,0100
112	6,6544	6,6063	6,7307	6,6145	6,5927	6,5979	6,6538	6,6022	6,5892	6,6110
113	6,6544	6,6063	6,7307	6,6145	6,5927	6,5979	6,6538	6,6022	6,6110	6,6733
114	6,6544	6,6063	6,7307	6,6145	6,6733	6,5979	6,6538	6,6022	6,6110	0,0100
115	6,6544	6,6063	6,7307	6,6145	6,6733	6,5979	6,6538	6,6022	6,6110	6,6215
116	6,6544	6,6063	6,7307	6,6145	6,6733	6,6215	6,6538	6,6022	6,6110	0,0100
117	6,6544	6,6063	6,7307	6,6145	6,6733	6,6215	6,6538	6,6022	6,6110	6,6248
118	6,6544	6,6063	6,7307	6,6145	6,6733	6,6215	6,6538	6,6248	6,6110	6,6895
119	6,6544	6,6895	6,7307	6,6145	6,6733	6,6215	6,6538	6,6248	6,6110	0,0100
120	6,6544	6,6895	6,7307	6,6145	6,6733	6,6215	6,6538	6,6248	6,6110	6,6352

Iteração	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z ₁₀
121	6,6544	6,6895	6,7307	6,6145	6,6733	6,6215	6,6538	6,6248	6,6352	0,0100
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	6,6609	0,0100
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	6,6922	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	4,1522
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	4,1638
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	4,2283
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	4,2716	4,1522	5,2602
11	5,2602	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,1522	0,0100
12	5,2602	4,0630	7,1972	4,0729	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,1522	4,6789
13	5,2602	4,6789	7,1972	4,0729	4,2069	4,2283	4,1638	4,2716	4,1522	0,0100
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	4,4215	4,2716	4,7432	0,0100
20	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,2069	4,2283	4,4215	4,2716	4,7432	4,5899
21	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,2283	4,4215	4,2716	4,7432	0,0100
22	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,2283	4,4215	4,2716	4,7432	4,8516
23	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,4215	4,2716	4,7432	0,0100
24	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,4215	4,2716	4,7432	4,8921
25	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,4215	4,8921	4,7432	0,0100
26	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,4215	4,8921	4,7432	4,9853
27	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,9853	4,8921	4,7432	0,0100
28	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,5899	4,8516	4,9853	4,8921	4,7432	4,9040
29	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,9040	4,8516	4,9853	4,8921	4,7432	0,0100
30	5,2602	4,6789	7,1972	4,6773	4,9040	4,8516	4,9853	4,8921	4,7432	4,9801
31	5,2602	4,6789	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,9853	4,8921	4,7432	0,0100
32	5,2602	4,6789	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,9853	4,8921	4,7432	5,0074
33	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,9853	4,8921	4,7432	0,0100
34	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,9853	4,8921	4,7432	5,0543
35	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,9853	4,8921	5,0543	0,0100
36	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	4,8516	4,9853	4,8921	5,0543	5,1197
37	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	5,1197	4,9853	4,8921	5,0543	0,0100
38	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	5,1197	4,9853	4,8921	5,0543	5,1537
39	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
40	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	4,9040	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	5,1712
41	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
42	5,2602	5,0074	7,1972	4,9801	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	5,2208
43	5,2602	5,0074	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	0,0100
44	5,2602	5,0074	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	4,9853	5,1537	5,0543	5,2278
45	5,2602	5,0074	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	5,2278	5,1537	5,0543	0,0100
46	5,2602	5,0074	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	5,2278	5,1537	5,0543	5,2607
47	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	5,2278	5,1537	5,0543	0,0100
48	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	5,2278	5,1537	5,0543	5,2901
49	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	5,2278	5,1537	5,2901	0,0100
50	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,1197	5,2278	5,1537	5,2901	5,3318
51	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,3318	5,2278	5,1537	5,2901	6,2888
52	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	5,1712	5,3318	5,2278	6,2888	5,2901	6,4998
53	5,2602	5,2607	7,1972	5,2208	6,4998	5,3318	5,2278	6,2888	5,2901	6,5338
54	5,2602	5,2607	7,1972	6,5338	6,4998	5,3318	5,2278	6,2888	5,2901	6,6561
55	5,2602	5,2607	7,1972	6,5338	6,4998	5,3318	6,6561	6,2888	5,2901	0,0100
56	5,2602	5,2607	7,1972	6,5338	6,4998	5,3318	6,6561	6,2888	5,2901	5,9966
57	5,9966	5,2607	7,1972	6,5338	6,4998	5,3318	6,6561	6,2888	5,2901	6,8274
58	5,9966	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	5,3318	6,6561	6,2888	5,2901	6,9637
59	5,9966	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	5,3318	6,6561	6,2888	6,9637	0,0100
60	5,9966	6,8274	7,1972	6,5338	6,4998	5,3318	6,6561	6,2888	6,9637	6,3196

Iteração	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z _{it}
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	6,7229
69	7,1393	6,8274	7,1972	6,5338	6,7229	6,6058	6,6561	7,0673	6,9637	0,0100
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	6,9331	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	7,1717	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	7,0285	0,0100
94	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	6,9808	6,9966	7,0071	7,0673	7,0285	7,0470
95	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	6,9966	7,0071	7,0673	7,0285	0,0100
96	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	6,9966	7,0071	7,0673	7,0285	7,0529
97	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	7,0529	7,0071	7,0673	7,0285	0,0100
98	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	7,0529	7,0071	7,0673	7,0285	7,0591
99	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	7,0529	7,0591	7,0673	7,0285	0,0100
100	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	7,0529	7,0591	7,0673	7,0285	7,0708
101	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	7,0529	7,0591	7,0673	7,0708	0,0100
102	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0470	7,0529	7,0591	7,0673	7,0708	7,0821
103	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0529	7,0591	7,0673	7,0708	0,0100
104	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0529	7,0591	7,0673	7,0708	7,0871
105	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,0591	7,0673	7,0708	7,1765
106	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,1765	7,0673	7,0708	0,0100
107	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,1765	7,0673	7,0708	7,1033
108	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,1765	7,1033	7,0708	0,0100
109	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,1765	7,1033	7,0708	7,1056
110	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,1765	7,1033	7,1056	0,0100
111	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,0821	7,0871	7,1765	7,1033	7,1056	7,1136
112	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,0871	7,1765	7,1033	7,1056	0,0100
113	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,0871	7,1765	7,1033	7,1056	7,1173
114	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,1173	7,1765	7,1033	7,1056	0,0100
115	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,1173	7,1765	7,1033	7,1056	7,1259
116	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,1173	7,1765	7,1259	7,1056	0,0100
117	7,1393	7,1717	7,1972	7,1265	7,1136	7,1173	7,1765	7,1259	7,1056	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	7,1325	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;
```

```
{ ===== }
```

```
{ =      Constantes Otimização Downhill      = }
```

```
{ ===== }
```

```
Const Downhill_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 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;
```

```
ArqOpt : 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;
```

```
    ftol: Single; Var nfunc, best: Integer);
```

```
procedure CalculaGMUTSDownhill(Ruido : Integer);
```

```
procedure InvTransferData;
```

implementation

```
{ $R *.DFM }
```

```
Var IndPar : Integer;
```

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

```
procedure TFD downhill.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(IntToStr(I)+' - '+Downhill_Opt_Param[I]);
```

```
end;
```

```
end;
```

```
LB1.Visible := False;
```

```
with DownhillOpt do
```

```

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

{ ===== }
{ =   Rotina AtualizaTelaParametros   = }
{ ===== }

procedure TFD downhill.AtualizaTelaParametros;

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';
      For I := 1 to 8 do
        begin
          Cells[0,I] := InttoStr(I);
          Cells[1,I] := Downhill_Opt_Param[DownhillParam[I]];
          For J := 1 to 2 do
            begin

```

```

    Cells[J+1,I] := FloatToStrf(DownhillLimit[J,I],ffixed,6,2);
  end;
end;
Noise1.Caption := NoiseFileName[1];
Noise2.Caption := NoiseFileName[2];
end;
end;

```

```

{ ===== }
{ =   Rotina InvTransferData   = }
{ ===== }

```

```

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;

```

```

{ ===== }
{ = Rotina Abre Arquivo Configuração Downhill = }
{ ===== }

```

```

procedure TFDownhill.Open1Click(Sender: TObject);

```

```

var I, J : Integer;

begin
  OpenF.Title := 'Open OPT Data File';
  OpenF.Filter := 'OPT Data File (*.opt)|*.opt|';
  If OpenF.Execute then
    begin
      AssignFile(ArqOpt, OpenF.FileName);
      Reset(ArqOpt,1);
      Seek(ArqOpt,0);
      BlockRead(ArqOpt,TipoOtimizacao,2);
      If TipoOtimizacao = 2 then
        begin
          BlockRead(ArqOpt,DownhillOpt,SizeOf(DownhillOptType));
        end;
      CloseFile(ArqOpt);
      AtualizaTelaParametros;
    end;
  end;

  { ===== }
  { = Rotina Salva Arquivo Configuração Downhill = }
  { ===== }

  procedure TFDownhill.Save1Click(Sender: TObject);

var i : SmallInt;

begin
  InvTransferData;
  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));

    SaveF.FileName := SaveF.FileName+'.opt';
    AssignFile(ArqOpt, SaveF.FileName);
    Rewrite(ArqOpt,1);
    Seek(ArqOpt,0);
    TipoOtimizacao := 2;
    BlockWrite(ArqOpt,TipoOtimizacao,2);
    BlockWrite(ArqOpt,DownhillOpt,SizeOf(DownhillOpt));
    CloseFile(ArqOpt);
  end;
end;

```

```

{ ===== }
{ =   Rotina Table Management   = }
{ ===== }

```

```

procedure TFD downhill.sg1Click(Sender: TObject);
begin
  With SG1, 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 LABEL CB1 CHANGE   = }
{ ===== }

```

```

procedure TFD downhill.LB1Click(Sender: TObject);

```

```

begin

```

```

  with LB1, SG1, DownhillOpt do

```

```

    begin

```

```

      DownhillParam[IndPar] := ItemIndex+1;

```

```

      Cells[1,IndPar] := Downhill_Opt_Param[DownhillParam[IndPar]];

```

```

      LB1.Visible := False;

```

```

    end;

```

```

  end;

```

```

{ ===== }
{ =   Rotina Abre Archivo de Ruído 1   = }
{ ===== }

```

```

procedure TFD downhill.Noise1Click(Sender: TObject);

```

```

begin

```

```

  OpenF.Title := 'Open VPG Data File';

```

```

  OpenF.Filter := 'VPG Data File (*.vpg)|*.vpg';

```

```

  If OpenF.Execute then

```

```

    begin

```

```

      DownhillOpt.NoiseFileName[1] := OpenF.FileName;

```

```

    end;

```

```

    Noise1.Caption := DownhillOpt.NoiseFileName[1];

```

```

  end;

```

```

{ ===== }

```

```

{ =   Rotina Abre Arquivo de Ruído 2   = }
{ ===== }
procedure TFD downhill.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 TFD downhill.Exit1Click(Sender: TObject);
begin
  Close;
end;

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

begin
  (* não faz nada *)
end;

{ ===== }
{ =   Rotina RUN SIMULATION   = }
{ ===== }
procedure TFD downhill.Run1Click(Sender: TObject);

```

```
const SWarningText = 'Save changes to %s?';

var I, J, K : Integer;
    Cancela   : Boolean;
    p         : DimSimplexEval;
    y         : DimSimplexExt;
    ndim      : Integer;
    ftol      : Single;
    nfunc     : Integer;
    best      : Integer;
    Factor    : DimEval;

    ix,jx : integer;

begin
    Cancela := False;
    if ModelChange then
        begin
            case MessageDlg(Format(SWarningText, [ArqEntradaN]), 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 := ArqEntradaN;
  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;
```

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

```
For I := 1 to 12 do  
begin  
  Factor[I] := p[best,I];  
end;  
y[best] := func(Factor);
```

```
ArqEntradaN := CurrFileName;  
LeArquivoDados;
```

```
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] := FloatToStrf(DownhillRes[1,6],ffixed,6,1);  
  Cells[1,1] := FloatToStrf(DownhillRes[2,6],ffixed,6,1);  
  Cells[2,1] := FloatToStrf((DownhillRes[1,6] + DownhillRes[2,6])/2,ffixed,6,1);  
end;  
For I := 1 to 8 do  
begin  
  With SG3 do
```

```

begin
  Cells[I-1,0] := IntToStr(I);
  Cells[I-1,1] := FloatToStrf(Factor[I],ffixed,6,2);
end;
end;
end;
end;

```

```

{ ===== }
{ = Rotina Função de Otimização = }
{ = Daniel Vilela - Maio/2003 = }
{ =           = }
{ = Factor -> Matriz de fatores = }
{ ===== }

```

```
Function func(Factor: DimEval) : Single;
```

```

var Noise    : Integer;
    J        : Integer;
    IEventos : Integer;
    ISim     : Integer;
    ISimGS   : Integer;
    DumX, DumY : Single;
    NoLimite : Boolean;

```

```

begin
  NoLimite := True;
  For J := 1 to 8 do
  begin
    With DownhillOpt do
    begin
      If (Factor[J] > DownhillLimit[2,J]) or (Factor[J] < DownhillLimit[1,J]) then
      begin

```

```
NoLimite := False;
func := 100;
end;
end;
end;

If NoLimite then
begin
  With DownhillOpt do
  begin
    For Noise := 1 to 2 do
    begin
      ArqEntradaN := 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.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;
FechaEstatisticasVRIDE;
CalculaGMUTSDownhill(Noise);
end;
end;
end;
end;
func := 2/(DownhillRes[1,6]+DownhillRes[2,6]);
end;
end;

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

{ = 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 ftol = }
{ = 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 = }

```

```

{ = função dentro da tolerância ftol. = }
{ = ndim -> Número de dimensões do problema = }
{ = ftol -> Tolerância de convergência fracional a ser atingida pela função = }
{ = nfunc -> Número de avaliações da função utilizados = }
{
=====
=====}

```

```

Procedure Amoeba(Var p: DimSimplexEval; Var y: DimSimplexExt; ndim: Integer;
    ftol: Single; Var nfunc, best: Integer);

```

```

Label 99;

```

```

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

```

```

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

```

```

Function amotry(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;
    ptry : ^DimEval;

```

```
begin
  new(ptry);
  fac1 := (1.0-fac)/ndim;
  fac2 := fac1-fac;
  For j := 1 to ndim do
    begin
      ptry^[j] := sum[j]*fac1 - p[ihi,j]*fac2;
    end;
  ytry := func(ptry^); (* avalia a função no ponto tentativa *)
  nfunc := nfunc + 1;
  If ytry < y[ihi] then (* se é melhor que o maior, então substitui o maior *)
    begin
      y[ihi] := ytry;
      For j := 1 to ndim do
        begin
          sum[j] := sum[j] + ptry^[j] - p[ihi,j];
          p[ihi,j] := ptry^[j];
        end;
      end;
      amotry := ytry;
      Dispose(ptry);
    end;
```

```
begin
  New(psum);
  mpts := ndim+1;
  nfunc := 0;
  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;
```

(* tolcount := 0; (* variável para controlar queda em mínimos locais *)

While true do

begin

ilo := 1; (* primeiramente determina-se o ponto de máximo (pioor), 2o.
maior e menor (melhor) *)

If y[1] > y[2] then

begin

ihi := 1;

inhi := 2;

end

else

begin

ihi := 2;

inhi := 1;

end;

For i := 1 to mpts do

begin

If y[i] < y[ilo] then ilo := i;

If y[i] > y[ihi] then

begin

inhi := ihi;

ihi := i;

end

else

begin

If y[i] > y[inhi] then

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

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

(* If rtol < ftol/50 then
begin
  inc(tolcount);
  alpha := (2+tolcount)*alpha0;
  beta := 0.5*beta0;
  gamma := (2+2*tolcount)*gamma0;
end
else
begin
  tolcount := 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 := FloatToStrf(1/ytry,ffixed,6,2);
FDownhill.Refresh;

```

```
(* Retorna se satisfatório *)
```

```
If rtol < ftol/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 := amotry(p,y,psum^,ndim,ihl,nfunc,-alpha);
```

```
(* Se resultado é melhor que o melhor ponto, tenta um fator gamma de
extrapolação *)
```

```
If ytry <= y[ilo] then
```

```
begin
```

```
  ytry := amotry(p,y,psum^,ndim,ihl,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[ihl] then
```

```
begin
```

```
  ysave := y[ihl];
```

```
  ytry := amotry(p,y,psum^,ndim,ihl,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;
  nfunc := nfunc + ndim;

  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;

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;
```

```

Label5: 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 sg1Db1Click(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 CalculaGMUTSTaguchi(Rodada, Ruido : Integer);
procedure AtualizaTelaParametros;
procedure MarcaArquivoComponente(Parametro, Nivel : Integer);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

{ ===== }
{ =      Constantes Otimização Taguchi      = }
{ ===== }

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),

```

```

(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

```

1 - Component ASCII File *)

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

var

```
FVRTaguchi   : TFVRTaguchi;
TipoOtimizacao : Integer;
ArqOpt       : File;
CurrFileName : FileNameType;
TaguchiOpt   : TaguchiOptType;
TaguchiRes   : Array[1..19,1..2,1..6] of Single; (* rodada, ruído e mandamento -
19o. 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;
MaiorSN       : Single;
```

implementation

uses VPG_Par;

```
{ $R *.DFM }
```

```
Var IndPar : Integer;
```

```
{ ===== }
{ =   Rotina Abre Arquivo de Ruído 1   = }
{ ===== }
```

```
procedure TFVRTaguchi.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;
```

```
    end;
```

```
  Noise1.Caption := TaguchiOpt.NoiseFileName[1];
```

```
end;
```

```
{ ===== }
```

```
{ =   Rotina Abre Arquivo de Ruído 2   = }
```

```
{ ===== }
```

```
procedure TFVRTaguchi.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;
```

```
    end;
```

```
  Noise2.Caption := TaguchiOpt.NoiseFileName[2];
```

```
end;
```

```
{ ===== }
```

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

```
{ ===== }
```

```
procedure TFVRTaguchi.FormShow(Sender: TObject);
```

```
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(IntToStr(I)+' - '+Taguchi_Opt_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;
  AtualizaTelaParametros;
  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 SG1, 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] := FloatToStrf(TaguchiLevelScaling[I,J],ffixed,6,4);
```

```
end;
```

```
end;
```

```
Cells[4,1] := '0';
```

```
Noise1.Caption := NoiseFileName[1];
```

```
Noise2.Caption := NoiseFileName[2];
```

```
end;
```

```
end;
```

```
{=====}
```

```

{ =      Rotina InvTransferData      = }
{ ===== }
procedure TFVRTaguchi.InvTransferData;

Var I , J : Integer;

begin
  with SG1, TaguchiOpt do
  begin
    For I := 1 to 8 do
    begin
      For J := 1 to 3 do
      begin
        If TaguchiLevelType[I,J] = 0 then
        begin
          TaguchiLevelScaling[I,J] := StrToFloat(Cells[1+J,I]);
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

{ ===== }
{ =      Rotina  CLOSE      = }
{ ===== }
procedure TFVRTaguchi.Exit1Click(Sender: TObject);
begin
  Close;
end;

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

```

```
begin
```

```
  InvTransferData;
```

```
end;
```

```
{ ===== }
```

```
{ =      Rotina  RUN SIMULATION      = }
```

```
{ ===== }
```

```
procedure TFVRTaguchi.Run1Click(Sender: TObject);
```

```
const SWarningText = 'Save changes to %s?';
```

```
var Noise    : Integer;
```

```
  I, J      : Integer;
```

```
  Cancela   : Boolean;
```

```
  IEventos  : Integer;
```

```
  ISim      : Integer;
```

```
  ISimGS    : Integer;
```

```
  DumX, DumY : 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, [ArqEntradaN]), mtConfirmation,
```

```
        [mbYes, mbNo, mbCancel], 0) of
```

```
        id_Yes:
```

```
begin
  SalvaArquivoDados;
end;

id_Cancel:
begin
  Cancela := True;
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[I,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], LeuOK);
    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
            IndSim := IndSim+1;
            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;
    end;
end;

```

```

    FechaEstatisticasVRIDE;
    CalculaGMUTSTaguchi(I, Noise);
end;
PRB1.Position := PRB1.Position+1;
end;
end;
end;
end;

For I := 1 to 18 do
begin
    SignalToNoise[I] := -
10*Log10((1/2)*((1/Sqr(TaguchiRes[I,1,6]))+(1/Sqr(TaguchiRes[I,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;
NParam[1,3] := 1; (* 1o. parametro só tem 2 níveis - isto é para evitar erro de
divisão *)
For I := 1 to 18 do
begin
    For J := 1 to 8 do
begin
    SNParam[J, L18_Matrix[I,J]] := SNParam[J, L18_Matrix[I,J]] +
SignalToNoise[I];
    Inc(NParam[J, L18_Matrix[I,J]]);

```

```
end;
end;
For I := 1 to 3 do
begin
  For J := 1 to 8 do
  begin
    SNPParam[J,I] := SNPParam[J,I]/NParam[J,I];
  end;
end;

For J := 1 to 8 do
begin
  MaiorSN := -1e10;
  For I := 1 to 3 do
  begin
    If SNPParam[J,I] > MaiorSN then
    begin
      BestParam[J] := I;
      MaiorSN := SNPParam[J,I];
    end;
  end;
end;

For Noise := 1 to 2 do
begin
  ArqEntradaN := 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.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;
        FechaEstatisticasVRIDE;
        CalculaGMUTSTaguchi(19, Noise);
        PRB1.Position := PRB1.Position+1;
    end;
end;

```

```

    end;
  end;
end;
SignalToNoise[19] := -
10*Log10((1/2)*((1/Sqr(TaguchiRes[19,1,6]))+(1/Sqr(TaguchiRes[19,2,6]))));

ArqEntradaN := CurrFileName;
LeArquivoDados;

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] := FloatToStrf(TaguchiRes[I,1,6],ffixed,6,1);
    Cells[I,2] := FloatToStrf(TaguchiRes[I,2,6],ffixed,6,1);
    Cells[I,3] := FloatToStrf((TaguchiRes[I,1,6] +
TaguchiRes[I,2,6])/2,ffixed,6,1);
    Cells[I,4] := FloatToStrf(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] := FloatToStrf(SNParam[J,I],ffixed,6,2);
    end;
  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;

{ ===== }
{ =   Rotina LABEL CB1 CHANGE   = }
{ ===== }

procedure TFVRTaguchi.LB1Click(Sender: TObject);
begin
  with LB1, SG1, TaguchiOpt do
  begin
    TaguchiParam[IndPar] := ItemIndex+1;
    Cells[1,IndPar] := Taguchi_Opt_Param[TaguchiParam[IndPar]];
  end;
end;
end;

```

```

    LB1.Visible      := False;
end;
end;

{ ===== }
{ =      Rotina Table Management 1      = }
{ ===== }

procedure TFVRTaguchi.sg1Click(Sender: TObject);
begin
    With SG1, CarFileD.SPar do
        begin
            IndPar := Row;
            Case Col of
                1 : begin
                    LB1.Top      := 60 + (Row-1)*18;
                    LB1.Visible := True;
                    end;
                2, 3, 4 : begin
                    If TaguchiOpt.TaguchiLevelType[Row,Col-1] = 1 then
                        begin
                            MarcaArquivoComponente(Row, Col-1);
                        end;
                    end;
                else;
            end;
        end;
    end;

{ ===== }
{ =      Rotina Table Management 2      = }
{ ===== }

procedure TFVRTaguchi.sg1DbClick(Sender: TObject);

```

```

begin
  With SG1, 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] := FloatToStrf(TaguchiLevelScaling[Row,Col-
1],ffixed,6,4);
          end
        else
          begin
            TaguchiOpt.TaguchiLevelType[Row,Col-1] := 1;
            MarcaArquivoComponente(Row, Col-1);
          end;
        end;
      end;
    else;
  end;
end;
end;
end;

```

```

{ ===== }
{ = Rotina Abre Arquivo Configuração Taguchi = }
{ ===== }

```

```

procedure TFVRTaguchi.Open1Click(Sender: TObject);

```

```

var I, J : Integer;

```

```

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

```

```

If OpenF.Execute then
begin
  AssignFile(ArqOpt, OpenF.FileName);
  Reset(ArqOpt,1);
  Seek(ArqOpt,0);
  BlockRead(ArqOpt,TipoOtimizacao,2);
  If TipoOtimizacao = 1 then
  begin
    BlockRead(ArqOpt,TaguchiOpt,SizeOf(TaguchiOptType));
  end;
  CloseFile(ArqOpt);
  AtualizaTelaParametros;
end;
end;

{ ===== }
{ = Rotina Salva Arquivo Configuração 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;

```

```

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

{ ===== }
{ =   Rotina Marca Arquivo Componente   = }
{ ===== }

procedure TFVRTaguchi.MarcaArquivoComponente(Parametro, Nivel : Integer);

var LeuOK   : Boolean;
    ArqComp  : 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(ArqComp, OpenF.FileName);
            Reset(ArqComp);
            ReadLn(ArqComp, Dummy);
            ReadLn(ArqComp, Dummy);
        end;
    end;
end;

```

```
CompType := Copy(Dummy, 1, Pred(Length(Dummy)));
LeuOK := False;
With TaguchiOpt, SG1 do
begin
  If CompType = 'SPRING' then
  begin
    If TaguchiParam[Parametro] in [1,2] then
    begin
      ReadLn(ArqComp, Dummy);
      ReadLn(ArqComp, Dummy);
      ReadLn(ArqComp, Dummy);
      CompType := Copy(Dummy, 1, Pred(Length(Dummy)));
      If CarSusp.SuspCarac.FrontS = TwoWTorsion then
      begin
        If CompType = 'TORSIONAL STIFFNESS' then
        begin
          LeuOK := True;
        end;
      end
    else
    begin
      If CompType = 'DEFLECTION CURVE' then
      begin
        LeuOK := True;
      end;
    end;
  end;
end;
If CompType = 'SHOCK ABSORBER' then
begin
  If TaguchiParam[Parametro] in [3,4] then
  begin
```

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

```
If LeuOK then
begin
  TaguchiLevelType[Parametro, Nivel] := 1;
  TaguchiLevelFile[Parametro, Nivel] := OpenF.FileName;
  Cells[Nivel+1, Parametro] := 'File';
end
else
begin
  TaguchiLevelType[Parametro, Nivel] := 0;
  Cells[Nivel+1, Parametro] :=
FloatToStrf(TaguchiLevelScaling[Parametro,Nivel],ffixed,6,4);
end;
end;
CloseFile(ArqComp);
end
else
begin
  With SG1, TaguchiOpt do
  begin
    TaguchiLevelType[Parametro, Nivel] := 0;
    Cells[Nivel+1, Parametro] :=
FloatToStrf(TaguchiLevelScaling[Parametro,Nivel],ffixed,6,4);
end;
end;
end;

end.
```