

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE MATERIAIS DE ATRITO
DE SISTEMAS DE FREIO USANDO
ALGORITMOS GENÉTICOS

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

JEFERSON GONÇALVES

Florianópolis, 2004.

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE MATERIAIS DE ATRITO DE SISTEMAS DE
FREIO USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

JEFERSON GONÇALVES

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO VIBRAÇÕES E
ACÚSTICA, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr
Coordenador

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.
Orientador

Prof. Roberto Jordan, Dr. Eng
Co-Orientador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.

Prof. Alberto Tamagna, Dr.

Prof. Fernando Cabral, Ph.D.

Marcos R. Soares, Dr

Prof. Lauro Cesar Nicolazzi, Dr. Eng.

DEDICATÓRIA

**A Fernanda.
Amiga, companheira e esposa.
Por esta e muitas outras caminhadas.
Saiba que você foi o todo, e também as partes.**

AGRADECIMENTOS

A meu irmão, Alexandre, que foi complacente com minhas necessidades e me deu o apoio que eu necessitava.

Aos meus orientadores, Arcanjo Lenzi e Roberto Jordan, que foram amigos antes de orientadores.

À empresa Fras-le, na pessoa de Georges Pitseys, Gilberto Crosa e Flávio Marcon, que apoiaram este trabalho de mútuo interesse.

Aos amigos do Laboratório Físico, do Eletrônico e a todos os demais colegas que contribuíram concretamente para a execução deste trabalho, enriquecendo-o com opiniões, sugestões e críticas.

Aos bolsistas do LVA, que auxiliaram no levantamento de parâmetros que foram extremamente úteis ao entendimento do problema estudado.

Em fim, a todos que de alguma forma acrescentaram algo a esta caminhada.

Meu sincero obrigado, e meu eterno reconhecimento.

**“Quando você pensa que já sabe todas as respostas,
vem a vida e muda todas as perguntas”.**

SUMÁRIO

Lista de Figuras	X
Lista de Tabelas	xiv
Resumo	xvii
Abstract	xviii
1. Introdução	1
1.1. Motivação	2
1.2. Breve Histórico Sobre Freios	3
1.3. Proposta de Tese	5
1.4. Infra-estrutura e Custos Envolvidos	6
1.5. Conteúdo da Tese	7
2. Sistemas de Freios e Geração de Ruído	9
2.1. O Sistema de Freio a Disco	10
2.2. Mecanismo de Geração de Ruído	13
2.2.1. Classificação do Ruído de Freio	15
2.3. Parâmetros Relevantes na Geração do Ruído	17
2.3.1. Parâmetros Ambientais e de Aplicação	17
2.3.2. Amortecimento e Rigidez	18
2.3.3. Os Efeitos da Temperatura	20
2.4. Modelos Analíticos	25
2.4.1. Resultados do Modelo North	31

2.5. Composição de Materiais de Atrito	32
2.6. Efeitos Tribológicos Ligados ao Par de Atrito	37
2.7. Metodologia e Equipamentos Usados na Avaliação dos Parâmetros	40
3. Processos de Otimização	45
3.1. Projeto Fatorial 2^k	46
3.2. Método Taguchi	50
3.3. Método Multi-Critério	53
4. Algoritmos Genéticos	60
4.1. Histórico	61
4.2. Terminologia Usada em Algoritmos Genéticos	63
4.3. Diferenças entre AGs e Outros Métodos	64
4.3.1. Algoritmos Genéticos e Recozimento Simulado	65
4.4. Operadores Genéticos em Codificação Binária	66
4.4.1. Operadores de <i>Crossover</i>	67
4.4.2. Operadores de Mutação	68
4.5. Operadores Genéticos em Codificação Real	69
4.5.1. Operadores de <i>Crossover</i>	69
4.5.2. Operadores de Mutação	72
4.6. Avaliação da População e Métodos de Seleção	74
4.6.1. Avaliação da População	74
4.6.2. Métodos de Seleção	75
4.6.2.1. Seleção Via Método da Roleta	75
4.6.2.2. Seleção por Ordenação	78
4.6.2.3. Seleção por Torneio	79

4.7. Parâmetros de Influência e Configurações	79
4.7.1. Tamanho da População	80
4.7.2. Probabilidade de Cruzamento	80
4.7.3. Probabilidade de Mutação	81
4.8. Vantagens e Desvantagens dos AGs	82
4.9. Estudos de Caso Usando Codificação Binária	84
4.9.1. AG sem Uso da Mutação	84
4.9.2. AG com Uso da Mutação	85
4.9.3. AG com Valores Decimais: Um Novo Passo	90
4.10. Estudo de Caso Usando Codificação Real	92
4.10.1. Aplicativo em Delphi®	92
4.10.2. Resultados Iniciais	93
4.11. Conclusões Preliminares	96
5. Estudos de Influência da Composição Sobre os Parâmetros	98
5.1. Projeto Fatorial 2^k	99
5.2. Testes Experimentais Envolvidos	101
5.2.1. Testes em Dinamômetro	101
5.2.2. Avaliação de Rigidez Estrutural	111
5.2.3. Avaliação de Amortecimento Estrutural	115
5.2.4. Avaliação da Dureza Superficial	120
5.3. Conclusões Sobre o Projeto Fatorial	122
6. A Função Objetivo	126
6.1. Introdução	127

6.2. Premissas	127
6.3. Método de Obtenção	130
6.4. Escalonamento de Grandezas	132
7. O Aplicativo AG Noise	134
7.1. Características Principais	135
7.2. Recursos Disponíveis	139
7.3. Testes de Convergência	140
7.4. Discussões Sobre Convergência	144
8. Aplicações Práticas	146
8.1. Dados de Entrada para o Aplicativo	147
8.2. Composições Sugeridas pelo Aplicativo	148
8.3. Resultados Experimentais	153
8.4. Análise dos Erros Obtidos	156
9. Conclusões	159
10. Sugestões para Trabalhos Futuros	165
11. Referências Bibliográficas	167

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 : Sistema de freio com <i>caliper</i> fixo	10
Figura 2.2 : Sistema de freio com <i>caliper</i> flutuante	11
Figura 2.3 : <i>Caliper</i> flutuante típico	11
Figura 2.4 : <i>Caliper</i> duplo	12
Figura 2.5 : Diferentes tipos de canais de ventilação utilizadas em discos ventilados	12
Figura 2.6 : Sistema de freio com disco de carbono	13
Figura 2.7 : Classificação do ruído de freio feita por Lee	15
Figura 2.8 : Resultado típico de teste de ruído em dinamômetro inercial para freios	17
Figura 2.9 : Tipos comerciais de <i>shims</i>	19
Figura 2.10 : Camadas usuais de um <i>shim</i>	19
Figura 2.11 : Curva de <i>fade</i> e recuperação, 1ª etapa	22
Figura 2.12 : Curva de <i>fade</i> e recuperação, 2ª etapa	22
Figura 2.13 : Gráfico proveniente de teste de desgaste DPF 24	23
Figura 2.14 : Ocorrência de ruído em função da temperatura para dados entre 2001-2204	25
Figura 2.15 : Modelo proposto por North	29
Figura 2.16 : Elementos de um material de atrito	32
Figura 2.17 : Possíveis substituições ao amianto	37
Figura 2.18 : Potência do motor x Potência gerada pelo sistema de freio	39
Figura 2.19 : Ilustração do contato dos platôs primários	40
Figura 2.20 : Sistema de freio utilizado nos testes experimentais	42

Figura 2.21 : Painel do dinamômetro inercial para teste de sistemas de freio	43
Figura 2.22 : Câmara do dinamômetro inercial para teste de sistemas de freio	43
Figura 2.23 : Máquina de compressibilidade	44
Figura 3.1 : Combinações do projeto 2^2	47
Figura 4.1 : Esquema de cruzamento de um ponto em codificação binária	68
Figura 4.2 : Esquema de mutação em codificação binária	68
Figura 4.3 : Esquema de <i>crossover</i> plano	70
Figura 4.4 : Esquema de <i>crossover</i> aritmético	71
Figura 4.5 : Esquema de mutação uniforme	73
Figura 4.6 : Esquema de mutação por deslocamento	73
Figura 4.7 : Exemplo do “método da roleta”	77
Figura 4.8 : Primeira execução do AG com Mutação	86
Figura 4.9 : Segunda execução do AG com Mutação	87
Figura 4.10 : Terceira execução do AG com Mutação	87
Figura 4.11 : AG maximizando a função $y(x)=x^2 \cdot \sin(x)$	89
Figura 4.12 : Andamento do AG maximizando a função $y(x)=x^2 \cdot \sin(x)$	89
Figura 4.13 : Maximização da função $y(x)=x^2 \cdot \sin(x)$ com valores decimais	91
Figura 4.14 : Tela principal do aplicativo em Delphi®	93
Figura 5.1 : Sistema de freio utilizado para os testes de dinamômetro	102
Figura 5.2 : Gráfico da distribuição normal dos resíduos do teste de ruído	103
Figura 5.3 : Efeitos de <i>B</i> sobre o ruído	104
Figura 5.4 : Comportamento do ruído	104
Figura 5.5 : Gráfico normal dos resíduos para o atrito	106
Figura 5.6 : Efeito do fator <i>B</i> sobre o atrito	107
Figura 5.7 : Efeito do fator <i>C</i> sobre o atrito	107

Figura 5.8 : Comportamento do coeficiente de atrito	108
Figura 5.9 : Gráfico normal dos resíduos para o desgaste	109
Figura 5.10 : Efeito do fator A sobre o desgaste	109
Figura 5.11 : Efeito da interação BC sobre o desgaste	110
Figura 5.12 : Comportamento do desgaste	110
Figura 5.13 : Resíduos do teste de rigidez a frio	112
Figura 5.14 : Efeito de B sobre a rigidez a frio	112
Figura 5.15 : Gráfico normal dos resíduos para rigidez a quente	114
Figura 5.16 : Efeito de B sobre a rigidez à quente	114
Figura 5.17 : Gráfico dos resíduos para amortecimento	116
Figura 5.18 : Efeito de B sobre o amortecimento médio	116
Figura 5.19 : Efeito de C sobre o amortecimento médio	117
Figura 5.20 : Comportamento do amortecimento médio	118
Figura 5.21 : Gráfico normal dos resíduos para os dados de dureza	119
Figura 5.22 : Efeito do fator B sobre a dureza superficial	121
Figura 6.1 : Tipo de comportamento admitido (azul) e um dos possíveis comportamentos (vermelho)	125
Figura 7.1 : Seleção de operadores genéticos	132
Figura 7.2 : Configurações de parâmetros para o processo de otimização e operadores genéticos	133
Figura 7.3 : Configurações de limites percentuais e massa total da mistura	133
Figura 7.4 : Controle de parâmetros relevantes e definição de alvos de otimização	134
Figura 7.5 : Caixa de configuração dos custos de componentes da formulação	134

Figura 7.6 : Caixa onde são apresentados os resultados obtidos após otimização da mistura	135
Figura 7.7 : Menu suspenso e menu de ferramentas do aplicativo	135
Figura 7.8 : Tela principal do aplicativo AG <i>Noise</i>	136
Figura 7.9 : Resultado do projeto fatorial para o parâmetro ruído	138
Figura 7.10 : Resultado do projeto fatorial para o parâmetro atrito	139
Figura 7.11 : Resultado do projeto fatorial para o parâmetro desgaste	140
Figura 9.1 : Efeito dos níveis x_n no comportamento das iterações	159

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1</i> : Dados do Projeto Fatorial 2^2	46
<i>Tabela 3.2</i> : Análise de Variância do Projeto 2^2	50
<i>Tabela 4.1</i> : Resultado do AG sem Mutação	85
<i>Tabela 4.2</i> : Resultado do AG com Mutação	86
<i>Tabela 4.3</i> : Resultado do AG com Outras Funções	91
<i>Tabela 4.4</i> : Resumo dos Estudos de Caso	92
<i>Tabela 4.5</i> : Resultados do aplicativo em Delphi®	95
<i>Tabela 4.6</i> : Novos Resultados do aplicativo em Delphi®	96
<i>Tabela 5.1</i> : Combinações do projeto 2^3	100
<i>Tabela 5.2</i> : Resultados dos testes de ruído	102
<i>Tabela 5.3</i> : Resultados dos testes de coeficiente de atrito	105
<i>Tabela 5.4</i> : Resultados dos testes de desgaste	105
<i>Tabela 5.5</i> : Resultados dos testes de rigidez a frio	111
<i>Tabela 5.6</i> : Resultados dos testes de rigidez a quente	113
<i>Tabela 5.7</i> : Resultados dos testes de amortecimento	115
<i>Tabela 5.8</i> : Resultados dos testes de dureza	119
<i>Tabela 5.9</i> : Dados agrupados das influências para o projeto 2^3	121
<i>Tabela 7.1</i> : Resultado da Otimização Usando Apenas Ruído Global como Parâmetro Relevante	137
<i>Tabela 7.2</i> : Resultado da Otimização Usando Apenas Atrito Médio como Parâmetro Relevante	139

Tabela 7.3 : Resultado da Otimização Usando Apenas Desgaste Médio como Parâmetro Relevante	140
Tabela 7.4 : Resultado da Otimização Usando Apenas o Custo da Mistura como Parâmetro Relevante	141
Tabela 8.1 : Configuração de limites percentuais dos testes experimentais	145
Tabela 8.2 : Percentuais Fornecidos pelo Aplicativo e Percentuais Aplicados na Confeção da Pastilha: Ruído	146
Tabela 8.3 : Valores Esperados para os Parâmetros Otimizados. Parâmetro Relevante: Ruído	146
Tabela 8.4 : Percentuais Fornecidos pelo Aplicativo e Percentuais Aplicados na Confeção da Pastilha: Atrito	147
Tabela 8.5 : Valores Esperados para os Parâmetros Otimizados. Parâmetro Relevante: Atrito	147
Tabela 8.6 : Percentuais Fornecidos pelo Aplicativo e Percentuais Aplicados na Confeção da Pastilha: Desgaste	148
Tabela 8.7 : Valores Esperados para os Parâmetros Otimizados. Parâmetro Relevante: Desgaste	148
Tabela 8.8 : Percentuais Fornecidos pelo Aplicativo e Percentuais Aplicados na Confeção da Pastilha: Custo	148
Tabela 8.9 : Valores Esperados para os Parâmetros Otimizados. Parâmetro Relevante: Desgaste	149
Tabela 8.10 : Percentuais Fornecidos pelo Aplicativo e Percentuais Aplicados na Confeção da Pastilha: Geral	149
Tabela 8.11 : Valores Esperados para os Parâmetros Otimizados. Parâmetro Relevante: Todos	150

Tabela 8.12 : Resultados Experimentais para as Cinco Formulações Otimizadas ..	150
Tabela 8.13 : Erros nos Resultados Experimentais Durante a Otimização do Atrito Médio	151
Tabela 8.14 : Erros nos Resultados Experimentais Durante a Otimização do Custo da Mistura	151
Tabela 8.15 : Erros nos Resultados Experimentais Durante a Otimização do Desgaste Médio	152
Tabela 8.16 : Erros nos Resultados Experimentais Durante a Otimização do Ruído Médio	152
Tabela 8.17 : Erros nos Resultados Experimentais Durante a Otimização de Todos os Parâmetros Simultaneamente	153
Tabela 8.18 : Distribuição dos Erros nos Resultados Experimentais	153

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo criar quatro funções que representem os comportamentos dos seguintes parâmetros de um material de atrito, a partir de sua composição: custo, ruído global, desgaste médio e atrito médio. A ferramenta escolhida para criar as funções é o delineamento fatorial de experimentos. Criadas estas funções, propôs-se uma função objetivo, que será o parâmetro de controle para um algoritmo de otimização, na forma de um aplicativo computacional. O algoritmo em questão foi desenvolvido usando Algoritmos Genéticos. Uma vez criadas as funções e o algoritmo, sua eficiência e convergência foram testadas.

Garantidas a eficiência e a convergência do algoritmo, o mesmo foi usado para produzir uma série de materiais de atrito. As propostas de materiais de atrito foram confeccionadas e testadas utilizando-se procedimentos reconhecidos pelas grandes empresas fabricantes de materiais de atrito.

De posse dos resultados experimentais, foram verificados os erros obtidos em relação aos resultados previstos pelo aplicativo. Os erros e as imprecisões dos métodos aplicados foram descritos e explorados.

Diretrizes para as correções e para os avanços futuros foram estabelecidas.

ABSTRACT

The initial objective of this work was to create four equations that could reproduce the behavior of each of the following parameters of brake pad material: cost, noise, average wear and average friction coefficient, when its composition was changed. The tool chosen for this job was design of experiments. After the development functions, an objective function was proposed. This objective function was minimized by an optimization algorithm, based on the Genetic Algorithm method. When the objective function and the algorithm were well established, precision and convergence were tested.

Then the algorithm was used to generate some formulations. Each of these formulations was tested using a specific brake pad shape and brake system. The experimental procedures were the same used by other brake pad world labs.

With the results on hands, the results obtained by the experimental tests were put side by side with the predictions of the developed software. The reasons of the errors and divergences were explored and discussed.

Some directions to improve corrections and give new directions for the research were established.

Introdução

Neste capítulo são apresentadas as razões que motivaram a escolha do tema abordado e uma introdução sobre o assunto desenvolvido. Mostram-se, ainda, os recursos disponíveis para a realização dos ensaios de laboratório e análises computacionais e os custos envolvidos nos ensaios.

1.1. Motivação	2
1.2. Breve Histórico Sobre Material de Atrito	3
1.3. Proposta de Tese	5
1.4. Infra-estrutura e Custos Envolvidos	8

1.1. Motivação

Dados os critérios de segurança que um sistema de freio agrega, cada vez mais um controle de propriedades faz-se necessário. Além disso, o conforto tem sido alvo de constantes melhorias no que tange a indústria automotiva. Sendo assim, o sistema de freio não poderia ficar de fora. Níveis de ruído baixos são cada vez mais exigidos pelas montadoras e, também, pelos usuários dos veículos. Não existe mais espaço para tolerar níveis incômodos de ruído durante as frenagens.

A grande questão é que, com a franca decadência do uso do amianto, outros elementos, orgânicos e inorgânicos, foram sendo agregados à composição das pastilhas de freio na tentativa de compensar o bom desempenho que o amianto apresentava. Este desempenho não se limitava às características mecânicas, mas também ao baixo custo deste elemento.

Porém, à medida que novas composições, sem amianto, foram sendo introduzidas, surgiu o acréscimo dos níveis de ruído. Além disso, a complexidade da formulação passou a ser maior, já que precisa-se de mais de um elemento para substituir o amianto.

Aparte desta problemática, custo e desempenho têm características concorrentes, ou seja, na maioria dos casos não é possível reduzir custo e aumentar desempenho. Sendo assim, um equilíbrio entre custo e propriedades desejadas para o material de atrito é necessário.

A partir desta análise abriu-se uma janela que vislumbrava a otimização da composição do material de atrito como uma saída viável. Pesquisadores têm desenvolvido estudos nesta direção, usando vários métodos que serão comentados neste trabalho.

Uma das alternativas, que foi eleita a mais viável, muito embora não a mais fácil, foi o uso de algoritmos genéticos. Esta técnica dispensa diversos requisitos matemáticos como continuidade e diferenciabilidade da função a ser otimizada, além de ser um método

estocástico e não determinístico, possibilitando cobrir um vasto espaço de solução para um dado problema.

Acresça-se a isso a colaboração de uma empresa de porte, que desenvolve materiais de fricção, disposta a ceder seus laboratórios e absorver os custos desta pesquisa.

Juntando todos estes tópicos, gerou-se a motivação necessária para estudar o tema e buscar uma solução plausível para a questão da redução de custo sem prejuízo do desempenho dos novos materiais de atrito.

Assim, de uma forma concisa, a proposta deste trabalho visa criar uma ferramenta que possa reduzir os custos de desenvolvimento e a demanda experimental e aumentar a velocidade de desenvolvimento de novos produtos .

1.2. Breve Histórico Sobre Material de Atrito

Há cerca de cem anos atrás, em 1897, quando os veículos mais modernos eram carroças puxadas a cavalo, Herbert Froot desenvolveu o conceito de material de fricção, usando cabelo humano e/ou fibras de algodão [76]. Este fato trazia uma limitação séria. Estes componentes não suportavam temperaturas acima de 150°C. Logo Froot percebeu esta limitação e, em 1908, passou a introduzir fibras de asbestos (amianto) na composição. E assim criou a base dos materiais de atrito para as próximas seis décadas.

A introdução do asbesto na formulação foi muito conveniente porque elevou a temperatura das aplicações, melhorou a resistência mecânica dos materiais e ainda colaborou para o incremento do desempenho. Outra grande colaboração do asbesto foi a facilidade de agregar-se a resinas e metais de forma inerte.

Na década de trinta, químicos desenvolveram uma resina, usada como aglomerante, que proporcionava grande estabilidade a altas temperaturas. Deste ponto em diante, surgiram as

primeiras lonas para freios de veículos pesados, que apresentavam os mesmos padrões encontrados atualmente.

De 1950 em diante, resinas acrescidas de pó de aço e grafite, chamadas de *semi-met*, foram introduzidas na formulação. Esta formulação tornar-se-ia popular na década de setenta, para uso em freios a disco. Vê-se que, nem sempre, as novidades no mundo dos materiais de fricção foram realmente novidades, mas sim uma utilização racional ou recombinação de componentes e métodos já existentes.

Em 1960, devido ao aperfeiçoamento dos automóveis, maior desempenho foi exigido dos sistemas de freio. Neste momento da história, muitas empresas em torno do mundo iniciaram as investigações para substituir o amianto por outros componentes devido às características prejudiciais do mesmo. Juntamente com esta substituição veio à tona o ruído de freio.

O amianto, em algumas aplicações, chegava a alcançar a marca dos 60% na composição de um material de fricção. Daí a necessidade de se estudar tanta variedade de elementos para substituí-lo. Hoje os materiais sem amianto são uma obrigação, já que praticamente nenhum país desenvolvido aceita o seu uso. E, por outro lado, tampouco aceita níveis de ruído elevados. Criou-se, então, um compromisso da engenharia de desenvolvimento que engloba alto desempenho, boas características mecânicas, baixo ruído e *non asbestos*.

Materiais de atrito, sem o uso de amianto, já vêm sendo desenvolvidos e aplicados por empresas como Volkswagen e Ford desde o início dos anos oitenta.

As pesquisas neste campo dificilmente cessarão porque, a cada ano que passa, os veículos ganham potência e necessitam melhor desempenho e redução do nível de ruído que provocam durante as frenagens.

1.3. Proposta de Tese

Seguindo as tendências já discutidas, a proposta de tese refere-se a criar um aplicativo computacional que tenha a capacidade de otimizar a composição de um material de atrito. Este aplicativo usará o método dos algoritmos genéticos para efetuar a otimização.

Para tanto, a linguagem escolhida para criar o algoritmo foi o Delphi[®]. A escolha foi feita em função da boa compatibilidade desta ferramenta para criação de aplicativos amigáveis baseados em plataforma Windows[®].

Os passos que serão seguidos para implementar o aplicativo são os seguintes:

- 1) Revisão bibliográfica sobre materiais de atrito, sistemas de freios e algoritmos genéticos;
- 2) Avaliação estatística das influências dos componentes do material de atrito sobre ruído, amortecimento, rigidez estrutural, desgaste e coeficiente de atrito;
- 3) Levantamento das características essenciais para o projeto do aplicativo, tais como, variáveis de controle, parâmetros de *set-up*, entre outros;
- 4) Estudo dos resultados da avaliação estatística, no intuito de criar uma função objetivo, a qual será minimizada pelo aplicativo para teste da eficiência do algoritmo;
- 5) Avaliar as restrições necessárias para atingir o alvo da otimização, tais como valores mínimos e máximos de cada elemento, controle do custo máximo da composição e dos demais níveis aceitáveis para um material de atrito;
- 6) Uma vez ajustado o aplicativo e a função objetivo, criar composições baseadas na otimização e testá-las experimentalmente para comparar resultados.

Para a criação da função objetivo, os seguintes termos serão considerados:

- 1) Nível de ruído global do material de atrito, medido em teste de dinamômetro inercial para freios e usando a escala dB(A);
- 2) Custo total da mistura, respeitadas as variações de custo de cada componente do material;
- 3) Coeficiente de atrito médio, também medido em dinamômetro inercial para freios;
- 4) Taxa de desgaste média das pastilhas, igualmente medida em dinamômetro inercial para freios.

Como dados complementares dos estudos iniciais de influência de composição, serão avaliados o amortecimento e a rigidez estrutural das pastilhas de freio, segundo a variação de composição.

Serão consideradas as variações percentuais em massa de três elementos significativos. Estes elementos serão tratados neste trabalho como elementos *A*, *B* e *C*. Além destes, os demais elementos, comumente encontrados em formulação de materiais de atrito, serão usados.

Para completar o percentual em massa da formulação serão usadas cargas na forma de vermiculita e barita, que são elementos quimicamente inertes.

Apesar de reconhecer eventuais necessidades de efetuar um projeto fatorial com mais de dois níveis, apenas dois serão considerados devido ao alto custo experimental para proporcionar esta elevação, como será discutido mais à frente.

Sendo assim, erros são esperados devido a esta “imprecisão”. De qualquer forma, o trabalho inicia-se com dois níveis para que se possa atestar a capacidade do algoritmo e

verificar a potencialidade da função objetivo proposta, construída com base na teoria de projeto fatorial.

1.4. Infra-estrutura e Custos Envolvidos

Para a realização deste trabalho, além de computadores e softwares, foram necessários diversos equipamentos laboratoriais, tais como dinamômetros inerciais para freios, analisadores de sinais, máquina de compressibilidade, de medição de dureza, entre outras.

A empresa Fras-le S.A., sediada em Caxias do Sul/RS, na qualidade de produtora e detentora de tecnologia de desenvolvimento de materiais de fricção nas mais diversas áreas de aplicação, habilitou-se a sediar este estudo e absorver os custos do mesmo.

Como idéia geral, pode-se considerar o valor unitário de um ensaio. Entenda-se “um ensaio” como o conjunto de testes necessários à avaliação das variáveis de interesse para cada uma das amostras de material de atrito. Assim, pode-se descrever a síntese dos custos envolvidos para testar uma amostra da seguinte forma:

➤ Elaboração das Amostras (duas pastilhas)	U\$ 10.00
➤ Uso do Dinamômetro	U\$ 800.00
➤ Avaliação de Rigidez a Quente e a Frio	U\$ 140.00
➤ Avaliação de Amortecimento	U\$ 450,00
Total	U\$ 1,400.00

O custo total envolvido neste projeto gira em torno dos U\$ 40,400.00. A importância elevada no quesito testes experimentais é restritiva à execução de ensaios em grande escala.

1.5. Conteúdo da Teste

No Capítulo 1, apresenta-se um breve histórico sobre freios e a motivação para o presente trabalho.

Nos Capítulos 2 e 3, explana-se a teoria que envolve sistemas de freios e métodos utilizados por pesquisadores para abordar a otimização de materiais de atrito.

O Capítulo 4 discute a teoria sobre Algoritmos Genéticos, seus fundamentos e benefícios, bem como suas limitações. Apresenta, ainda, estudos de caso feitos em codificação binária e em codificação real.

No Capítulo 5 encontram-se estudos sobre o efeito da composição de materiais de atrito sobre os parâmetros de interesse para este trabalho, já utilizando o delineamento fatorial de experimentos como ferramenta.

O Capítulo 6 apresenta a função objetivo a ser utilizada pelo aplicativo final na otimização dos parâmetros.

Os Capítulos 7 e 8 discutem a criação do aplicativo final, baseado em Delphi® e as aplicações práticas efetuadas com base no aplicativo.

Por fim, os Capítulos 9 e 10 discutem os resultados práticos, apresentam as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo II

Sistemas de Freios e Geração de Ruído

Neste capítulo são abordadas as principais características do sistema de freio a disco, seus componentes e os parâmetros mais importantes a serem monitorados na avaliação do ruído. Serão discutidas, ainda, as influências de um material de atrito na geração do ruído de freio, sua composição básica e todos os equipamentos e recursos que foram utilizados ao longo deste trabalho.

2.1. O Sistema de Freio a Disco	10
2.2. Mecanismo de Geração de Ruído	13
2.3. Parâmetros Relevantes na Geração do Ruído	17
2.4. Modelos Analíticos	25
2.5. Composição de Materiais de Atrito	32
2.6. Efeitos Tribológicos Ligados ao Par de Atrito	37
2.7. Metodologia e Equipamentos Usados na Avaliação dos Parâmetros	40

2.1. O Sistema de Freio a Disco

O sistema de freio, e única fonte de geração de ruído em nosso estudo, é composto por três itens básicos, a saber : disco de freio, pastilha de freio e cavalete (comumente chamado de *caliper*).

Existe, ainda, uma proteção de chapa e um rolamento alojado no montante. Neste mesmo montante podem ser fixadas a suspensão e a bandeja que confere o movimento vertical à roda. Assim, é possível realizar testes em bancada com um sistema simplificado ou completo.

As três partes mais importantes do sistema – *caliper*, disco e pastilhas – têm suas particularidades. O *caliper* pode ser flutuante ou fixo. Este último foi largamente aplicado até início da década de 90. Em função da redução de peso, custo e espaço físico de montagem, o *caliper* passou a ser fabricado na versão flutuante. Nas figuras que seguem pode-se observar, em vermelho, ilustrações das duas versões de *caliper*.

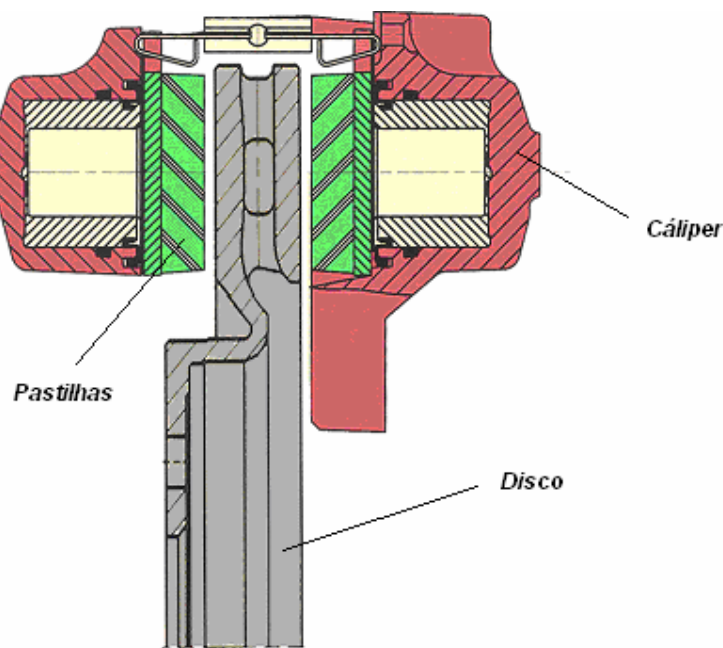


Figura 2.1 : Sistema de freio com *caliper* fixo.

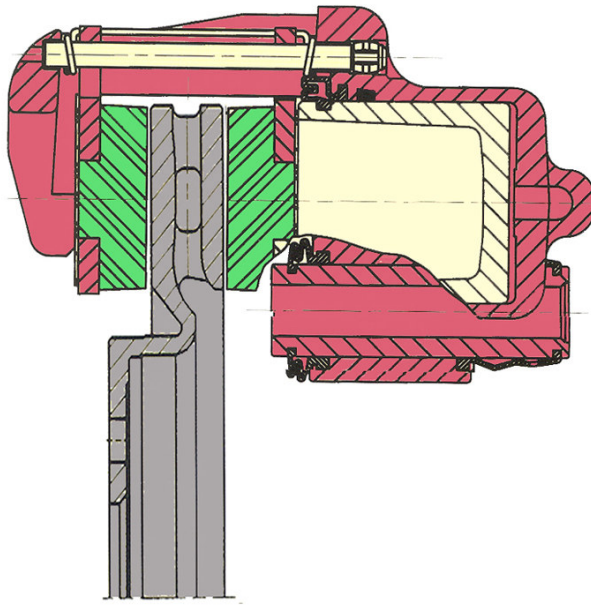


Figura 2.2 : Sistema de freio com *caliper* flutuante.

Nas fotos que seguem, pode-se ver um dos modelos de *caliper* flutuante, atualmente usado nos veículos de passageiros.

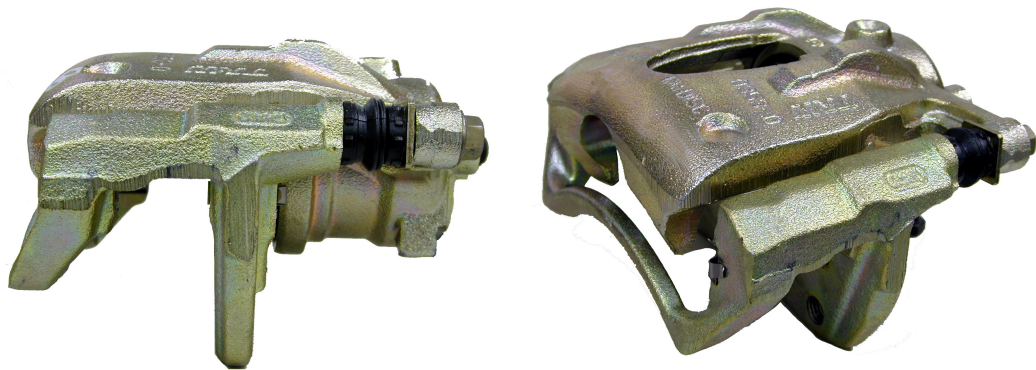


Figura 2.3 : *Caliper* flutuante típico.

Além da configuração fixo/flutuante, o *caliper* pode ser encontrado na versão de freio duplo, como pode ser visto na Figura 2.4. Esta configuração visa o alto desempenho e o aumento da capacidade de dissipação térmica.

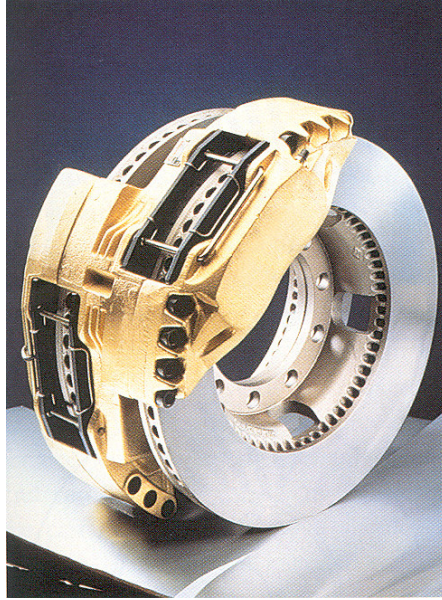


Figura 2.4 : Caliper duplo.

Por sua vez, o disco de freio é normalmente feito de ferro fundido e apresenta, basicamente, duas formas construtivas: sólido e ventilado. Para o disco ventilado, a otimização dos canais de ventilação confere a cada disco uma forma diferenciada. Estas variações de forma nos canais de ventilação permitem a otimização do fluxo de ar e, por conseguinte, a refrigeração do disco. Isto aumenta o rendimento de frenagem e evita a perda de atrito por aquecimento. Na Figura 2.5, têm-se ilustrações das diferentes formas dos canais de ventilação dos discos de freio.

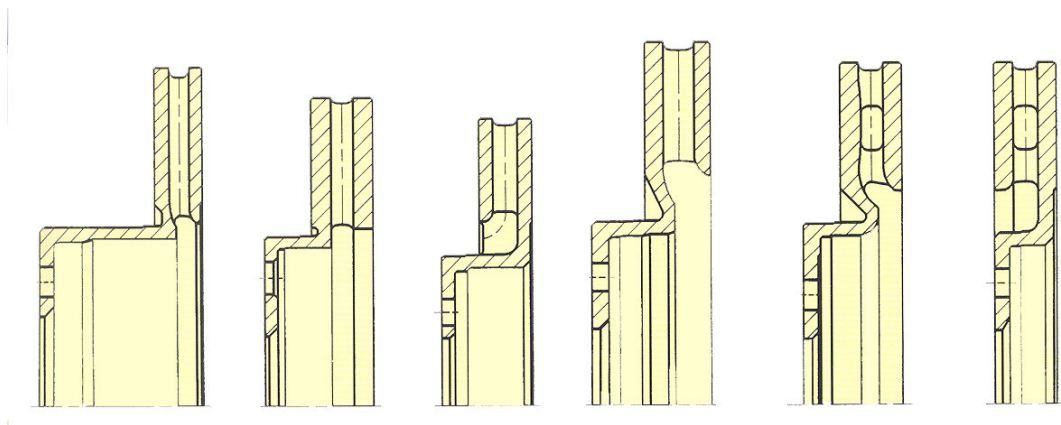


Figura 2.5 : Diferentes tipos de canais de ventilação utilizadas em discos ventilados.

Apesar da configuração de disco ventilado melhorar consideravelmente a refrigeração do sistema, há casos de aplicações que requerem uma resistência elevada à temperatura, como na Fórmula Um, por exemplo. Nestes casos é necessário desenvolver discos de freio de materiais como carbono ao invés do tradicional ferro fundido. Na figura que segue pode-se avaliar uma aplicação com disco de carbono.



Figura 2.6 : Sistema de freio com disco de carbono.

2.2. Mecanismo de Geração de Ruído

O mecanismo de frenagem é atribuído ao par disco de freio/pastilha. Este par é o responsável pela geração de vibrações auto-excitadas no sistema, que podem ser geradas pelos seguintes fatores: decaimento do coeficiente de atrito com incremento de velocidade e

variações de contato entre pastilha/disco de freio [39], [53]. Outros trabalhos abordam os mesmos tipos de problemas de dinâmica do conjunto [26], [27].

De forma geral, as instabilidades são provenientes da variação no contato entre pastilhas de freio e disco. Esta flutuação no contato, associada às mudanças de velocidade e coeficiente de atrito, induz vibração ao sistema. Esta vibração pode ser extingüível com o tempo ou auto-excitada e, dadas as frequências naturais do conjunto, podem provocar geração de ruído. As diferentes situações de contato geram diferentes áreas de instabilidade na região de contato entre disco e pastilhas [81], [95], [97]. Distribuindo num gráfico a parte imaginária e real das frequências de vibração do conjunto, visualiza-se uma região de instabilidade.

As principais conclusões, obtidas pelos pesquisadores, no que tange à ocorrência das instabilidades, podem ser agrupadas como:

- Se o aspecto construtivo do sistema de freio confere uma região de instabilidade, mudanças nos parâmetros como temperatura, pressão de frenagem e coeficiente de fricção não modificam as condições de ruído;
- Mudanças na inclinação de contato entre disco/pastilha modificam a abrangência das regiões de instabilidade. Da mesma maneira, uma alteração crescente no coeficiente de atrito causa um aumento da região de instabilidade;
- Aumentos de amortecimento no disco de freio não modificam o tamanho da região de instabilidade, mas atenuam significativamente a magnitude das instabilidades;
- O aumento de massa das pastilhas e do disco de freio reduz a área de instabilidade;
- Pequenos aumentos no momento de inércia das pastilhas influenciam positivamente na redução da área de instabilidade, mas, em alguns casos, podem aumentar estas áreas.
- Alterações no nível de amortecimento das pastilhas, normal à superfície do disco, não mostram alterações na região de instabilidade;

- Aumento no nível de amortecimento torsional das pastilhas tem influência positiva na redução da área de instabilidade;
- Aumento da rigidez das pastilhas, em sua deformação torsional e normal à superfície do disco, mostram uma redução considerável na área de instabilidade;

Todos os trabalhos encontrados na literatura sobre este assunto citam estas instabilidades dinâmicas como sendo as responsáveis pelo aparecimento do ruído em sistemas de freio [16], [52], [53], [73], [77], [78], [79], [80], [82].

2.2.1. Classificação do Ruído de Freio

Em geral, o ruído de freio é classificado segundo sua frequência e recebe nomes peculiares, na maioria das vezes relacionados à sua semelhança com ruídos cotidianos.

Uma divisão destes ruídos foi proposta por Lee [60], e pode ser vista na Figura 2.7, abaixo.

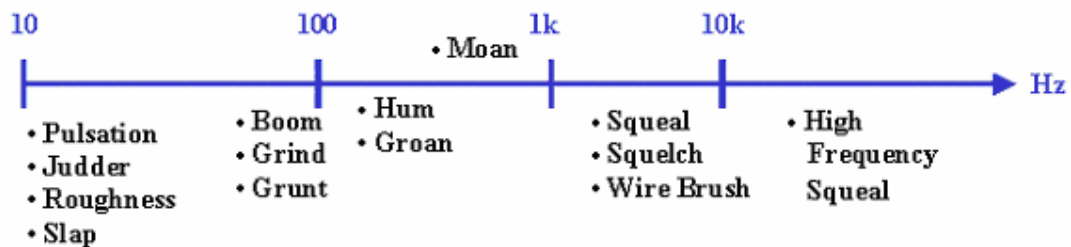


Figura 2.7 : Classificação do ruído de freio feita por Lee.

A nomenclatura utilizada para definir os diferentes tipos de ruído são baseadas na percepção sonora dos mesmos e, na grande maioria têm difícil tradução para o português.

Exemplos que podem ser traduzidos são *high frequency squeal* – *squeal* de alta frequência e *wire brush* – escovamento.

De toda a faixa de frequência onde pode ocorrer ruído em sistemas de freio, aquela que mais causa incômodo é, sem dúvida, a que engloba frequências acima de 1 kHz. Como visto, nesta faixa inclui-se o tipo de ruído denominado *squeal*.

Ao longo dos anos, pesquisadores têm utilizado diversas técnicas para prever, e mesmo explicar, a causa do *squeal* [6, 26, 27, 28, 36, 40, 42, 46, 49, 54, 77]. A base do surgimento deste tipo de ruído continua sendo a instabilidade dinâmica do conjunto.

Existe uma forte tendência de se encontrar o *squeal* gerando altos níveis de pressão sonora. Por esta razão, a consideração de atuar sobre o nível global de ruído, mesmo que sendo calculado em toda a faixa audível, tende a ser uma saída bastante interessante.

Outro aspecto é que testes de ruído em sistemas de freio têm um número bastante elevado de freadas. Se este número for multiplicado pela quantidade de espectros adquiridos durante cada frenada, um número imenso de espectros será gerado. Sendo assim, têm-se dificuldades em isolar frequências específicas e, ainda, localizar o maior nível de pressão sonora de cada frenagem. Na Figura 2.8, pode-se observar um espectro característico proveniente de um teste de ruído feito em dinamômetro inercial para freios.

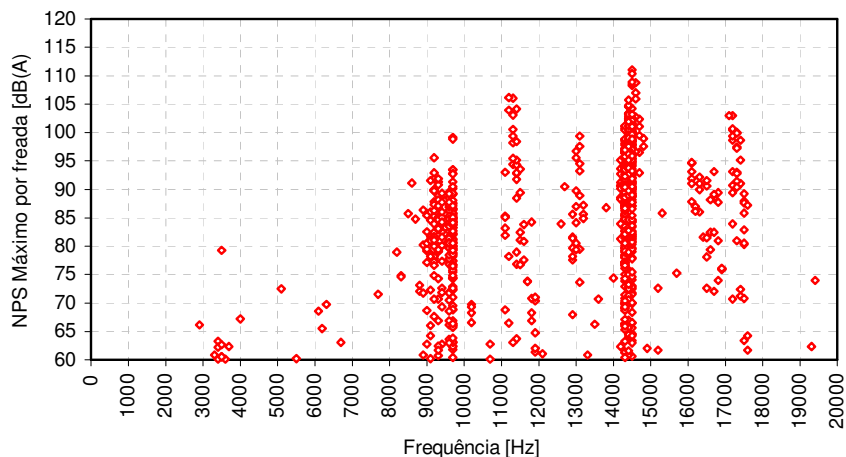


Figura 2.8: Resultado típico de teste de ruído em dinamômetro inercial para freios.

Cada ponto do gráfico da Figura 2.8 representa o valor máximo de nível de pressão sonora de cada freada. O teste em questão executa cerca de 1400 freadas e tem duração de aproximadamente 36 horas.

É possível verificar, pela análise da Figura 2.8, grande quantidade de frenagens que tiveram seu valor de nível de pressão sonora máximo em 9,5 kHz e em 14,5 kHz. Todos os valores encontrados neste teste referem-se ao ruído tipo *squeal e squeal* de alta frequência.

Propostas de correções para o problema do *squeal* vão desde acréscimo de amortecimento [46, 72, 83, 93], passando por alterações geométricas de pastilhas [63], chegando a alterações no próprio sistema de freio [52].

Evidentemente que a composição do material de atrito também está entre os itens que são alvos de alteração. No entanto, controlar o *squeal* através da composição do material não constitui tarefa fácil, como será discutido mais adiante.

O presente trabalho, está focado em reduzir o *squeal*, muito embora a abordagem de nível de pressão sonora global acabe por reduzir, também, os demais tipos de ruído. Além disso, a otimização também deverá controlar parâmetros como custo da mistura, coeficiente de atrito médio e desgaste médio do material.

2.3. Parâmetros Relevantes na Geração de Ruído

2.3.1. Parâmetros Ambientais e de Aplicação

Todos os trabalhos que buscaram avaliar o ruído de freio, e que são citados nesta revisão, abordam alguns, ou vários, dos parâmetros de influência na geração de ruído durante a frenagem. Uma análise detalhada permite concluir que as variáveis de frenagem são bastante complexas de serem quantificadas numa situação real de uso. Isto ocorre porque

algumas das variáveis dependem dos hábitos do condutor, e, outras, das condições mecânicas e climáticas às quais está exposto o sistema de freio [1], [26], [39], [42].

Essencialmente, pode-se dizer que as variáveis de maior influência no ruído gerado durante a frenagem são:

- Pressão da linha hidráulica, ou pressão de frenagem;
- Velocidade do disco de freio;
- Temperatura do disco de freio;
- Coeficiente de atrito;
- Temperatura ambiente;
- Umidade relativa do ar.

Em função dos estudos realizados mostrarem uma tendência de se analisar parâmetros do próprio sistema, deixando de lado as variações ambientais, apenas os três primeiros parâmetros serão monitorados.

2.3.2. Amortecimento e Rigidez

A rigidez conjunta e de cada componente do freio está diretamente relacionada com a frequência que será irradiada pelo sistema. Ela é parâmetro indispensável ao modelamento de qualquer sistema que pretenda estudar o *squeal*. Mas, não menos importante é o amortecimento.

Pesquisadores têm direcionado seus estudos para aumentar o amortecimento dos sistemas de freio através da adição de materiais em camadas na parte traseira da plaqueta das pastilhas de freio. Estes materiais multicamadas são chamados comercialmente de *shims*.

As figuras abaixo mostram uma pastilha com um *shim* aplicado, alguns tipos de *shims* e suas camadas.

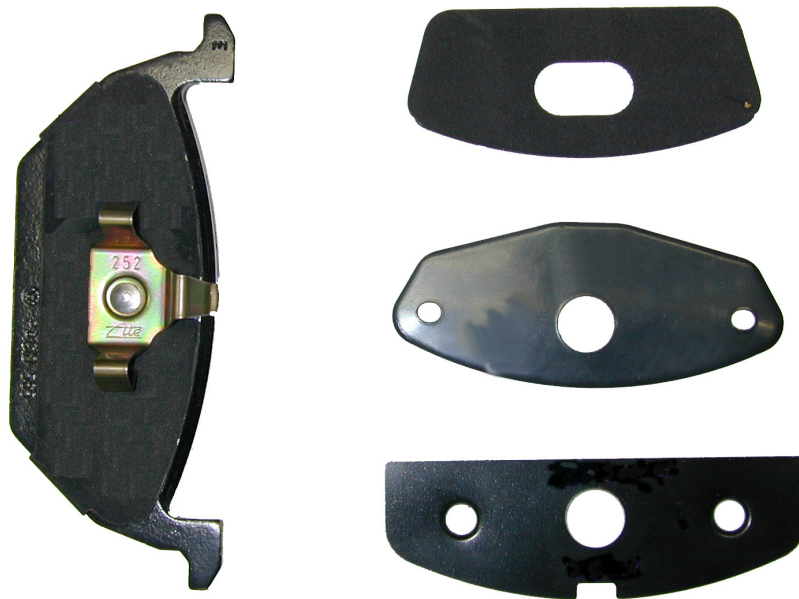


Figura 2.9 : Tipos comerciais de *shims*.

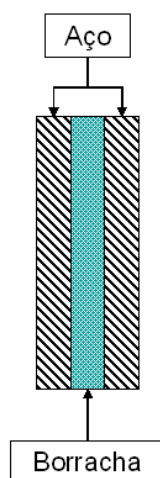


Figura 2.10 : Camadas usuais de um *shim*.

Em geral, a espessura completa de um *shim* varia entre 0,08 – 0,14 mm. Pesquisadores ressaltam que os *shims* atenuam frequências específicas e são efetivos em alguns casos e sistemas de freio específicos [72], [93].

Uma restrição dos *shims* é a temperatura. Quando se trabalha com temperaturas e frequências específicas os *shims* de três camadas podem ser eficientes. No entanto, para problemas de alta temperatura e frequências variadas, os pesquisadores têm usado *shims* com até cinco camadas. Nestes últimos, têm-se duas camadas de material de amortecimento [83].

Considerando outros componentes do sistema de freio, estudos mostraram que aumentos de amortecimento estrutural em discos de freio podem reduzir significativamente a magnitude das instabilidades [28].

2.3.3. Os efeitos da Temperatura

Por se tratar de um par de atrito, o sistema de freio inevitavelmente gera calor. O calor gerado no momento da frenagem determina modificações no comportamento das pastilhas de freio e do próprio disco.

Desta forma, qualquer tipo de análise que pretenda quantificar estas modificações deve ser feita sempre observando o par de atrito. Mesmo assim, a indústria produtora de materiais de atrito precisou desenvolver testes padronizados para avaliar uma série de fenômenos, incluindo aqueles provenientes da variação de temperatura. Estes testes padrão são mundialmente aceitos.

Muito embora não tenha sido escopo deste trabalho acompanhar de perto tais fenômenos de variação com a temperatura, é prudente apresentar suas raízes, apenas como informação ao leitor.

- **Mudanças no Atrito**

Talvez uma das mais importantes alterações provocadas pelo aquecimento e resfriamento do par de atrito seja a variação do coeficiente de atrito. Esta variação é capaz de provocar a perda momentânea da capacidade de frenagem. Este fenômeno é conhecido como *fade*.

Um outro fenômeno, não menos importante que o *fade*, é a chamada recuperação. Este fato ocorre quando, após um aquecimento do par de atrito e conseqüente redução do coeficiente de atrito, o sistema resfria e recupera parcialmente seu coeficiente de atrito original.

O grau de eficiência de recuperação é medido comparando-se o coeficiente de atrito antes e depois do *fade*. Como critério de qualidade, busca-se que os coeficientes de atrito antes e depois do *fade* sejam idênticos. Este comportamento é verificado através do teste conhecido como SAE J661 [115].

As curvas provenientes do teste SAE J661 são divididas em duas etapas. Em cada uma destas curvas existe um aumento de temperatura, seguido de uma redução da mesma. Assim é possível verificar a ocorrência do *fade* e da recuperação em cada uma das etapas. Curvas típicas provenientes deste teste de coeficiente de atrito podem ser vistas nas Figuras 2.11 e 2.12.

- **Mudanças no Desgaste**

As variações de desgaste estão relacionadas com a queima de orgânicos e conseqüente renovação de superfície. O teste conhecido como DPF 24 [116] mede a taxa de desgaste com a temperatura. Este teste é dividido em duas etapas. A primeira considera desgaste a frio, com

temperatura constante de 150 °C , num intervalo de cem aplicações de frenagem. A segunda admite um tempo de arrasto de 30 minutos, permitindo variação de temperatura e acompanhando-se a variação do coeficiente de atrito – chamado desgaste a quente. A espessura e massa médias do corpo de prova são medidas no início e no final do teste. Assim é possível determinar o desgaste.

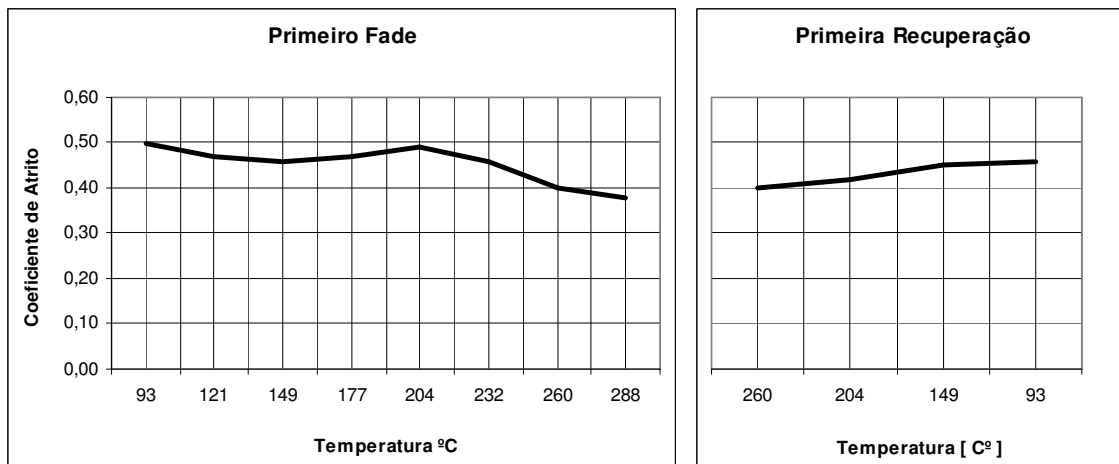


Figura 2.11 : Curva de *fade* e recuperação, 1ª etapa.

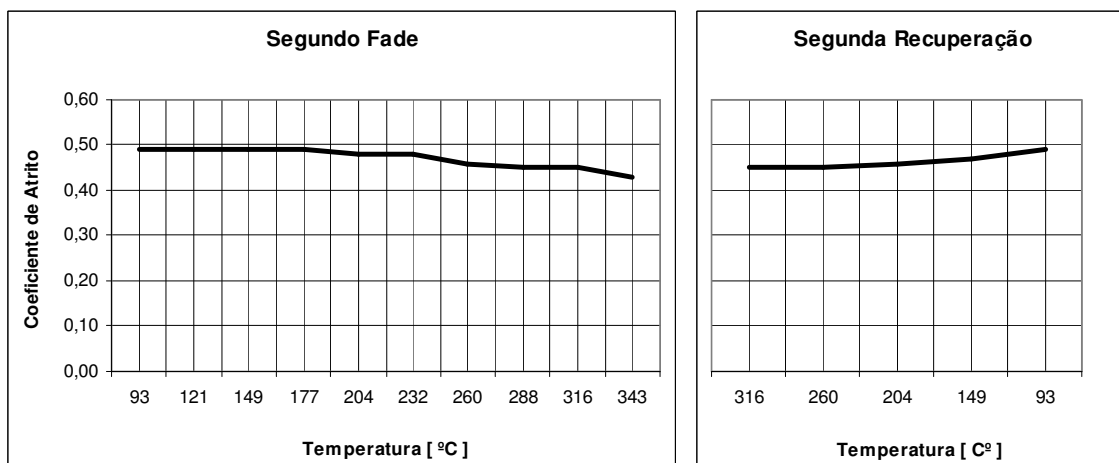


Figura 2.12 : Curva de *fade* e recuperação, 2ª etapa.

Este valor de desgaste é obtido da diferença média de espessuras entre o teste a frio e o teste a quente. Contrário aos demais parâmetros o desgaste não é monitorado em tempo real e, portanto, não é apresentado nos gráficos.

Uma curva típica, proveniente do teste DPF 24 para desgaste pode ser vista na Figura 2.13.

- **Mudanças no Nível de Ruído**

Este campo ainda é pouco explorado. Um teste, conhecido como AK-Master, foi desenvolvido por um grupo de pesquisadores na Europa e é mundialmente aceito como teste padrão na avaliação de ruído. Este procedimento coleta as informações de variação de temperatura durante as frenagens, além de uma série de outros dados.

Num procedimento desenvolvido pela empresa Fras-le, é possível separar as ocorrências de ruído por intervalos de temperatura usando as temperaturas de referência do teste AK-Master. No entanto, ainda não é possível estabelecer um padrão de comportamento, já que este procedimento foi implantado há cerca de quatro anos e as tendências não foram totalmente avaliadas do ponto de vista de diagnosticar o comportamento geral do ruído com a variação de temperatura para uma gama variada de sistemas de freio veicular.

Como idéia geral é possível apresentar o gráfico da Figura 2.14 como uma compilação de dados do referido procedimento nos últimos quatro anos (2001-2004), referentes aos diversos sistemas de freios e às mais variadas composições químicas de material de atrito para veículos comerciais.

Faz-se necessário salientar que nenhum filtro foi aplicado na intenção de separar tipos de disco de freio – sólido ou ventilado -, estado do disco – novo ou usado -, tipo de *caliper* ou outra separação, de qualquer natureza.

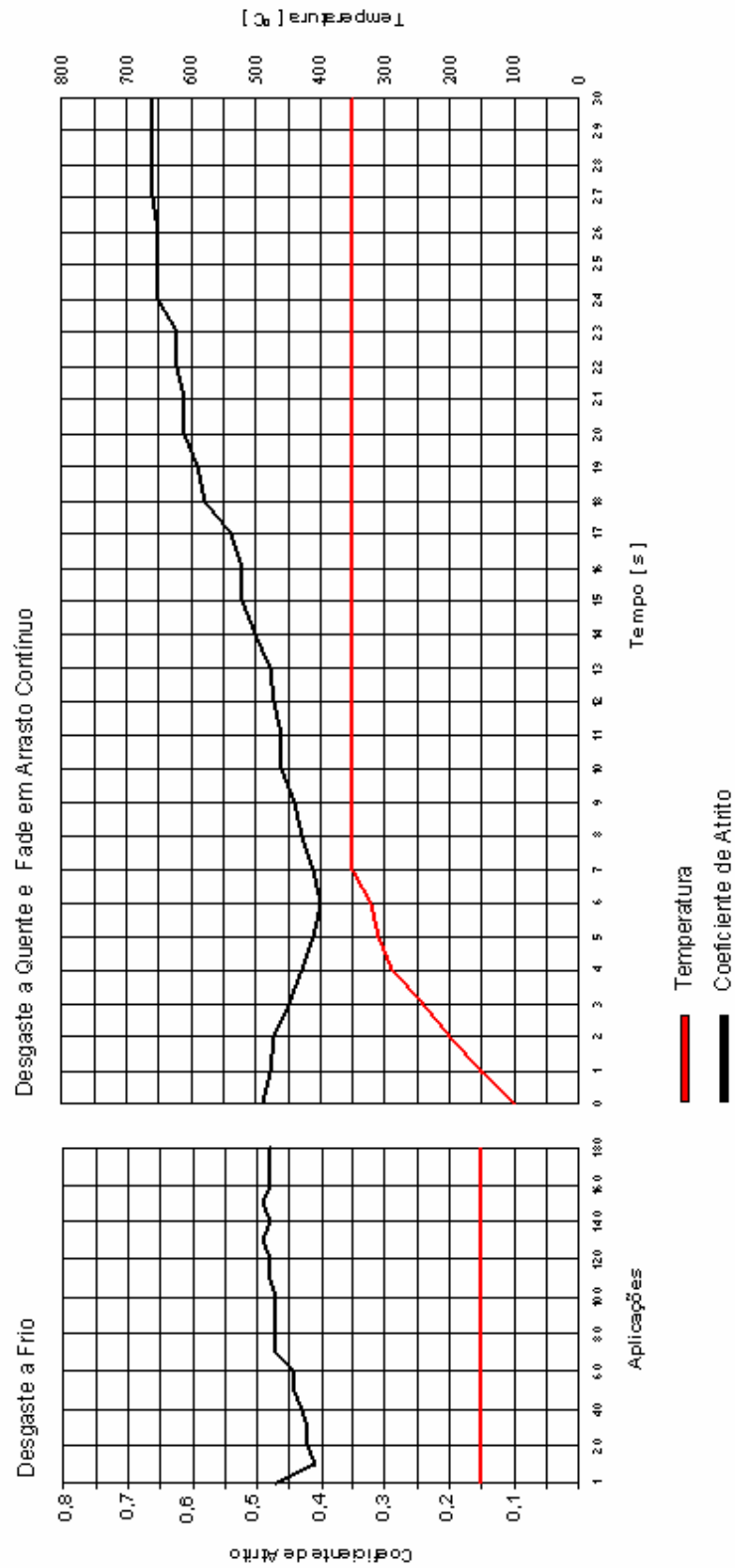


Figura 2.13 : Gráfico proveniente de teste de desgaste DPF 24.

Sendo assim, este gráfico é uma compilação bastante genérica e abrangente de todos os testes, independente dos tipos de peças que formam o sistema de freio ou da composição do material de atrito.

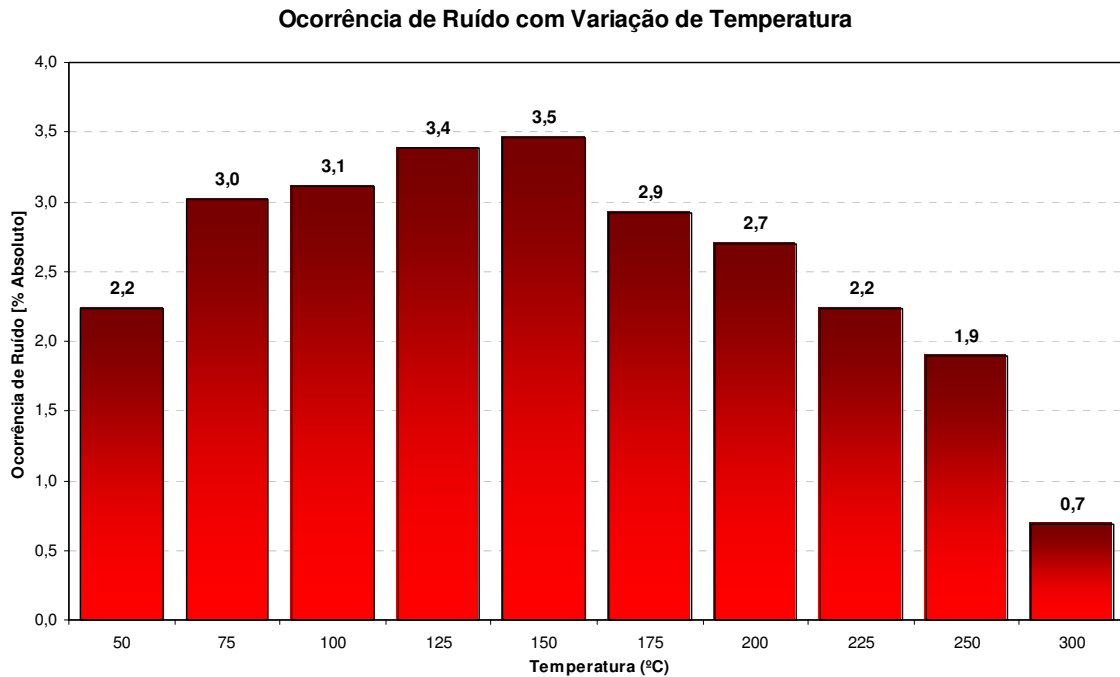


Figura 2.14 : Ocorrência de ruído em função da temperatura para dados entre 2001-2204.

É fácil verificar que existe uma tendência não muito expressiva de haver aumento de ocorrências de ruído durante os testes nas temperaturas de 125° C e 150 °C. Por se tratar de uma compilação geral e independente da composição do material de atrito, não é prudente afirmar que esta tendência é homogênea para todos os materiais. Cada grupo de materiais pode ser avaliado em separado e poder-se-á determinar tendências para estes grupos de materiais e até mesmo grupos de sistemas de freios. Isto fornecerá uma idéia mais precisa da variação de ocorrência de ruído devido às variações de temperatura durante os testes.

2.4. Modelos Analíticos

Diversos modelos analíticos foram elaborados ao longo dos anos na tentativa de melhor representar o fenômeno de *stick-slip* em sistemas de freio.

Nishiwaki [77] propõe, em seus estudos, modelos analíticos para o *squeal* em freios a disco e a tambor. Em seus modelos, utiliza dados de rigidez do material de atrito em um sistema extremamente simples, modelando apenas pastilhas e disco de freio. Ele salienta que a geração do ruído tem origem nas instabilidades mecânicas do sistema e que, em alguns casos, existem diferenças entre a geração de ruído em rotação normal e reversa.

Earles e Badi [27] apresentam um modelo de sistema com cinco graus de liberdade, com contato pontual e não amortecido. Seu objetivo central foi localizar, com a maior precisão possível, as regiões de instabilidade com diferentes ângulos de inclinação dos pinos de contato e para diferentes níveis de coeficiente de atrito. A principal conclusão indica que a variação na região de instabilidade é devida à instabilidade dinâmica. Esta instabilidade aumenta com o aumento do coeficiente de atrito.

Mais recentemente, Flint e Hultén [41] desenvolveram um modelo não amortecido para um sistema de freio de pistão duplo. Os pesquisadores consideraram as massas dos pistões de forma independente, além das demais massas e parâmetros de rigidez e inércia. A grande inovação deste modelo foi considerar os pistões que, até então, não haviam sido considerados. Ainda assim, este modelo recente não abordou o amortecimento que, como já vimos, tem importância relevante. As conclusões indicam que as deformações das pastilhas durante as frenagens provocam acoplamento dinâmico e acarretam instabilidades. Indicam, ainda, que as frequências do disco de freio estão estreitamente relacionadas com as frequências do *squeal*.

Muitos outros pesquisadores desenvolveram modelos analíticos baseados apenas na rigidez dos componentes ou acoplamentos [9, 44, 52, 73, 101]. Embora com enfoques

diversos, todos eles acabaram convergindo para as instabilidades dinâmicas como explicação para o *squeal*.

Dentre todos os modelos analíticos revisados, aquele que fornece mais informações relevantes ao escopo deste trabalho, devido a análise de influência de amortecimento e rigidez estrutural, é o desenvolvido por North [79], [80]. Além de ser pioneiro, este modelo inclui em sua abordagem o efeito do amortecimento e considera a vibração auto-excitada como origem das instabilidades e do *squeal*.

Em seu estudo, North agregou massas a um disco de freio para simular o *caliper* e as pastilhas e avaliou o comportamento nodal e as frequências naturais do mesmo. Ele percebeu que se o modo radial fosse ignorado, se poderia assumir que o disco vibraria com modos circunferenciais na forma de um seno e um coseno, desde que o disco fosse excitado num único ponto fixo no espaço. Desta forma, a natureza complexa do disco de freio pôde ser modelada por um segmento de disco que deve receber propriedades corretas de massa, momento de inércia, além de valores de rigidez linear e de rotação. Com este procedimento North garantiu que as propriedades dinâmicas do disco ficariam praticamente inalteradas.

Tendo em vista o mesmo tipo de consideração para as pastilhas e para o *caliper*, ou seja, sistemas com dois graus de liberdade, o modelo pôde ser considerado de parâmetros concentrados. O resultado final destas avaliações foi a concepção de um modelo de oito graus de liberdade e de parâmetros concentrados, translação e rotação para cada componente, conforme visto na Figura 2.15.

As variáveis envolvidas no modelo da Figura 2.15, estão descritas a seguir.

M_c = Massa do *caliper*

M_d = Massa do disco

M_{p1} , M_{p2} = Massas das pastilhas

I_c = Momento de inércia do *caliper*

- I_d = Momento de inércia do disco
 I_{p1}, I_{p2} = Momento de inércia das pastilhas
 K_{dl} = Rigidez do disco com a terra
 K_{cl} = Rigidez de rotação do disco com a terra
 C_{dl} = Amortecimento do disco com a terra
 C_{dr} = Amortecimento de rotação do disco com a terra
 K_{p1}, K_{p2} = Rigidez das pastilhas 1 e 2
 C_{p1}, C_{p2} = Amortecimento das pastilhas 1 e 2
 K_{f1}, K_{f2} = Rigidez das pastilhas 1 e 2 em relação ao *caliper*
 C_{f1}, C_{f2} = Amortecimento das pastilhas 1 e 2 em relação ao *caliper*
 K_{cr} = Rigidez de rotação da pinça com a terra
 C_{cl} = Amortecimento da pinça com a terra
 C_{cr} = Amortecimento de rotação da pinça com a terra
 K_{dr} = Rigidez de rotação do disco com a terra
 $D1, D2$ = $9,0 \times 10^{-3}$ m
 μ = Coeficiente de atrito entre disco e pastilhas
 H = Meia espessura do disco de freio
 $L1, L2$ = Meia espessura das pastilhas 1 e 2
 G = Braço de reação a fricção da pastilha 2

Considera-se que as pastilhas de freio têm um carregamento estático dado por :

$$N_1 = N_0 - C_{p1}(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) - K_{p1}(y_1 - y_0) \quad (2.1)$$

$$N_2 = N_0 + C_{p2}(\dot{y}_2 - \dot{y}_0) + K_{p2}(y_2 - y_0) \quad (2.2)$$

onde N_0 representa o carregamento estático entre disco e pastilha. Estes pré-carregamentos ocasionam forças de reação, que ocorrem por intermédio dos valores de rigidez do *caliper*, K_{f1} e K_{f2} . As pastilhas sofrem reação devido ao atrito. Como o modelo simula um *caliper* flutuante, a pastilha 1 sofre reação baseada na mola K_{pe} , na direção y , e uma mola de rigidez

infinita na direção de x . Já a pastilha 2 tem sua reação baseada no *caliper*, com uma mola de rigidez infinita na direção x e a mola K_{pc} na direção y .

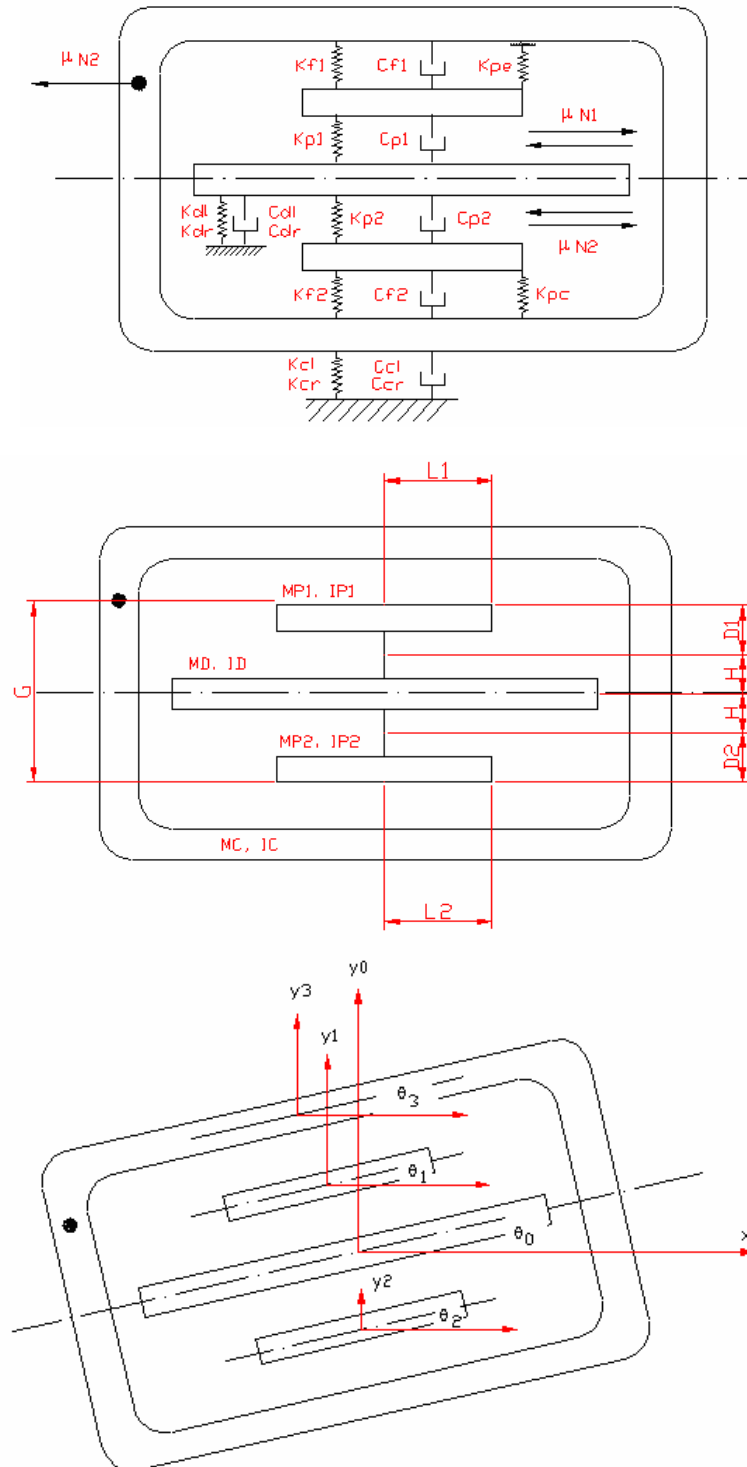


Figura 2.15 : Modelo proposto por North.

Os valores de rigidez rotacional das pastilhas estão baseados numa distribuição uniforme de rigidez ao longo do comprimento total da pastilha. Este comprimento total é assumido em contato com o disco. North apresenta o cálculo desta rigidez e amortecimento rotacionais como :

$$K_{rot} = Kp1\left(\frac{L_1^2}{3}\right) \quad C_{rot} = Cp1\left(\frac{L_1^2}{3}\right) \quad (2.3)$$

Utilizando-se os esquemas da Figura 2.15, e as equações (2.1) a (2.3), é possível escrever as equações diferenciais do sistema. A equação geral do sistema, após normalizada pela massa, tornar-se-á :

$$\ddot{X} + C\dot{X} + KX = 0 \quad (2.4)$$

onde C é a matriz de amortecimento, K é a matriz de rigidez e X é o vetor deslocamento referente aos oito graus de liberdade do sistema. Agora, pode-se reescrever a equação (2.4) como

$$\begin{bmatrix} U & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \dot{X} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -C & -K \\ U & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ X \end{bmatrix} = 0 \quad (2.5)$$

onde U é a matriz unitária.

Os autovalores da matriz $\begin{bmatrix} -C & -K \\ U & 0 \end{bmatrix}$ fornecem as frequências naturais e os amortecimentos dos oito modos de vibração do sistema. Levando-se em consideração o uso dos amortecimentos na solução do problema, pode-se obter $2n$ autovalores resultantes. Os autovalores que possuem parte imaginária negativa devem ser desconsiderados, uma vez que representam frequências negativas sem sentido físico. Os demais autovalores devem ser avaliados segundo seu sinal da parte real. Se o sinal for positivo, indica instabilidade do

sistema com aumento crescente das amplitudes de vibração. Se o sinal for negativo, tem-se modos estáveis com amplitudes que decrescem com o tempo.

A verificação dos resultados do modelo se faz através de um gráfico onde se distribuem os autovalores sobre um plano complexo e avalia-se a movimentação do sinal da parte real à medida em que se alteram os parâmetros do modelo. Este modelo foi utilizado por Gonçalves [44] para estudo de um sistema de freio a disco com *caliper* flutuante, onde tal sistema foi amplamente estudado e correlacionado com o modelo.

2.4.1. Resultados do Modelo North

Para avaliação das tendências do modelo, os seguintes valores foram variados:

- a) Rigidez entre pastilhas e *caliper*;
- b) Coeficiente de atrito entre pastilhas e disco;
- c) Amortecimento do disco, das pastilhas e do *caliper*.

Uma vez variados estes parâmetros, avaliou-se o comportamento do sinal da parte real dos auto-valores complexos. Os resultados obtidos pelo autor apontam as seguintes tendências:

1. O aumento do coeficiente de fricção desloca o sistema para uma região de instabilidade, agindo diretamente sobre os modos de vibração do disco de freio;

2. A rigidez entre pastilhas e *caliper* é de grande importância. Uma redução destes parâmetros tende a levar o sistema para uma região de estabilidade, atuando sobre os modos de rotação e translação do disco de freio;
3. Os valores de amortecimento do disco e das pastilhas, de forma geral, atuam sobre um modo específico, mas podem deslocar este modo instável para a região de estabilidade se forem incrementados.

2.5. Composição de Materiais de Atrito

Os materiais de atrito são caracterizados como materiais compostos. Esta classificação se deve ao fato de um material de atrito ser composto de uma série de elementos, entre orgânicos e inorgânicos [10], [17], [76]. No quadro da Figura 2.16, tem-se uma visão geral dos elementos que podem compor um material de atrito.

Dentro destes sub-grupos, são muitos os elementos que podem ser usados para atingir o objetivo desejado. A composição varia amplamente de caso a caso. A seguir será apresentada uma breve explanação sobre os elementos de cada grupo e as alterações mais específicas provocadas no material já finalizado [76], [66].



Figura 2.16 : Elementos de um material de atrito.

- **Aglomerantes**

Dentro desta classe de componentes pode-se encontrar resinas chamadas de “único estágio” e “dois estágios”. Esta diferença preliminar indica a necessidade da presença de um agente de cura para finalizar o processo (“dois estágios”). Em geral, os tipos de resina mais usados na composição apresentam uma mistura de fenóis e formaldeídos. Podem ser encontrados na forma de pó ou líquidos, estes últimos solúveis em água ou não. Os tipos de aglomerantes mais usados são:

- a) *Resinas Resol*: conferem fragilidade e apresentam uma resistência térmica elevada;
- b) *Resinas de Óleo Modificadas*: levam a modificações no coeficiente de atrito durante as variações de temperatura (este processo de variação é conhecido como *fade*) do produto acabado e fornecem altos níveis de fricção;
- c) *Resinas de Óleo de Caju*: conferem certa resiliência ao produto acabado, ajudam na redução do nível de ruído e podem levar ao aumento de eficiência de frenagem;
- d) *Resina Fenólica de Elastômero Modificado*: confere flexibilidade ao material e leva a altos coeficientes de fricção;
- e) *Resina Cresílica*: reage similarmente às resinas fenólicas;
- f) *Fenóis de Óxido Metálico Modificado*: melhoram características de *swell* e *growth*. *Swell* refere-se à medida da dilatação do material durante o teste e *growth* é um indicativo do estado final do material depois do teste. Estas medidas são necessárias devido ao fato de que um material de atrito, quando submetido à temperatura, pode ficar ligeiramente menor ou maior do que o seu estado original;
- g) *Resina de Ácido Bórico Modificado*: oferece as mesmas características que o aglomerante do item (f);

- h) *Borracha Natural*: não muito usado hoje em dia, este produto tende a piorar as condições de *fade* e apresenta mau cheiro quando queimado;
- i) *Borracha Estireno Butadieno (SBR)*: em geral, confere alta rigidez e resistência ao *fade*;
- j) *Borracha Acrilonitrilica (NBR)*: em altas percentagens produz um material rígido e com bom comportamento em relação ao *fade*;

- **Modificadores de Atrito - Atritantes**

Como o próprio nome sugere, os modificadores de atrito agem sobre a composição alterando diretamente o coeficiente de atrito do produto final. Evidentemente que existe um compromisso com o nível de desgaste, já que os componentes, em geral, são abrasivos. Por sua propriedade, servem como meio de renovação da superfície de discos e tambores de freio. Nesta categoria de componentes pode-se elencar:

- a) *Óxido de Alumínio*: apresenta tendência ao *fade*, boa resistência ao desgaste e causa polimento da superfície oposta;
- b) *Alumina*: em excesso causa desgaste excessivo da superfície oposta;
- c) *Óxido de Cromo*: não é muito popular devido ao alto custo;
- d) *Óxido de Zinco*: oferece boa resistência ao desgaste, mas pode causar polimento da superfície oposta;
- e) *Hidróxido de Cálcio*: incrementa a dureza do produto final, reduz o *fade* em altas temperaturas e é muito útil como aditivo para redução dos efeitos de *swell* e *growth*;
- f) *Óxidos de Ferro*: podem ser usados para modificação de coloração, aumento do efeito de polimento e, em formulações semimetálicas, como agente do aumento do atrito a frio;
- g) *Óxido de Magnésio*: usado para aumentar a estabilidade térmica de resinas.

- **Modificadores de Atrito - Lubrificantes**

Neste outro caso, o modificador de atrito age como lubrificante, na tentativa de equilibrar as condições de desgaste. São eles:

- a) *Grafite*: nas mais diversas formas, tais como amorfo, em flocos e sintético, reduz o nível de fricção e incrementa o efeito de *fade*;
- b) *Disulfeto de Molibdênio*: usado para lubrificação a baixas temperaturas (100°C). Gera uma boa superfície de transferência de atrito quando em combinação com o ferro;
- c) *Trissulfeto de Antimônio*: considerado um lubrificante a altas temperaturas (450°C). Tem seu uso desencorajado nos Estados Unidos devido à sua natureza tóxica;

- **Reforçadores Mecânicos**

Estes elementos, como o nome esclarece, têm a finalidade de aumentar o nível de alguma, ou várias, das propriedades mecânicas do produto acabado. Por longos anos, o amianto foi utilizado como o reforçador preferencial. Atualmente, o amianto vem sendo banido gradualmente. Em países como estados Unidos e todos os da Europa, o amianto já não pode mais ser aplicado em materiais de atrito. Assim sendo, uma gama muito grande de alternativas foram, e continuam sendo, desenvolvidas para substituir as fibras de amianto. Concomitantemente a este fato, custos de produção têm sido elevados quando se executa a substituição do amianto por outro tipo de fibra. As fibras mais utilizadas são:

- a) *Wollastonite* ($CaSiO_3$): tem propriedades de reforço mínimas;

- b) *Vermiculita*: mineral micáceo, usado para melhorar o desgaste e a resistência térmica, além de reduzir os fenômenos de *swell* e *growth*;
- c) *Fibra Basáltica*: promove alta resistência à temperatura;
- d) *Lã de Rocha*: confere estabilidade ao coeficiente de atrito, aumento de agressividade/desgaste, pode fragilizar o material, além de ser uma fibra frágil, prejudicando o processo produtivo;
- e) *Poliacrilonitrila (PAN)*: uma parte de PAN pode substituir seis partes de amianto. Produz um reforço de alta qualidade;
- f) *Fibra de Vidro*: usado com sucesso na substituição ao amianto, possuindo propriedades de reforço mecânico;
- g) *Fibra de Celulose*: confere resiliência e produz materiais com baixo nível de ruído;
- h) *Fibras Aramadas (Kevlar[®], Akzo[®])*: conferem estabilidade de fricção, além de baixo nível de ruído e melhores condições de desgaste;
- i) *Fibras de Algodão*: melhora resistência mecânica a frio, confere maior flexão ao produto acabado, aumenta *fade* com temperatura, prejudica resistência mecânica a quente e, muitas vezes, provoca impacto de custo sobre o produto final devido à sazonalidade da fibra;
- j) *Fibras Metálicas* : atua como reforçador mecânico e contribuí, geralmente em grande quantidade, na formação do material de atrito.

Existe, ainda, a possibilidade de utilização de fibras de carbono. Porém, em função do alto custo desta fibra, ela tem sido utilizada em aplicações mais nobres como freios de avião e freios de carros de Fórmula Um.

- **Cargas**

As cargas representam um componente considerado quimicamente inerte. São utilizados no ajuste do percentual em massa das composições. Alguns exemplos de cargas são:

- a) *Barita* ($BaSO_4$): apresenta baixo custo, relativamente inerte e incrementa o desgaste e aumenta um pouco os baixos níveis de atrito;
- b) *Sílica* (SiO_2): substância não reativa, usada como abrasivo suave e elemento de acréscimo de atrito;
- c) *Kaolin* ($Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O$): usado para elevar os níveis de fricção;
- d) *Materiais Reciclados*: aqui entram os mais diversos tipos de materiais, todos considerados não reativos. Ex. material de atrito reciclado;

Como já mencionado, o trampolim que impulsionou a entrada de diversos elementos na composição de materiais de atrito foi a saída do amianto. Alguns autores [8] sugerem possíveis substituições para o amianto. As combinações escolhidas não necessariamente comportam-se como o amianto, mas apresentam propriedades similares. A seguir, na Figura 2.17, tem-se uma ilustração com algumas sugestões, muito embora, como já visto, muitas sejam as configurações possíveis.

2.6. Efeitos Tribológicos Ligados ao Par de Atrito

Como visto na seção anterior, muitos podem ser os efeitos macroscópicos provocados nas pastilhas de freio. Estes efeitos são derivados de dois acontecimentos: alterações de composição ou alterações tribológicas no par de atrito, durante o fenômeno de frenagem.

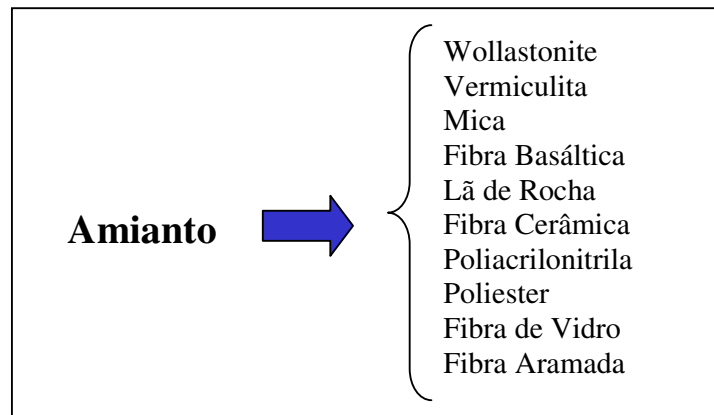


Figura 2.17 : Possíveis substituições ao amianto.

A alteração da condição tribológica é responsável, em grande parte, pelo aparecimento do *squeal*. Por outro lado, esta condição pode se mostrar variada, segundo a composição adotada no projeto da pastilha.

Não se tem a intenção de esgotar o tema sobre as influências tribológicas já que, por si só, seria assunto suficiente para uma tese. No entanto, algumas observações a cerca deste tópico ajudarão a elucidar a dificuldade de otimizar a composição de um material de atrito.

Os trabalhos nesta área são vastos e apresentam focos variados. Alguns tratam diretamente da resposta superficial do material devido à variação de constituintes, outros avaliam respostas macroscópicas ou, ainda, influências da topografia do disco e pastilhas sobre a geração do ruído.

Nosso foco se volta para a pastilha de freio. O sistema de freio aplica, durante o processo de frenagem, pressões na faixa de 0-40 bar, onde 40 bar representa praticamente o limite de travamento de roda.

Em seus ensaios, Eriksson [32] mostrou que o sistema que foi testado teve uma absorção de potência da ordem de 80 kW. Considerando que a área real de contato entre disco-pastilha é da ordem de 20% da área nominal e que a espessura de área deformada é

menor que $1 \mu\text{m}$, tem-se uma densidade de potência gerada que gira em torno dos 80 TW/m^3 . A geração desta potência está ligada ao nível do coeficiente de atrito. Pompon [86] apresenta um gráfico ilustrativo (Figura 2.13), comparando a potência do motor com a potência dissipada pelo sistema de freio para alguns veículos.

Um fato de ordem prática é que europeus tendem a utilizar freios de maior rendimento, enquanto americanos preferem o conforto. Reflexo disto é o nível do coeficiente de atrito utilizado nas aplicações. Enquanto europeus usam materiais com coeficiente de atrito em torno de 0,5, americanos preferem valores próximos a 0,4.

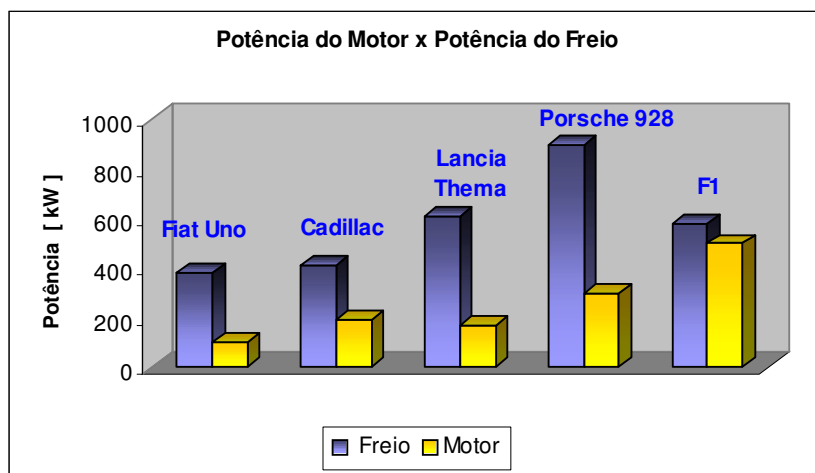


Figura 2.18 : Potência do motor x Potência gerada pelo sistema de freio.

Embora tenha um comportamento histerético, o coeficiente de atrito tende a aumentar durante a frenagem, mesmo que a pressão e a velocidade permaneçam constantes no processo. Testes executados pelo autor mostram que, se a superfície da pastilha for rugosa e irregular, o incremento do coeficiente de atrito será mais visível da primeira para a segunda freada, reduzindo-se nas freadas subsequentes

Numa situação de frenagem em aplicação normal a variação do atrito é uma das responsáveis pelo aparecimento do *squeal*. E esta variação está ligada à variação de temperatura, como já discutido.

Eriksson mostrou, ainda, que o mecanismo de atrito entre o disco e a pastilha está baseado numa configuração de platôs. Assim, existem platôs primários, que representam os 20% da área responsável pelo contato efetivo, e platôs secundários, que ancoram o primeiro e lhe conferem sustentação mecânica. A Figura 2.14 ilustra estes platôs.

Em outro trabalho, Eriksson [33] demonstrou que o aumento da área de contato, ou seja, um maior número de platôs primários, é capaz de reduzir a ocorrência do *squeal*.

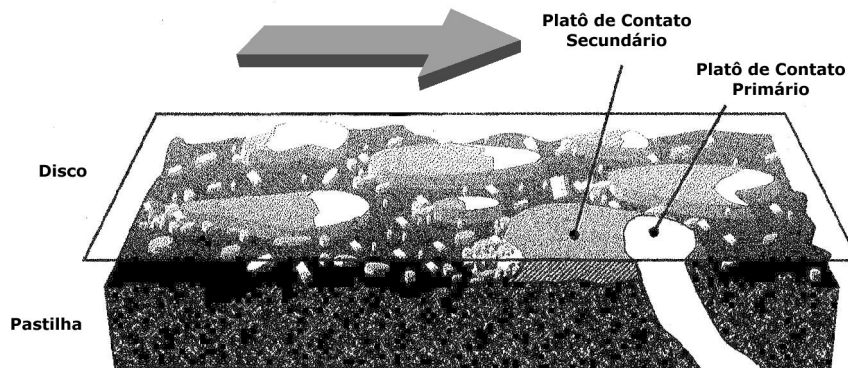


Figura 2.19 : Ilustração do contato dos platôs primários.

2.7. Metodologia e equipamentos Usados na Avaliação do Ruído

Muitas são as metodologias para se realizar uma avaliação das características de ruído de um sistema de freio, ou de suas variáveis de influência. Em geral, pesquisadores têm usado duas, ou mais, abordagens diferentes. O motivo para este procedimento é a busca pela validação, nos casos de modelos analíticos ou numéricos, ou mesmo a comprovação do fenômeno por mais de um método.

Alguns pesquisadores adotam as abordagens de modelagem de elementos finitos e validação experimental, a partir das frequências naturais, obtidas das funções de resposta em frequência. Normalmente, os modelos visam estudar variações geométricas ou de propriedades de material [6], [83].

Outros trabalhos consistem em comparar resultados provenientes de um modelo analítico com os resultados experimentais de ruído, medidos em dinamômetro de freios [27], [28], [79]. Cabe salientar que, na maioria dos casos experimentais, o dinamômetro integra a bancada de testes. Neste caso, os estudos buscam correlacionar variáveis de rigidez e amortecimento do sistema, entre outras, com ocorrências de ruído.

Pode-se seguir, ainda, metodologias que utilizam resultados de vibração do disco, obtidos por holografia, para compará-los aos resultados de ruído, obtidos no dinamômetro. Nestes casos, avalia-se o comportamento de propagação das ondas através do conjunto de freio, e compara-se com as ocorrências de instabilidade e geração de *squeal* [36], [39].

Um dos mais completos estudos, do ponto de vista de variedade de abordagens, avalia as curvas de resposta em frequência dos componentes para executar uma comparação com o ruído medido no dinamômetro. Usa, ainda, um modelo analítico para avaliar as instabilidades do sistema, mapeando-o em relação ao coeficiente de fricção experimental do material de atrito [9].

Para efeito desta tese, serão utilizados os seguintes procedimentos:

- Dinamômetro com analisador de sinais incorporado, permitindo leitura de um canal para sinal de microfone. Representando o principal instrumento da análise experimental no que diz respeito ao ruído, permitirá avaliar, ainda, as influências de todos os parâmetros de frenagem;

- Análise Modal Experimental, usada para a determinação do valor de amortecimento médio das pastilhas de freio;
- Teste de Compressibilidade, que proverá os resultados de rigidez estrutural das pastilhas. Este teste tem a característica de ser desenvolvido com temperaturas semelhantes as que ocorrem no sistema de freio real.

Um teste usual de dinamômetro inercial, seguindo o procedimento AK-Master [113], engloba 1400 freadas, divididas em vários ciclos. Cada ciclo desempenha frenagens em pressões que variam desde 5 bar até 40 bar. As temperaturas também variam de bloco para bloco e atingem 300 °C. Durante o teste, além do ruído do sistema, é possível medir o torque de frenagem, a pressão de frenagem, as temperaturas, a desaceleração e proporcionar climatização da câmara (veja Figura 2.21e 2.22), se for necessário.

A análise modal será desenvolvida usando-se um analisador de sinais Pulse[®] da Brüel&Kjaer. Nele serão registradas as curvas de resposta em frequência das pastilhas de freio para que se possa avaliar o amortecimento médio de cada amostra.

O teste de compressibilidade (veja Figura 2.23) consiste em manter uma placa aquecida em contato com o material de atrito. A pressão pode chegar a 60 bar com temperaturas de até 600 °C. A partir do registro de deslocamento e pressão, avalia-se a rigidez de cada amostra.

Além destes, todo o aparato necessário à composição das amostras de material de atrito será usado, tais como: prensas a quente, misturadores e fornos de cura.

Para os ensaios de dinamômetro, será usado um sistema de freio com *caliper* flutuante e disco sólido, conforme a Figura 2.20.

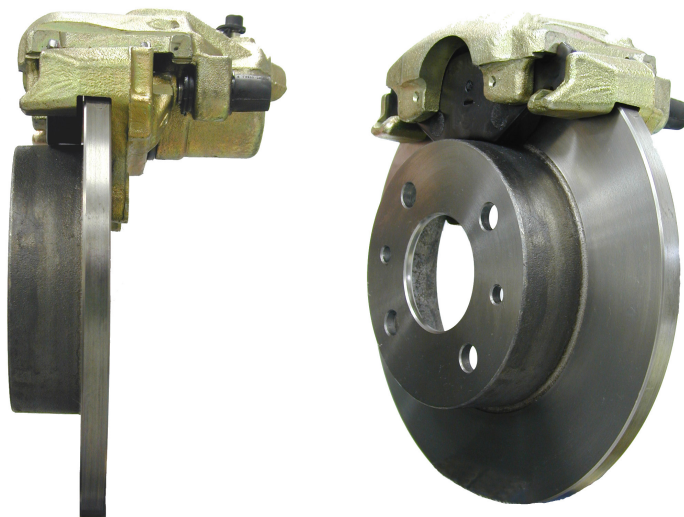


Figura 2.20 : Sistema de freio utilizado nos testes experimentais.

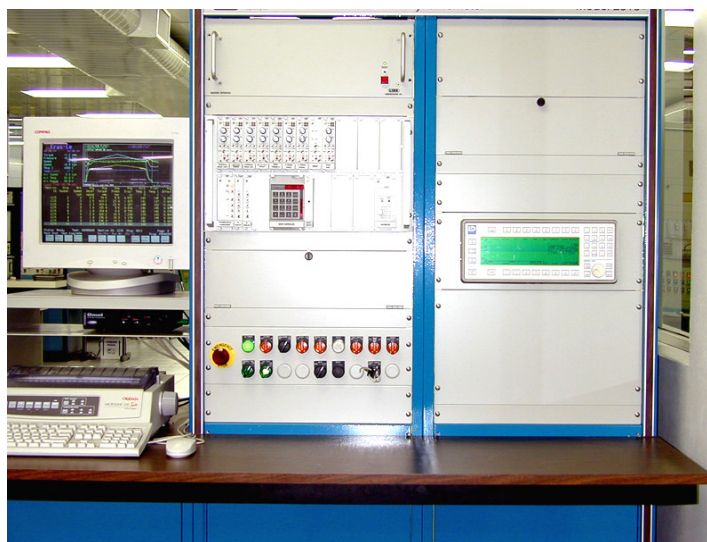


Figura 2.21: Painel do dinamômetro inercial para teste de sistemas de freio.



Figura 2.22 : Câmara do dinamômetro inercial para teste de sistemas de freio.



Figura 2.23 : Máquina de compressibilidade.

Capítulo III

Processos de Otimização

Neste capítulo são revisados os processos de otimização que, de alguma forma, contribuíram na direção de ajustar a composição de materiais de atrito. As peculiaridades de cada método são discutidas.

3.1. Projeto Fatorial 2^k	46
3.2. Método Taguchi	50
3.3. Método Multi-Critério	53

3.1. Projeto Fatorial 2^k

O projeto fatorial [75], [89] é utilizado em estudos onde tem-se diversos fatores de influência e deseja-se conhecer o efeito correspondente a cada fator ou interação entre eles. Uma generalização do projeto fatorial é o projeto fatorial 2^k . Neste caso, k representa o número de fatores envolvidos no projeto. A base dois refere-se aos dois níveis possíveis para cada um dos fatores: alto e baixo. O valor 2^k representa o número de ensaios, sem replicações, envolvidos num projeto que contemple a manifestação de cada um dos fatores em seus dois níveis e k o número de fatores.

Considere, como exemplo, um projeto com dois fatores e seus dois níveis. Supondo que se deseja verificar a influência da concentração de reagente e do catalisador no processo de conversão de uma dada reação química. Chamando o reagente de fator A , com níveis de 15% e 25%, e o catalisador de fator B , com níveis de 0,454 kg e 0,908 kg. O experimento é replicado três vezes. Os resultados podem ser vistos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 : Dados do Projeto Fatorial 2^2

Fator		Replicações			Total
A	B	I	II	III	
-	-	28	25	27	80
+	-	36	32	32	100
-	+	18	19	23	60
+	+	31	30	29	90

Fonte : Montgomery, [75].

A coluna dos fatores A e B mostram as combinações possíveis entre os níveis e as replicações mostram os valores de efeito obtidos sobre a velocidade da reação química.

A tabela acima pode ser visualizada graficamente como segue.

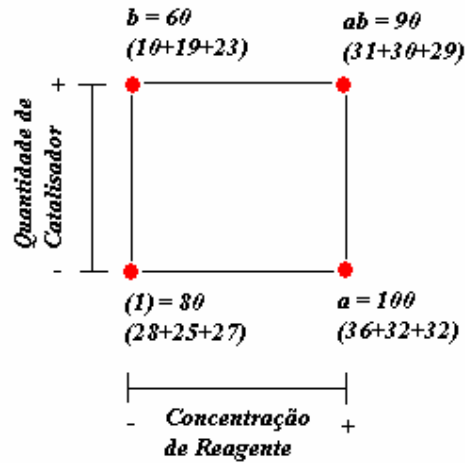


Figura 3.1 : Combinações do projeto 2^2 .

No esquema da Figura 3.1, a notação (1) é usada para referenciar ambas as variáveis em seus níveis mais baixos. O efeito médio de A pode ser obtido da Figura 3.1 como:

$$A = \frac{1}{2n} [(ab - b) + (a - (1))]$$

ou

$$A = \frac{1}{2n} [ab + a - b - 1] \quad (3.1)$$

onde n é o número de replicações. Da mesma forma, o efeito médio de B vale:

$$B = \frac{1}{2n} [(ab - a) + (b - (1))]$$

ou

$$B = \frac{1}{2n} [ab + b - a - 1] \quad (3.2)$$

Já o efeito médio da interação entre A e B pode ser escrita como :

$$AB = \frac{1}{2n} [(ab - b) - (a - (1))]$$

ou

$$AB = \frac{1}{2n} [ab + 1 - a - b] \quad (3.3)$$

Utilizando, agora, os valores da Tabela 3.1 e as Equações (3.1) a (3.3) podemos obter os valores dos efeitos de A , B e AB . Assim,

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{2.3} [90 + 100 - 600 - 80] = 8,33, \\
 B &= \frac{1}{2.3} [90 + 60 - 100 - 80] = -5,00, \\
 AB &= \frac{1}{2.3} [90 + 80 - 100 - 60] = 1,67
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Pode-se observar que o efeito de A é positivo. Isto indica que o aumento do percentual de reagente tende a aumentar a velocidade da reação. Já o efeito de B é negativo, sugerindo que um aumento de catalisador reduz a velocidade de reação.

A avaliação da interação entre A e B deve ser feita avaliando-se a magnitude do efeito de AB em comparação aos efeitos de A e B . Neste caso, nota-se que a magnitude é relativamente menor, indicando que o efeito da interação não é tão significativo.

Para confirmar as interpretações recorre-se à análise de variância. Para tanto, devemos calcular a soma dos quadrados dos contrastes para cada fator e interação do experimento.

Assim, tem-se

$$\begin{aligned}
 SS_A &= \frac{[ab + a - b - 1]^2}{4n} = \frac{50^2}{4.3} = 208,33, \\
 SS_B &= \frac{[ab + b - a - 1]^2}{4n} = \frac{(-30)^2}{4.3} = 75,00, \\
 SS_{AB} &= \frac{[ab + 1 - a - b]^2}{4n} = \frac{10^2}{4.3} = 8,33.
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

A soma total é encontrada pela Equação 3.6.

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{4n} \quad (3.6)$$

onde y_{ijk}^2 são os quadrados dos valores encontrados nas replicações e y_{\dots}^2 representa o quadrado da soma dos totais, ambos vistos na Tabela 3.1. Assim, a soma total resulta em $SS_T = 323,00$.

Já o erro total é computado usando a expressão (3.7)

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (3.7)$$

que retorna um erro igual a 31,34. De forma sumarizada, pode-se agrupar a análise de variância na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 : Análise de Variância do Projeto 2².

<i>Fontes de Variação</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média Quadrada</i>	<i>F₀</i>
A	208,33	1	208,33	53,15
B	75,00	1	75,00	19,13
AB	8,33	1	8,33	2,13
Erro	31,34	8	3,92	
Total	323,00	11		

O valor de F_0 é dado pela divisão de cada média quadrada pelo valor do erro médio quadrado. Este valor de F_0 é comparado ao valor do teste F , que é tabelado. Para o exemplo, será considerado um nível de significância de 5%, ou seja 95% de confiança. Assim, utilizando-se uma tabela de distribuição F com um grau de liberdade para cada fator e oito graus de liberdade para o erro (1/8), tem-se $F = 5,32$. Veja que, para as fontes de variação A e

B , tem-se $F_0 > F$. Isto leva à consideração de que os efeitos A e B são significativos e que a interação AB não o é.

3.2. Método Taguchi

O método desenvolvido por Taguchi [91] é derivado do método de projeto fatorial. Taguchi, através de simplificações, considerou que interações acima da segunda ordem são praticamente insignificantes para a maioria dos processos industriais. Seu método está centrado no controle das fontes de variação a cerca de um processo qualquer. Estas fontes de variação podem ser de duas formas: controláveis e incontroláveis, estas chamadas também de ruídos. Configurações de máquina e matéria prima, por exemplo, são consideradas fontes controláveis. Já variáveis ambientais, desgaste e imperfeições são fontes de ruído.

Segundo Castro [14] e Ferreira [38], os passos básicos do método são:

- 1) Formulação do problema;
- 2) Planejamento do experimento;
- 3) Análise dos resultados;
- 4) Experimento de confirmação;
- 5) Adoção dos novos critérios se as metas não forem atingidas no experimento de confirmação.

A formulação do problema deve incluir as etapas de classificação das variáveis a serem avaliadas e determinação dos seus respectivos níveis. A determinação dos níveis refere-se a definir os valores de máximo e mínimo de cada uma das variáveis envolvidas no processo.

Na etapa de planejamento do experimento, define-se a matriz de experimentos e procede-se a coleta de dados. A matriz de experimentos deve ser constituída de tal forma que não haja vícios durante o processo de realização efetiva do experimento e coleta de dados. Normalmente, quando se usa um *software* para esta finalidade, o mesmo toma o cuidado de não deixar os experimentos na ordenação óbvia de variação dos máximos e mínimos.

Para proceder a análise, tem-se dois métodos: média, ou variância. A variância permite avaliar a importância relativa de cada fator computado.

O experimento de confirmação visa estabelecer se o critério apresentado como ótimo durante os experimentos pode ser repetido. Em caso afirmativo, toma-se estes parâmetros como os ótimos.

Todo o processo pode, agora, ser repetido, utilizando-se os valores do experimento de confirmação como as novas metas a serem atingidas.

Em suma, o método de Taguchi visa a redução contínua da variabilidade de um método ou processo. Geralmente é aplicado em controle de métodos produtivos ao nível de fabricação.

Mesmo tendo em vista esta consideração, pesquisadores têm aplicado este método, na tentativa de otimizar materiais de atrito. Recentemente, Dante *et all* [22] abordaram a otimização de um material de fricção que não contivesse metais em sua composição. O alvo da otimização foi reduzir o desgaste e estabilizar o nível de atrito durante sucessivas variações de temperatura. Os estudos basearam-se nas seguintes premissas:

- a. É impossível prever o comportamento de um componente quando introduzido na fórmula se este estiver fora de um contexto;
- b. Os componentes da fórmula e seus pesos definem um contexto;
- c. O contexto fica limitado pela capacidade experimental;

- d. Um material de fricção é um sistema complexo e não é redutível a cada componente;
- e. Existe interação entre componentes;
- f. Estas interações afetam os efeitos dos componentes.

O procedimento completo dos testes [22] foi executado conforme seqüência que segue:

1. Inicia-se com uma nova fórmula (11 elementos);
2. Depois de selecionados os componentes básicos, o complemento da formulação foi feito com Barita (BaSO_4), que é um componente inerte;
3. Executa-se a mistura, prensagem e cozimento dos componentes;
4. Submete-se a amostra a testes tribológicos de coeficiente de atrito e desgaste;
5. A amostra é comparada com um material base, externo ao processo de otimização;
6. Novos níveis para o projeto Taguchi são determinados e o processo reinicia.

Os resultados desejados para o caso estudado foram atingidos com sucesso após 16 ciclos experimentais. Como conclusões, os autores ressaltam que a inclusão de mais variáveis de controle, além do atrito e desgaste, tornam o método mais complicado devido à natureza complexa da interação entre componentes. Mostraram, ainda, que os componentes responsáveis pela redução do desgaste e estabilização do atrito foram a Wolastonite e a resina.

3.3. Método Multi-Critério

Considerando as dificuldades apresentadas por métodos como o de Taguchi, pesquisadores tendem a agrupar mais de um método para solucionar o problema de otimização de materiais de atrito.

Uma aplicação desta técnica foi implementada por Elzey *et all* [30], [31]. Em seus estudos, o pesquisador utilizou duas técnicas distintas : programação quadrática e recozimento simulado (*simulated annealing*).

Os modelos de desempenho para o material de fricção foram determinados através de uma análise micromecânica. O autor concluiu que atributos da composição são fortemente determinados pela escolha dos constituintes do material de fricção e que cada um tem suas propriedades intrínsecas, tais como rigidez, densidade, condutividade térmica etc. Estes modelos micromecânicos devem considerar mudanças que podem ocorrer próximo à região de atrito efetivo em função da alta temperatura e nível de compressão. Outra conclusão importante é que uma alteração no modelo pode ser necessária se existe uma alteração significativa na fração volumétrica da matriz em relação as demais fases do material. O modelo foi representado por um conjunto de equações na forma

$$P_l = P_l [f_i, a_{ij}(T, t), \varphi_i, \theta_{ik}(T, t), p], \quad (3.8)$$

onde:

P_l = l-ésimo atributo;

f_i = fração volumétrica do i -ésimo constituinte;

φ_i = forma das fases descontínuas (fibras, particulados, etc.);

a_{ij} = representa a j -ésima propriedade intrínseca do i -ésimo material constituinte

θ_{ik} = k -ésima propriedade interfacial do i -ésimo constituinte da matriz;

T = temperatura;

p = pressão aplicada;

t = tempo.

A Equação (3.8) está vinculada à hipótese de que não existirão mudanças no mecanismo e que o modelo é válido apenas para uma dada faixa da fração volumétrica dos constituintes.

Uma vez obtido um grupo de equações, baseadas na Equação (3.8), o problema pode ser definido em duas etapas distintas:

- 1) Seleção ótima de componentes: usando programação quadrática;
- 2) Composição ótima: usando recozimento simulado.

De forma geral, o problema pode estar dividido nas seguintes categorias:

- a) O número de constituintes é conhecido e um sub-conjunto de constituintes é especificado;
- b) O número de constituintes é conhecido e não é especificado um sub-conjunto de constituintes;
- c) O número de constituintes é desconhecido e um sub-conjunto de constituintes é especificado;
- d) O número de constituintes é desconhecido não se especifica nenhum sub-conjunto de constituintes.

Em todos os casos, inicialmente precisa-se definir um grupo de constituintes e depois passar ao sub-programa para definir as frações volumétricas. Desta forma, o cálculo do número de combinações para seleção de materiais é feita através da relação (3.6). Nela tem-se M constituintes de um conjunto de N materiais possíveis. Assim, o número de combinações de M materiais escolhidos de um conjunto de N opções é dado pela Equação (3.9):

$${}_N C_M = \frac{N!}{M!(N-M)!} \quad (3.9)$$

Como resultado, o número de combinações possíveis a serem consideradas para um banco de dados de material modesto acarreta uma busca exaustiva, até encontrar uma combinação que proporcionasse um bom desempenho. Como exemplo, se seis materiais forem escolhidos de um banco de dados com dezoito materiais tem-se 18.564 combinações possíveis.

Para a utilização da otimização com programação quadrática faz-se necessária a definição de uma função objetivo e restrições. A função objetivo desenvolvida pelo autor foi:

$$J = k_1(W^g - W)^2 + k_2(F^g - F)^2 + k_3(C^g - C)^2 + k_4(k^g - k)^2 + k_5(\alpha^g - \alpha)^2 \quad (3.10)$$

onde:

W = taxa de desgaste [adimensional];

F = coeficiente de fricção [adimensional];

C = custo da composição por unidade de volume;

k = coeficiente de condutibilidade térmica;

α = coeficiente de dilatação térmica;

k_i = fatores de peso que determinam a importância do atributo no desempenho.

O sobre-índice g (*goal*) determina os valores alvo da otimização. A referida função objetivo é minimizada seguindo as restrições:

$$\sum_{i=1}^N f_i = 1; \quad (3.11)$$

ou seja, a soma das frações volumétricas não pode exceder a 100% e ainda os limites:

$$\begin{aligned} \underline{V}_{cer} &\leq \left(\sum_{j=1}^{N_{cer}} f_{cer_j} \right) \leq \bar{V}_{cer}, \\ \underline{V}_{met} &\leq \left(\sum_{j=1}^{N_{met}} f_{met_j} \right) \leq \bar{V}_{met}, \\ \underline{V}_{pol} &\leq \left(\sum_{j=1}^{N_{pol}} f_{pol_j} \right) \leq \bar{V}_{pol}, \end{aligned} \quad (3.12)$$

onde V_{cer} , V_{met} e V_{pol} são os limites de cerâmica, metal e polímeros admitidos na composição, sendo que a sub-barras e a sobre-barras representam o limite mínimo e máximo, respectivamente.

E o modelo de desempenho é dado por:

$$\begin{aligned} \{W, F, C, k, \alpha\} = & \left\{ W_{cra} + W_{abr} + W_{adh}, \sum_j (s_j^f F_{abr}) + F_{adh}, \sum_i f_i C_i, \right. \\ & \left. \sum_j s_j^k k(f_i, k_m, k_p, shape, packing), \sum_j s_j^\alpha \alpha(f_i, \alpha_m, \alpha_p, K_m, K_p, G_m) \right\}; \end{aligned} \quad (3.13)$$

onde:

W_{cra} = taxa de desgaste devido a partículas livres;

W_{abr} = taxa de desgaste abrasivo;

W_{adh} = taxa de desgaste adesivo;

F_{abr} = coeficiente de atrito abrasivo;

F_{adh} = coeficiente de atrito adesivo;

s_j^f, s_j^k, s_j^α = funções para tornar suave a transição das aproximações diluídas e não diluídas.

Os somatórios podem ser entendidos como:

$\sum_j (s_j^f F_{abr})$ = somatório de todos os valores de coeficiente de atrito abrasivos;

$\sum_i f_i C_i$ = custo total da mistura;

$\sum_j s_j^k k(f_i, k_m, k_p, shape, packing)$ = coeficiente de condutibilidade térmica como função das frações volumétricas, da forma, do grau de empacotamento e da condutibilidade da matriz e dos reforçadores;

$\sum_j s_j^\alpha \alpha(f_i, \alpha_m, \alpha_p, K_m, K_p, G_m)$ = coeficiente de dilatação térmica como função das frações volumétricas, dos módulos de elasticidade e dos coeficientes de dilatação da matriz e do reforço, e do módulo de cisalhamento da matriz.

Para resolver o problema utilizando recozimento simulado, chama-se a primeira seleção de materiais de v_c . Esta composição é utilizada para gerar uma função objetivo “ótima” $f^*(v_c)$.

Utilizando a analogia com o processo de recozimento, tem-se uma energia associada a este resultado, chamada de $E_1 = f^*(v_c)$. Se o valor de energia é incrementado, tem-se um decréscimo de desempenho.

O processo de otimização prossegue e o algoritmo substitui aleatoriamente um constituinte v_c , o que resulta numa nova composição v_n . A nova composição “ótima” para a troca realizada é $f^*(v_n)$, que resulta numa energia igual a $E_2 = f^*(v_n)$.

Agora, em analogia ao processo de ativação térmica, a probabilidade de o sistema ser alterado para uma nova configuração é dada pela distribuição de Boltzmann [30]:

$$p = \exp\left[\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right] \quad (3.14)$$

onde k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta.

Com base na equação (3.14), se $E_1 < E_2$ então a probabilidade torna-se maior que a unidade e, arbitrariamente, toma-se $p = 1$ mantendo-se a atual seleção. Por outro lado, se $E_1 > E_2$, a probabilidade é menor que a unidade e a alteração poderá ocorrer segundo algum critério de controle.

A temperatura absoluta, que neste tipo de otimização é um termo fictício, é configurada para ter grandes valores. À medida em que o algoritmo prossegue, a temperatura vai baixando e reduz-se, também, a probabilidade de aceitação de uma configuração de alta energia, ou seja, de baixo desempenho.

No início do processo, o algoritmo consegue varrer um vasto número de possibilidades dentro do espaço de busca, reduzindo este espaço à medida em que a temperatura decresce. Reduzindo-se o espaço de busca, aumenta-se a chance de localizar um mínimo global.

Nos exemplos desenvolvidos, o autor [30] salienta que o algoritmo de recozimento simulado encontrou como resultado ótimo um valor de mínimo local. Ele aponta que este fato

ocorreu devido ao baixo número de elementos no banco de dados base. Salaria, ainda, que seus experimentos ilustram a dificuldade de otimizar uma composição de materiais de atrito e recomenda que restrições eficientes sejam implementadas.

Em suma, o procedimento multi-critério apresentado usa o recozimento simulado para minimizar a função objetivo, que considera a influência dos constituintes e a programação quadrática para abordar a influência relativa das frações volumétricas dos constituintes.

Capítulo IV

Algoritmos Genéticos

Aqui, faz-se referência a alguns aspectos históricos dos Algoritmos Genéticos, a terminologia aplicada em tais programas e sua relação com as aplicações no campo da engenharia. Tem-se, ainda, as vantagens e desvantagens deste método e os principais operadores aplicados.

4.1. Histórico	61
4.2. Terminologia Usada em Algoritmos Genéticos	63
4.3. Diferenças entre AGs e Outros Métodos	64
4.4. Operadores Genéticos em Codificação Binária	66
4.5. Operadores Genéticos em Codificação Real	69
4.6. Avaliação da População e Métodos de Seleção	74
4.7. Parâmetros de Influência e Configurações	79
4.8. Vantagens e Desvantagens dos AGs	82
4.9. Estudos de Caso Usando Codificação Binária	84
4.10. Estudos de Caso Usando Codificação Real	92

4.1. Histórico

Em meados do século XIX, um dos mais importantes princípios no campo da evolução da vida foi apresentado à comunidade científica: a seleção natural de Darwin. Este princípio defende a idéia de que, na natureza, aqueles seres vivos com melhores características ou “adaptabilidades”, tendem a sobreviver frente aos demais.

Estes princípios básicos de genética, que se baseiam na idéia que a variabilidade entre indivíduos de uma população de organismos que se reproduzem sexualmente se dá pela mutação e pela recombinação gênica, foram desenvolvidos durante as décadas de 30 e 40 por biólogos e matemáticos de importantes centros de pesquisa.

Nas décadas de 50 e 60, muitos biólogos começaram a desenvolver simulações computacionais de sistemas genéticos. A primeira aparição do termo Algoritmo Genético foi encontrada numa publicação de 1967, de J.D. Bagley, falando sobre o uso deste recurso na programação de jogos para computador.

A primeira aplicação dos AGs na solução de uma otimização puramente matemática foi a publicação de R.B. Hollstien, em 1971, chamada *Artificial Genetic Adaptation in Computer Control Systems*. Entretanto, foi John Holland quem começou, seriamente, a refinar suas idéias sobre o tema, culminando em 1975 na publicação de seu livro, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, hoje considerado o marco dos Algoritmos Genéticos.

Desde então, tais algoritmos vêm sendo aplicados com sucesso nas mais diversas áreas, dentre elas a otimização e o aprendizado de máquinas.

Esta técnica de programação, chamada Algoritmos Genéticos, tem se inspirado no princípio da mutação e recombinação genética para possibilitar aos computadores um certo grau de “Inteligência Artificial”. Sendo assim, Algoritmos Genéticos, ou AGs, representam um mecanismo de busca computacional baseado nas leis de seleção natural desenvolvidas por Darwin.

Em síntese, os algoritmos genéticos transformam uma população de indivíduos, cada um com um valor associado de aptidão, numa nova geração de indivíduos, usando os princípios de Darwin para reprodução genética.

Cada indivíduo na população representa uma possível solução para um dado problema. O que o algoritmo genético faz é procurar aquela que seja a melhor para o problema em questão, através da criação genética de populações de indivíduos cada vez mais aptos a tornar extrema a função objetivo de interesse.

Desde sua primeira aplicação, em 1971, os Algoritmos Genéticos têm se diversificado e estão sendo aplicados nas mais diversas áreas. Torna-se difícil agrupar todas as áreas de aplicação para um AG, mas dentre elas estão [12, 19, 56, 59, 68, 88, 102]:

- Otimização acústica de placas vibrantes;
- Otimização de vigas de suporte;
- Otimização de projeto de estruturas bi-dimensionais;
- Controle passivo de vibrações;
- Otimização não-linear;
- Otimização de vigas de concreto reforçado, entre outras.

Estas aplicações demonstram a ampla utilização deste algoritmo nas mais diversas áreas da engenharia.

4.2. Terminologia Usada em Algoritmos Genéticos

Para vincular a terminologia usada na biologia, e por consequência ao uso de AGs, com a terminologia matemática e de engenharia, apresenta-se a relação que segue [15], [18], [43].

- **Cromossomo:** Cadeia de caracteres representando alguma informação relativa às variáveis do problema. Cada cromossomo representa uma solução do problema;
- **Gen :** É a unidade básica do cromossomo. Cada cromossomo tem um certo número de gens, cada um descrevendo uma certa variável do problema;
- **População:** Conjunto de cromossomos ou soluções;
- **Geração:** O número da iteração que o Algoritmo Genético executa;
- **Operações Genéticas:** Operações que o Algoritmo Genético realiza sobre cada um dos cromossomos;
- **Espaço de Busca ou Região Viável:** É o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado. Deve ser caracterizado pelas funções de restrição, que definem as soluções viáveis do problema a ser resolvido;

- **Função Objetivo ou de Avaliação:** É a função que se quer otimizar. Ela contém a informação numérica do desempenho de cada cromossomo na população. Nela estão representadas as características do problema que o Algoritmo Genético necessita para realizar seu objetivo, sendo expressa normalmente como:

$$J = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

onde x_1, x_2, \dots, x_n são as variáveis que o algoritmo procura determinar para otimizar J .

Esta função objetivo é, em princípio, calculada para cada cromossomo da população;

- **Fitness:** É o resultado produzido pela função objetivo quando ela é avaliada usando um cromossomo ou população.

4.3. Diferenças entre AGs e Outros Métodos

Os métodos clássicos de otimização usam um único candidato, chamado de solução básica. Assim, pelo cálculo de derivadas, determina-se a direção de avanço para a busca do próximo candidato. Como usam o cálculo de derivadas, são denominados algoritmos de ordem n , onde n é a maior derivada utilizada. Exemplos típicos são os métodos dos gradientes conjugados e de Newton, que por utilizarem derivadas primeiras e segundas, respectivamente, são caracterizados como algoritmos de primeira e segunda ordem.

O maior problema destes algoritmos matemáticos é que não existe nenhuma garantia de obter o extremo global. A tendência predominante é a convergência para o extremo local mais próximo da direção de busca determinada pelas derivadas. Por esta razão, algoritmos desta natureza têm sido mais empregados em problemas unimodais, ou seja, aqueles que apresentam apenas um extremo no intervalo considerado. Já para problemas multimodais, a

aplicação de métodos baseados em derivadas constitui tarefa difícil, considerando-se que o algoritmo necessita de um ponto de partida inicial e que pode convergir para um ótimo local.

Além dos métodos que utilizam derivadas no processo de otimização, outros foram sendo desenvolvidos ao longo do tempo, na intenção de obter melhores resultados para grupos específicos de problemas.

De qualquer forma, uma propriedade esperada em um algoritmo de busca eficiente é que ele seja capaz de localizar uma boa solução, independentemente do ponto de partida da busca.

4.3.1. Algoritmos Genéticos e Recozimento Simulado

A exemplo do próprio Algoritmo Genético, surgiu o Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*). A idéia deste algoritmo está baseada no processo de confecção de alguns tipos de aços. Da mesma forma que o resfriamento lento de um material, como o aço, permite obter a sua condição de menor energia e evitar conseqüências indesejáveis no produto final, o resfriamento rápido pode “bloquear” o processo de equilíbrio [20]. Em alguns tipos de materiais este resfriamento rápido é desejado. De qualquer forma, a variável de controle para o processo é a temperatura.

As equivalências computacionais são, de certa forma, óbvias. O parâmetro de controle no algoritmo de Recozimento Simulado é uma “temperatura computacional”, que decresce a cada passo do algoritmo, reduzindo seu espaço de busca. A redução brusca desta “temperatura” ou seu gradiente pode provocar “pulos” forçando o algoritmo a um mínimo/máximo local. Para o controle adequado da redução da temperatura, é necessário definir uma função de redução de temperatura.

Diversos autores têm estudado o algoritmo do Recozimento Simulado para aplicá-lo a problemas específicos [4, 29, 55, 50, 58, 98, 106].

Segundo Ingber [55], os Algoritmos Genéticos têm uma eficiência extremamente alta de cobrir o espaço de busca em função do seu paralelismo inerente, já que trabalha com populações. Já o Recozimento Simulado move-se de um valor otimizado ao próximo, mantendo uma linearidade na otimização. O pesquisador ressalta que, para o conjunto de funções testadas, a eficiência dos dois algoritmos foi dependente do tipo da função otimizada. No entanto, o Algoritmo Genético apresentou eficiência igual ou superior ao Recozimento Simulado quando avaliados em relação ao número de gerações (ou passos de temperatura) necessárias para localizar o mínimo global e, também, a magnitude deste mínimo.

Yap [106] mostrou em seus estudos que o algoritmo de Recozimento Simulado consome 1,6 vezes mais tempo de processamento que o Algoritmo Genético. Além disso, a precisão do AG foi inegavelmente superior a do Recozimento Simulado. Esta conclusão é importante dada a complexidade da função objetivo usada para a otimização.

Outro aspecto relevante é que o algoritmo de recozimento requer o ajuste de parâmetros específicos para cada problema. Após estes ajustes globais, para uma variação suave do problema, novos ajustes não serão necessários. No entanto, se a variação do problema for grande, isto é, houver uma mudança significativa da função objetivo, o algoritmo pode apresentar divergências.

Estudos foram realizados, e ainda o são, para avaliar a convergência do Recozimento Simulado [3], [70]. Como em qualquer algoritmo, a convergência depende da configuração dos seus parâmetros e do tipo de função que será otimizada.

4.4. Operadores Genéticos em Codificação Binária

Os operadores genéticos são a verdadeira ferramenta de um AG. Eles são responsáveis pelas alterações que ocorrem numa população de cromossomos e, também, pela flexibilidade de varredura do espaço de solução. Tendo em vista que representam um procedimento estocástico, estes operadores têm facilidade em cobrir o espaço de busca. Porém, cuidados devem ser tomados para que estes operadores não tornem a busca essencialmente aleatória.

4.4.1. Operadores de *Crossover*

Ao cruzar dois pais, uma ou mais novas soluções são criadas trocando-se a informação genética dos genitores em um ou mais pontos que também são selecionados aleatoriamente. Este operador, também conhecido como recombinação, pode ser utilizado de várias maneiras, onde as mais empregadas são [15], [21], [43], [74] :

- **Um ponto:** um ponto de cruzamento é escolhido e a partir dele as informações genéticas dos pais são trocadas;
- **Multi-ponto:** é uma generalização da idéia de troca de material genético, onde muitos pontos de cruzamento podem ser utilizados;
- **Uniforme:** não utiliza pontos de cruzamento, mas determina através de um parâmetro global, chamado probabilidade de máscara, qual a probabilidade de cada variável ser herdada de cada pai;

A Figura 4.1 mostra um exemplo de dois cromossomos realizando o cruzamento de um ponto, em que a localização do ponto foi escolhida aleatoriamente.

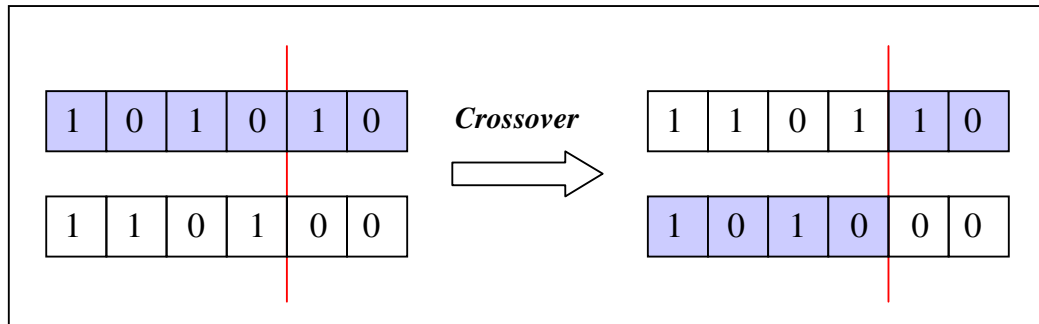


Figura 4.1: Esquema de cruzamento de um ponto em codificação binária.

Estudos mostram que quando se usa codificação binária pode-se encontrar problemas de composições genéticas pobres. Geralmente isto ocorre para problemas de otimização mais complexos que possuem cadeias binárias longas.

4.4.2. Operador de Mutação

Os operadores de mutação são extremamente necessários para aumentar a diversidade da população e melhorar a eficiência da varredura no espaço de busca do algoritmo. Este operador executa esta tarefa introduzindo aleatoriamente modificações em um ou mais bits da cadeia do cromossomo, assegurando assim a possibilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca. A figura que segue apresenta um esquema da mutação.

4.5. Operadores Genéticos em Codificação Real

Para problemas onde se tem um número elevado de variáveis, um algoritmo genético em codificação binária gera cromossomos muito grandes. Além deste fato, conversões de *strings* para números e vice-versa, acarretam uma sobrecarga computacional [18], [45].

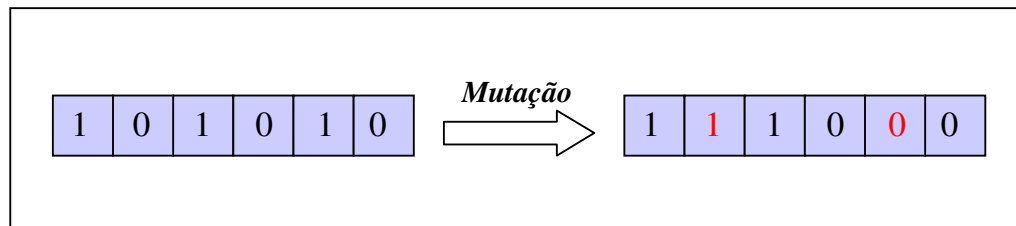


Figura 4.2: Esquema de mutação em codificação binária.

Nestes casos, a codificação real aplica-se com melhor desempenho porque os operadores atuam diretamente sobre a variável de interesse e a precisão numérica é igual à da máquina.

A seqüência de operação de ambos os algoritmos é idêntica. O que deve ser alterado são as funções que atuam sobre *strings*.

4.5.1. Operadores de *Crossover*

Os operadores de *crossover* em codificação real selecionam os pais e criam um novo valor aleatório que se encontra no intervalo compreendido entre o valor dos dois pais.

Estes operadores podem ser implementados dando ao AG um poder de extrapolação. Neste caso, o operador aumenta um pouco o intervalo para além dos limites estabelecidos pelos pais. O *crossover* extrapolador pode criar valores fora do espaço de solução, o que deve ser corrigido por funções limitadoras. Além disso, pode-se trabalhar forçando os filhos à “nascerem” mais próximos do valor do melhor indivíduo, através do uso de probabilidade.

Existe três tipos básicos de operadores de *crossover* [18]:

- *Crossover* Plano;
- *Crossover* Aritmético;
- *Crossover* Intermediário.

Basicamente, eles diferem entre si pela condição de extrapolação e de como geram os descendentes.

- *Crossover* Plano

Para cada par de pais selecionados, um filho é gerado. Cada filho será gerado aleatoriamente dentro do intervalo delimitado pelos seus pais. A Figura 4.3 ilustra este princípio.

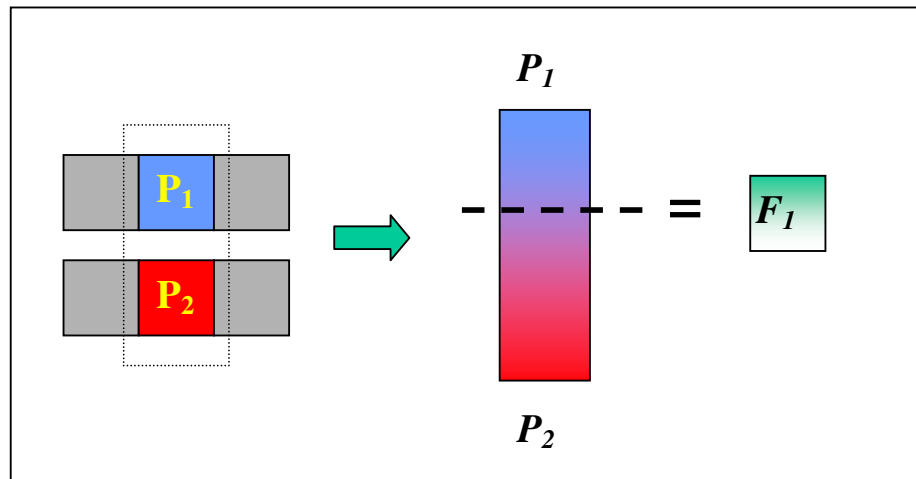


Figura 4.3: Esquema de *crossover* plano.

- *Crossover* Aritmético

Neste caso, geram-se dois filhos para cada dois pais selecionados. Para cada filho, gera-se um valor aleatório entre 0 e 1 para o parâmetro α e aplica-se nas equações que seguem :

$$\text{Filho_1}(i) = \text{pai_1}(i) + \alpha(\text{pai_2}(i) - \text{pai_1}(i))$$

$$\text{e} \quad \text{Filho_2}(i) = \text{pai_2}(i) + \alpha(\text{pai_1}(i) - \text{pai_2}(i)) ; \quad (4.2)$$

onde i = posição na população [$i = 1 \dots \text{tamanho da população}$]. A Figura 4.4 mostra graficamente o *crossover* aritmético.

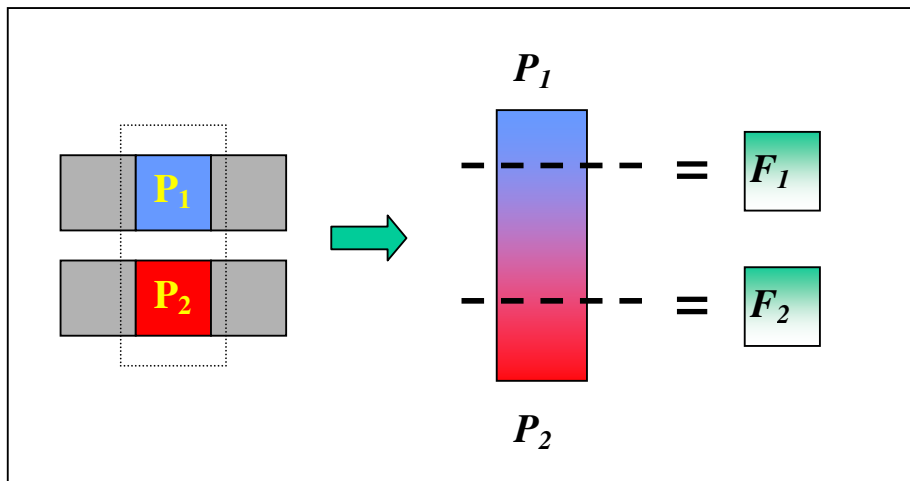


Figura 4.4: Esquema de *crossover* aritmético.

- *Crossover* Intermediário

Como o próprio nome sugere, este tipo de cruzamento executa uma operação que fica entre o operador plano e o aritmético.

Para implementar este processo de cruzamento, recorre-se à equação que segue:

$$Filho_1(i) = pai_1(i) + \alpha(pai_2(i) - pai_1(i)) \quad (4.3)$$

Note-se que a Equação (4.3) é idêntica a primeira das equações do cruzamento aritmético. A diferença é que, neste caso, o parâmetro α pode assumir valores no intervalo $[-d; 1+d]$. Este parâmetro d pode ser ajustado, mas deve-se lembrar que valores muito altos podem gerar filhos muito além da faixa desejada. Em geral, usa-se $d = 0,25$.

4.5.2. Operador de *Mutação*

Os operadores de mutação introduzem uma alteração no indivíduo a ser mutado através da utilização de uma probabilidade que deve se confirmar durante a geração. Existem três tipos básicos de mutação:

- Mutação Uniforme
 - Mutação por Deslocamento
 - Mutação Exponencial
-
- Mutação Uniforme

Este tipo de mutação prevê a substituição de cada um dos genes da população por um novo valor que esteja dentro da faixa de otimização proposta. Em geral, a probabilidade de mutação é baixa, cerca de 1%, para evitar o processo enumerativo. Na Figura 4.5, pode-se ver um esquema deste tipo de mutação.

- Mutação por Deslocamento

Neste tipo de mutação, cada gen recebe a adição de um pequeno valor. Este valor pode ser obtido multiplicando-se um valor aleatório entre 0 e 1 por um percentual da faixa de otimização escolhida para o problema. O sinal do valor deve ser sorteado aleatoriamente com probabilidade igual de ser negativo ou positivo.

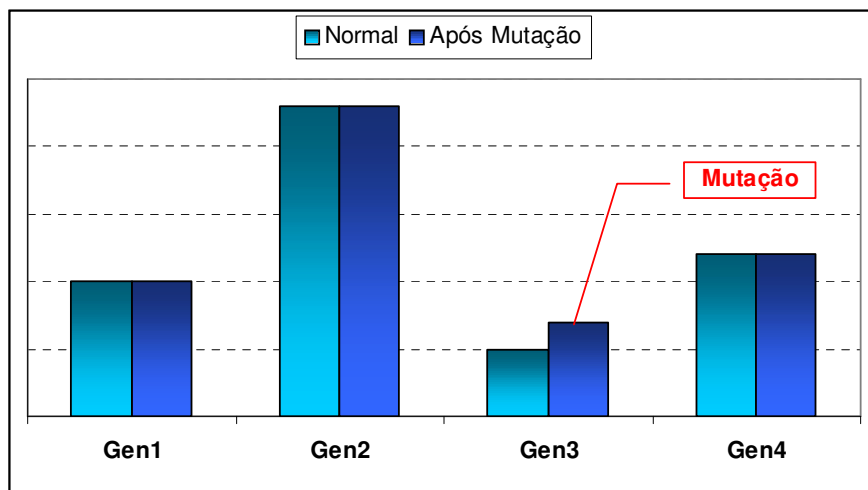


Figura 4.5: Esquema de mutação uniforme.

Diferentemente da mutação uniforme, assume-se probabilidade de ocorrer a mutação como igual a 1. Isto significa que sempre ocorrerá mutação. A quantidade que será somada ou diminuída ficará a critério do desenvolvedor do algoritmo através da especificação do percentual da faixa de otimização. A Figura 4.6 mostra um esquema deste procedimento de mutação.

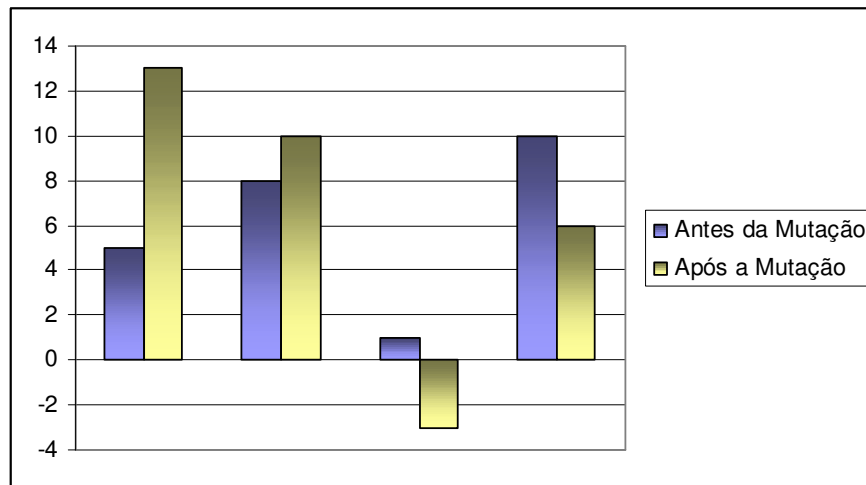


Figura 4.6 : Esquema de muta o por deslocamento.

- Muta o Exponencial

Este tipo de muta o representa uma varia o da muta o por deslocamento. A diferen a reside no fato de que a probabilidade aplicada para calcular o valor adicionado a cada gen. Neste caso a probabilidade utilizada   exponencial. Assim, tem-se uma maior probabilidade de escolher valores pequenos e uma menor probabilidade de escolher valores elevados para realizar a soma. Da mesma forma que para a muta o plana, deve-se utilizar uma probabilidade de ocorr ncia baixa para evitar processo enumerativo.

4.6. Avalia o da Popula o e M todos de Sele o

A avalia o estat stica das popula es em um AG constitui uma forma eficiente de monitora o do andamento do algoritmo. Podem-se registrar todas as informa es de interesse em cada gera o, de forma a estabelecer um crit rio conveniente de parada do algoritmo.

Já os métodos de seleção de indivíduos na população são baseados em seu *fitness*, isto é, na sua aptidão de proporcionar bons resultados.

4.6.1. Avaliação da População

A avaliação da população é realizada pela função objetivo, que indica a “qualidade” de cada indivíduo na população, ou seja, sua capacidade de representar o máximo/mínimo.

Não existe a necessidade de se calcular as derivadas da função objetivo e, conseqüentemente, um algoritmo genético pode ser utilizado também sem nenhuma modificação para otimizar funções não diferenciáveis.

Outro fato é que a escolha da função *de aptidão* é para a maioria das aplicações a etapa crítica do processo, já que ela deverá ser avaliada para cada cromossomo de cada população dentro do processo evolutivo.

4.6.2. Métodos de Seleção

Seguindo pelo caminho da teoria evolucionista, o processo de seleção baseia-se no princípio da “sobrevivência dos melhores indivíduos”, onde os cromossomos com melhor aptidão têm maior probabilidade de serem transmitidos a um novo indivíduo. Em contrapartida, os indivíduos com baixa aptidão serão descartados da população conforme a pressão de seleção natural.

Na prática computacional, os indivíduos são diretamente selecionados da população aos pares para a reprodução, sendo seus herdeiros implantados na próxima geração.

Existem metodologias que fazem uso de uma população intermediária, gerada a partir de um método de seleção escolhido convenientemente.

Inúmeros esquemas de seleção já foram propostos e implementados na prática dos AGs, alguns não sendo biologicamente plausíveis. Na seqüência, alguns dos métodos mais empregados são discutidos.

4.6.2.1. Seleção Via Método da Roleta

Uma forma de quantificar a probabilidade dos indivíduos da população serem selecionados para reprodução é o cálculo proporcional de sua aptidão através do seu valor aplicado na função objetivo.

Um método de cálculo destas probabilidades é dado pela expressão abaixo [15], [43].

$$p_i = \frac{f_i(E_i)}{\sum_{i=1}^N f_i(E_i)} ; \quad (4.4)$$

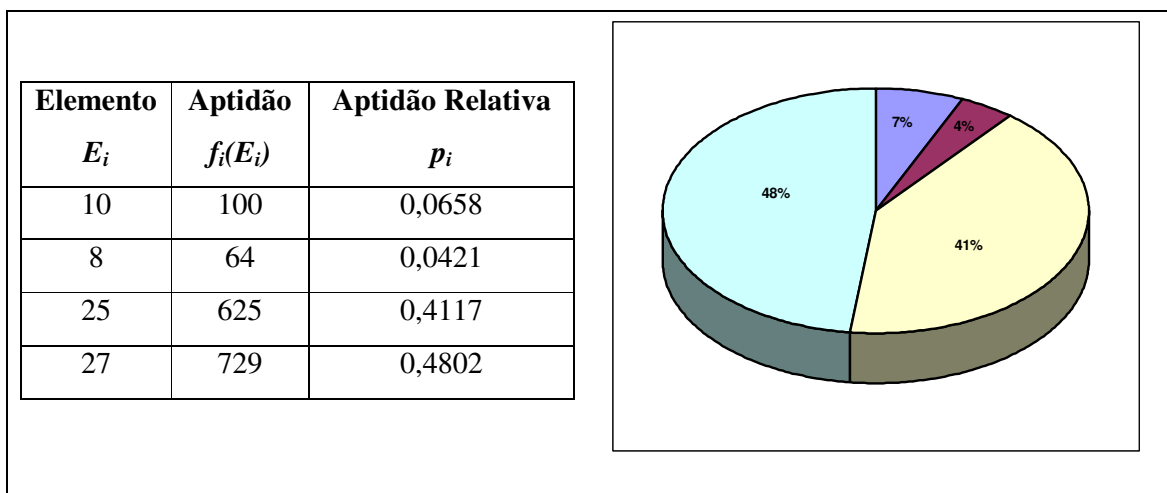
onde E_i são os elementos da população e N é o tamanho da população.

Uma vez definida a forma de quantificação da probabilidade de sobrevivência de cada indivíduo da população, emprega-se um dos muitos métodos utilizados para a seleção dos indivíduos propriamente dita.

Um dos métodos largamente empregados para tal finalidade é o conhecido “método da roleta” [15], [43], onde cada indivíduo da população é representado proporcionalmente ao seu índice de aptidão. Assim, os indivíduos com alta aptidão recebem uma porção maior da roleta, enquanto que os de baixa aptidão ocuparão uma porção relativamente menor. Deste modo, realiza-se o lançamento N vezes da roleta, e um número aleatório entre zero e um é gerado. O elemento cuja probabilidade da roleta se enquadrar no valor aleatório gerado é selecionado. Esse procedimento faz com que indivíduos melhor adaptados sejam selecionados mais

frequentemente que os menos adaptados, sem eliminar a possibilidade de indivíduos pouco adaptados também serem selecionados. Com isso, pode-se esperar uma diversidade maior na população do que quando seleções determinísticas são utilizadas.

Como exemplo será considerada a otimização da função $f(x) = x^2$ no intervalo $x = [0,30]$. A Figura 4.7 ilustra o “método da roleta” para 4 indivíduos sorteados aleatoriamente no intervalo mencionado.



Este método apresenta algumas desvantagens:

- Possui alta variância, o que pode levar a um número excessivo de cópias de um cromossomo de alta aptidão, diminuindo a diversidade da população. Este fato pode ocasionar convergência prematura do algoritmo para uma solução diferente da “ideal”;
- A existência de vários cromossomos iguais, em evoluções avançadas, revela uma estagnação do algoritmo devido à baixa pressão de seleção;

- O método é fortemente dependente da escala da função de aptidão, que pode aproximar muito os valores de probabilidade de seleção, dificultando o processo;

Estas questões indesejáveis fizeram surgir outros métodos de seleção, como os descritos a seguir.

4.6.2.2. Seleção por Ordenação

Existem dois tipos de seleção por ordenação: linear e exponencial. Nestes dois tipos de modelos, os indivíduos são ordenados pelas suas aptidões, ou seja, do melhor para o pior. Depois, a cada indivíduo é atribuída uma probabilidade de seleção p_i , onde p_i é uma probabilidade tomada de uma dada distribuição, sendo restringida para que $\sum p_i = 1$.

As distribuições de probabilidade mais comuns são a linear, $p_i = a.i + b$, e a exponencial, $p_i = a \exp(b.i+c)$. A distribuição exponencial equivale a selecionar o primeiro indivíduo com probabilidade p , o segundo com probabilidade p^2 , o terceiro com p^3 e assim por diante.

As principais vantagens do modelo de seleção via ordenamento são [8]:

- Não causa convergência prematura;
- Não permite estagnação, porque mesmo quando a evolução está bastante avançada $N_1 \neq N_2 \neq \dots$, ou seja, existe sempre diferença entre os indivíduos da população;
- Não é necessária uma aptidão explícita, pois para ordenar os indivíduos apenas a habilidade de comparação dos mesmos é suficiente;

Como desvantagens destacam-se:

- Esforço computacional para ordenamentos constantes;
- Díficil análise teórica de convergência.

4.6.2.3. Seleção por Torneio

Este é um dos modelos mais simples para implementação computacional e apresenta bons resultados. A idéia é promover um torneio entre um grupo de N ($N > 2$) indivíduos aleatoriamente tomados da população. Assim, o indivíduo com o maior valor de aptidão no grupo é selecionado, enquanto que os demais são descartados.

Dentre suas vantagens citam-se:

- Não acarreta convergência prematura;
- Combate à estagnação;
- Nenhum esforço computacional extra é necessário, tal como ordenamentos;
- Aptidão explícita é desnecessária;
- Inspiração biológica do processo.

4.7. Parâmetros de Influência e Configurações

Os AGs são, como a própria condição natural, sensíveis aos critérios populacionais e probabilísticos de evolução. Desta forma, configurar corretamente os parâmetros de um AG constitui uma tarefa de essencial importância à boa convergência do algoritmo.

Evidentemente, cada problema de otimização pode responder de forma diferenciada ao mesmo conjunto de critérios. Testes preliminares são necessários para estabelecer o conjunto de configurações mais adequado a cada caso.

Mesmo assim, alguns autores apresentam suas experiências e dão diretrizes gerais de configuração [15], [18].

4.7.1. Tamanho da População

O tamanho da população indica o número de cromossomos em cada população, que é uma constante durante a evolução.

Uma grande população apresentará uma maior diversidade de soluções, contudo, computacionalmente serão dispendiosas tantas avaliações de funções de aptidão. Além disso, uma população razoavelmente grande geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais. Por outro lado, com uma população pequena o desempenho pode cair, pois deste modo ter-se-á uma pequena cobertura do espaço de busca do problema.

Assim, a principal influência deste parâmetro está relacionada com o desempenho global e a eficiência dos AGs.

No entanto, para se trabalhar com grandes populações são necessários maiores recursos computacionais ou mais tempo de execução.

Uma idéia interessante é relacionar o tamanho da população com o tamanho do cromossomo, ou seja, quanto maior for o cromossomo maior deverá ser o tamanho da população para uma diversidade razoável.

Pesquisadores sugerem, a título de grandeza, tamanhos de população entre 20 e 100 cromossomos, podendo atingir valores bem mais altos.

4.7.2. Probabilidade de Cruzamento

Este parâmetro indica a probabilidade de ocorrência de cruzamento entre indivíduos selecionados na população. Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Em contrapartida, se ela for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente da população, ocorrendo perda de estruturas de alta aptidão. Valores baixos podem, ainda, tornar a convergência do algoritmo muito lenta.

Geralmente, a taxa de cruzamento varia entre 0,5 e 0,95. Estes números indicam uma ordem de grandeza, já que existem inúmeros tipos possíveis de cruzamento além dos convencionais, os quais são limitados apenas pela capacidade criativa de seus inventores.

4.7.3. Probabilidade de Mutação

A probabilidade de mutação indica a taxa de ocorrência da mutação de cromossomos nas populações ao longo da evolução.

A mutação é empregada para fornecer novas informações dentro das populações, prevenindo que as mesmas se tornem saturadas com cromossomos similares. Além disso, visa aumentar a diversidade populacional e possibilita uma maior varredura do espaço de busca.

Um cuidado especial deve ser tomado com relação a este parâmetro, pois uma probabilidade muito alta torna a busca essencialmente aleatória, provocando “pulos” que podem impedir a localização do ótimo global.

Alguns pesquisadores recomendam a escolha da taxa de mutação com base no tamanho dos cromossomos e das populações. Para a codificação binária, pesquisadores sugerem que a taxa de mutação deva ser inversamente proporcional ao tamanho da população. Uma sugestão para calcular a taxa ótima de mutação é a expressão [15]:

$$P_m = \frac{1}{N\sqrt{L}} ; \quad (4.5)$$

sendo N o tamanho da população e L o comprimento dos cromossomos.

Como os demais parâmetros, a taxa de mutação ideal dependerá da aplicação a ser resolvida, todavia, a maioria das taxas utilizada varia entre 0,001 e 0,1.

4.8. Vantagens e Desvantagens dos AGs

Os Algoritmos Genéticos podem ser divididos em dois tipos: codificação binária e codificação real. A diferença marcante entre eles é que, para o algoritmo em codificação real, o gen é a própria variável do problema. Evidentemente que isto causa algumas mudanças na aplicação dos operadores genéticos, mas isto será discutido durante a apresentação de tais operadores. No entanto, as vantagens e desvantagens são mantidas, independentemente do tipo do algoritmo.

Segundo diversos autores [15], [18], [21], [43], [74], o método dos Algoritmos Genéticos é classificado como um método poderosos de otimização devido aos seguintes fatores:

- As variáveis de um problema a ser otimizado podem ser codificadas em algum alfabeto, tal como o binário. Neste caso, as operações efetuadas resumem-se a cópias e trocas de *strings*, no caso de codificação binária, ou o próprio valor da variável;
- AGs operam com uma população de possíveis soluções da otimização e não com apenas uma solução. A robustez dos AGs à estagnação em mínimos ou máximos locais deve-se à utilização de uma população cujos indivíduos são distribuídos

aleatoriamente por todo o espaço de pesquisa. Eventualmente alguns indivíduos da população poderão convergir para ótimos locais, porém, isso dificilmente acontecerá com todos ao mesmo tempo;

- AGs utilizam apenas informação das avaliações da função objetivo, não empregando derivadas de qualquer ordem;
- A geração de novos indivíduos nos AGs não é realizada de forma determinística mas através de modificações aleatórias nos indivíduos da população atual.

Por estas razões, o método de Algoritmos Genéticos apresenta uma série de vantagens, tais como:

- Evita mínimos e máximos locais graças ao processo de mutação;
- Não necessitar de funções diferenciáveis e contínuas no intervalo de solução do problema;
- Dadas as características do método, apresenta melhores resultados na otimização de funções multimodais;
- Não requer informações adicionais ou condições de contorno para derivadas.

Sendo assim, AGs constituem-se de uma ferramenta versátil para otimizar uma grande variedade de funções, mantendo uma convergência aceitável e escapando de armadilhas como mínimos/máximos locais.

Por outro lado, as principais desvantagens dos AGs são:

- Facilidade de encontrar valores fora da faixa de interesse, devido aos processos de mutação e *crossover*. Este problema pode ser corrigido com o uso de funções de restrição apropriadas;
- Não se tem a certeza de que o melhor valor de *fitness* foi encontrado quando o número máximo de gerações foi usado como critério de parada. Uma maneira de contornar este problema é usar um número elevado de gerações ou outro critério de parada. Um critério aceitável seria quando a diferença máxima entre cromossomos da mesma população atingisse um valor especificado.

4.9. Estudos de Caso Usando Codificação Binária

Para compreender e verificar as possíveis variações de métodos e aplicações de diferentes funções e operadores genéticos, alguns casos foram estudados e implementados usando o software MatLab[®] versão estudantil. Autores como Matousek [69] têm estudos utilizando esta plataforma.

4.9.1. AG sem Uso da Mutação

Neste primeiro algoritmo, o exemplo tratado por Goldberg, que consiste em maximizar a função quadrática $y(x) = x^2$ no intervalo $x = [0,31]$, sem restrições, foi implementado. O exemplo é bem simples, faz uso apenas de valores inteiros e não utiliza o operador de mutação. Os parâmetros configurados para este exemplo foram:

<i>Probabilidade de Cruzamento : 0,9</i>
<i>Critério de Parada : 10 gerações</i>
<i>Tamanho da População : 6 cromossomos</i>

Os resultados deste algoritmo podem ser visualizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 : Resultado do AG sem Mutação

<i>População Inicial</i> : [29 7 18 15 27 23]		
<i>População Final</i> : [29 29 29 29 29 29]		
Resultado Esperado	Melhor Valor	Erro [%]
31	29	6,45

Pela análise do melhor resultado em comparação aos valores da população final, nota-se que houve uma estagnação do algoritmo. Esta estagnação deve-se ao fato da ausência do operador de mutação, que proveria o algoritmo com um poder de varredura no espaço de solução. Para este caso, vê-se que mesmo aumentando o número de gerações o processo não se altera. Isto porque não existe mais pressão de seleção suficiente e nem valores diferentes entre si para cruzamento. A solução é implementar a mutação.

4.9.2. AG com Uso da Mutação

Neste novo algoritmo, introduziu-se o operador de mutação. Além disso, o critério de parada foi alterado para que o algoritmo encerrasse sua execução apenas quando encontrasse o máximo valor possível para a função objetivo, neste caso $31^2 = 961$. A configuração completa para este algoritmo é vista no quadro abaixo.

<i>Probabilidade de Cruzamento : 0,9</i>
<i>Probabilidade de Cruzamento : 0,0745</i>
<i>Critério de Parada : $y(x) = 961$</i>
<i>Tamanho da População : 6 cromossomos</i>

A probabilidade de mutação foi calculada segundo o critério apresentado na Seção 4.7.3. Os resultados obtidos em três execuções consecutivas do algoritmo estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 : Resultado do AG com Mutação

<i>Execução</i>	<i>População Inicial</i>	<i>Número de Gerações</i>	<i>Resultado Esperado</i>	<i>Melhor Valor</i>	<i>Erro [%]</i>
1	[16 14 24 22 18 1]	13	31	31	0
2	[26 20 8 7 13 18]	7	31	31	0
3	[4 20 22 0 28 20]	21	31	31	0

Com base nestes dados, pode-se observar que a variabilidade do número de gerações necessárias para atingir o critério de parada especificado pode ser alta. Isto, no entanto, é esperado, já que também dependemos da população inicial gerada e de se confirmarem as probabilidades de cruzamento e mutação definidas. Deve-se lembrar, ainda, que são justamente estes pontos que conferem o poder de busca ao método. As figuras que seguem mostram o andamento do algoritmo nas três execuções.

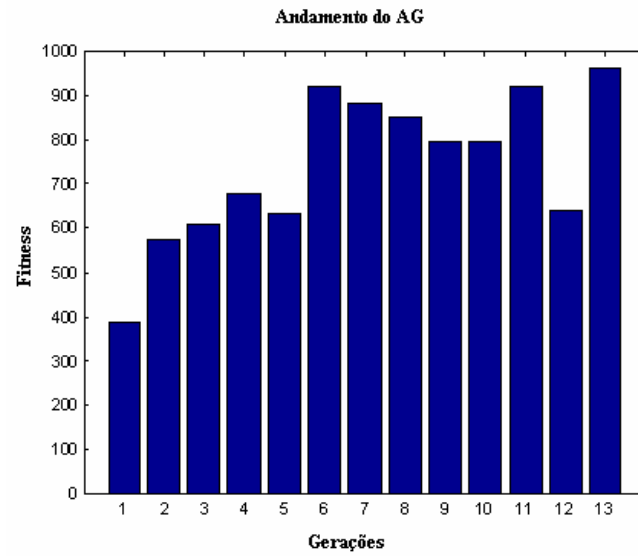


Figura 4.8 : Primeira execução do AG com Mutação.

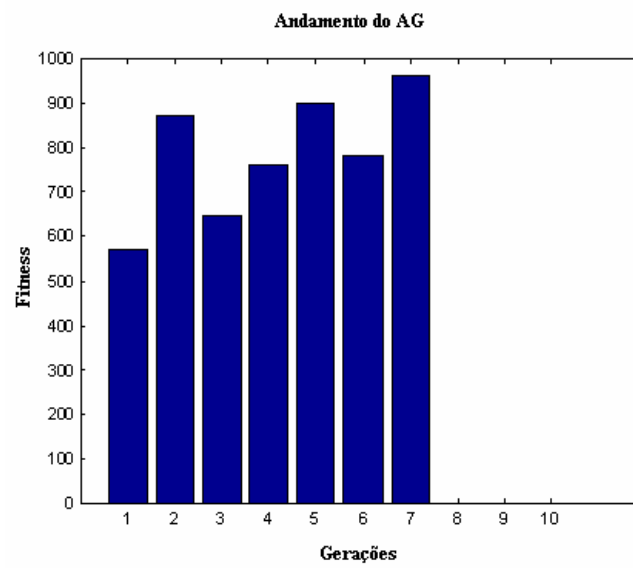


Figura 4.9 : Segunda execução do AG com Mutação.

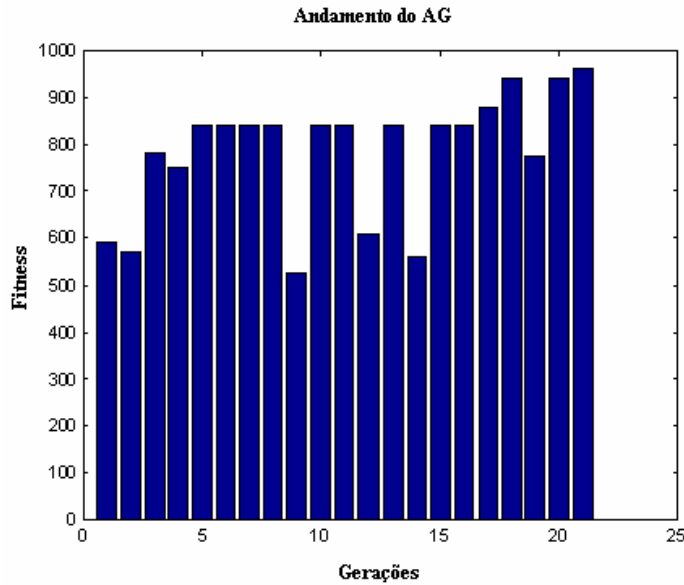


Figura 4.10 : Terceira execução do AG com Mutação.

Por estes gráficos de andamento do algoritmo, pode-se perceber claramente que a mutação é capaz de combater a estagnação, impedindo a convergência prematura para um valor indesejado. Testando, agora, uma função um pouco mais complexa que apresenta múltiplos máximos locais, pode-se avaliar mais precisamente o combate a estagnação.

Para este propósito, usaremos a função $f(x)=x^2 \cdot \text{sen}(x)$ no intervalo $x = [0,50]$, usando um critério de parada de 50 gerações. Os dados usados na configuração do AG podem ser vistos no quadro que segue.

Probabilidade de Cruzamento : 0,9

Probabilidade de Cruzamento : 0,068

Critério de Parada : 50 gerações

Tamanho da População : 6 cromossomos

Os resultados obtidos do algoritmo são os seguintes:

Melhor Valor : 46

Valor esperado : 45,60

Erro = 0,87 %

Aqui surge o primeiro problema do algoritmo em codificação binária. Para implementação dos operadores de cruzamento e mutação, é necessário que se especifique uma precisão para os valores decimais e, em função disto, se crie funções de concatenação e desagrupamento dos binários para posterior aplicação na função objetivo.

Nas figuras que seguem, pode-se ver o comportamento do avanço do algoritmo e o andamento do melhor valor obtido a cada geração.

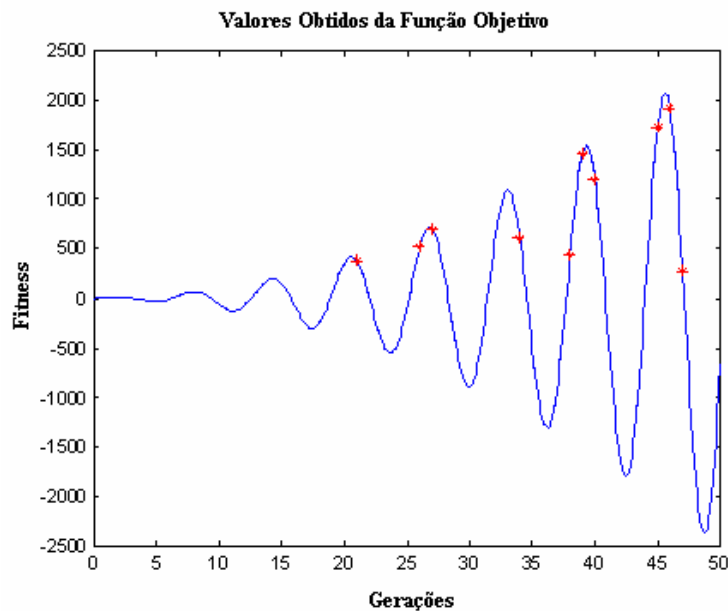


Figura 4.11 : AG maximizando a função $y(x)=x^2 \cdot \sin(x)$

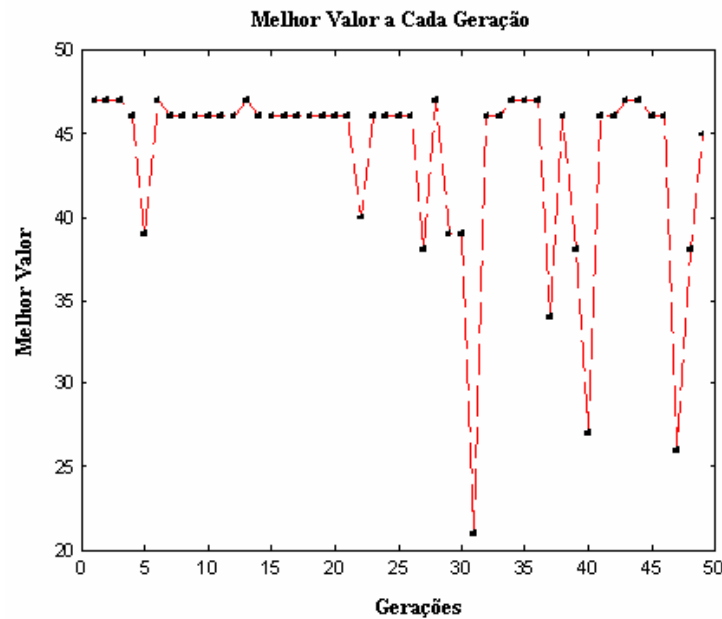


Figura 4.12 : Andamento do AG maximizando a função $y(x)=x^2 \cdot \sin(x)$

Pode-se concluir, pela análise das figuras, que o algoritmo encontrou o melhor valor logo no início da otimização. Após ocorrido isto, a pressão de seleção tornou-se baixa, devido à característica da própria função, ou seja, o seu máximo não é um número inteiro. Ficou impossível, então, localizar o valor máximo com precisão.

4.9.3. AG com Valores Decimais : Um Novo Passo

Para tratar com valores decimais o AG não precisa ser alterado em sua forma global. Apenas é preciso adicionar duas funções, que serão responsáveis por agrupar os valores binários da parte inteira e da parte decimal de cada variável e outra, responsável por desagrupar estes valores após as funções de cruzamento e mutação.

Realizadas estas pequenas modificações usa-se novamente a função $f(x)=x^2 \cdot \sin(x)$ no intervalo $x = [0,50]$ como função objetivo, e os seguintes parâmetros de configuração:

Probabilidade de Cruzamento : 0,6
Probabilidade de Cruzamento : 0,04
Critério de Parada : 100 gerações
Tamanho da População : 6 cromossomos

Como resultado da otimização obteve-se os seguinte valores:

Melhor Valor : 45,47

Valor esperado : 45,60

Erro = 0,29 %

O acompanhamento gráfico da evolução do algoritmo pode ser feito pela figura que segue.

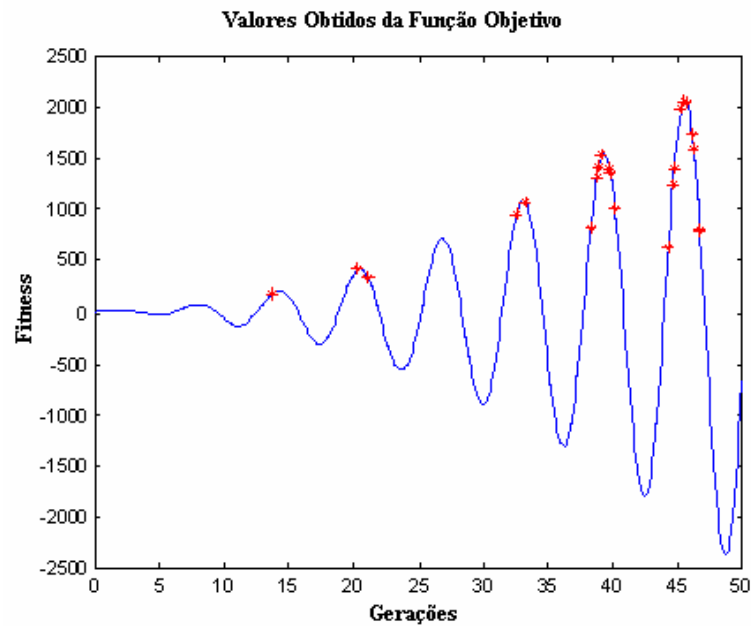


Figura 4.13 : Maximização da função $y(x)=x^2 \cdot \sin(x)$ com valores decimais

Pode-se concluir, pela Figura 4.13, que o AG usando valores decimais pode melhorar a pressão de seleção, visto que reduziu-se a probabilidade de cruzamento para 0,6 em relação ao AG anterior. Na tabela que segue, tem-se os resultados encontrados para algumas funções maximizadas com este AG.

Tabela 4.3 : Resultado do AG com Outras Funções

<i>Função</i>	<i>Resultado Esperado</i>	<i>Melhor Valor</i>	<i>Erro [%]</i>
$f(x)=x^2 \cdot \text{sen}(x)$	45,60	45,47	0,29
$f(x)=\text{cos}(x+1)$ $x = [0,10]$	5,25	5,28	0,56
$f(x)=x^2$	50	49,94	0,12

Agora é possível agrupar os resultados dos diferentes métodos testados para comparar o nível de erro de cada AG e seus resultados globais. Isto é feito na tabela que segue.

Tabela 4.4 : Resumo dos Estudos de Caso

<i>Tipo de AG</i>	<i>Resultado do Processo</i>	<i>Erro Médio [%]</i>
Sem mutação, números inteiros	estagnação	6,45
Com mutação, números inteiros	convergência	0
Com mutação, números decimais	convergência	0,37

Considerando as aplicações de engenharia, uma precisão é sempre desejada. Geralmente duas casas decimais é precisão suficiente e este algoritmo simples mostra um erro aceitável, dada a flexibilidade do método.

4.10. Estudos de Caso Usando Codificação Real

4.10.1. Aplicativo em Delphi®

Para estudar o comportamento do Algoritmo Genético usando codificação real, um aplicativo baseado na linguagem Delphi® foi criado.

O aplicativo permite configurar todas as variáveis e operadores relevantes ao processo de otimização, além de definir a faixa de otimização em que cada variável deve ser otimizada.

Na figura que segue, vê-se a tela principal do aplicativo.

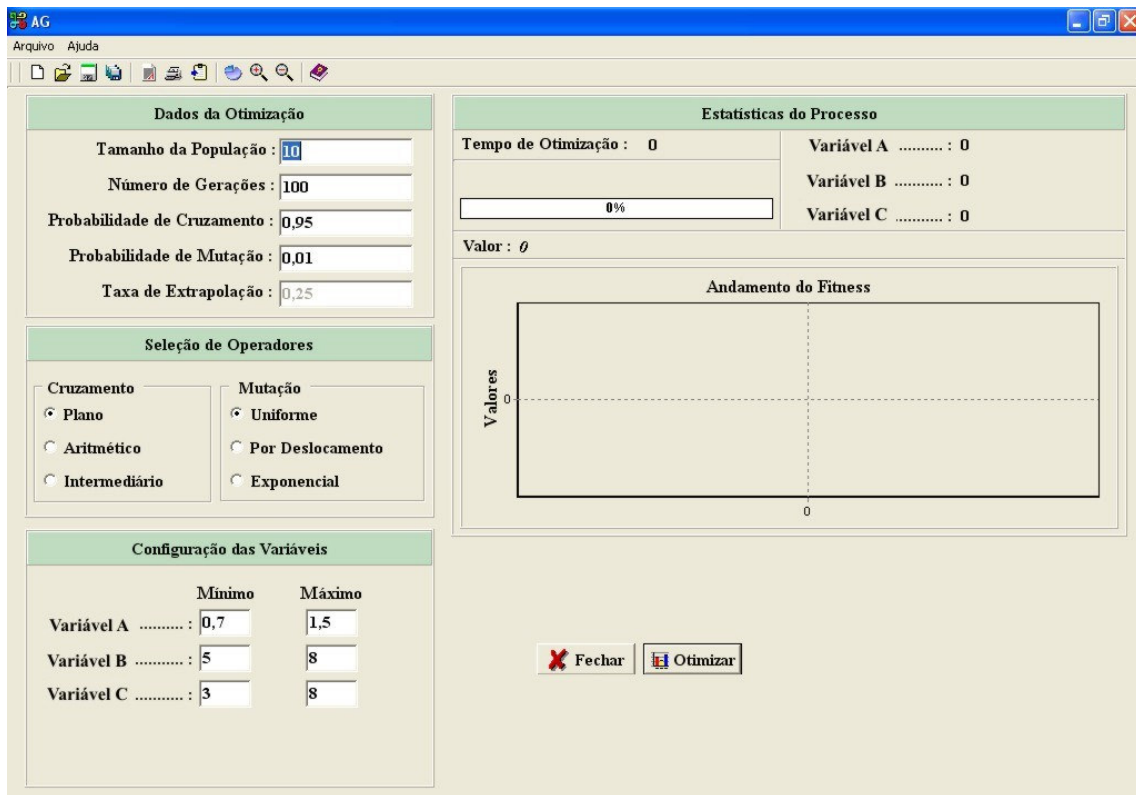


Figura 4.14 : Tela principal do aplicativo em Delphi®.

Além da configuração dos parâmetros o aplicativo permite alterar propriedades do gráfico, exportar resultados e visualizar a otimização de qualquer uma das variáveis individualmente ou simultaneamente.

4.10.2. Resultados Iniciais

Para executar uma avaliação preliminar da convergência do algoritmo utilizou-se uma função objetivo representada pela soma de todas as variáveis envolvidas na otimização, ou seja:

$$F(a,b,c) = a + b + c$$

onde a, b e c são os componentes químicos da formulação da pastilha.

Os operadores genéticos implementados no aplicativo foram aqueles descritos na Seção 4.4 deste capítulo.

O objetivo central é avaliar a precisão do algoritmo usando todas as combinações de operadores e verificar o tempo de otimização, mantendo fixo o número de gerações para todos os processos.

Se o algoritmo apresentar boa convergência, terá que apresentar como resultado final os valores inferiores definidos nas faixas de otimização.

Para facilitar a apresentação dos resultados, as configurações de parâmetros utilizadas no aplicativo seguem a seguinte notação:

$$[T, N, Pc, Pm, t]$$

onde:

T = Tamanho da população;

N = Número de gerações;

P_c = Probabilidade de cruzamento;

P_m = Probabilidade de mutação;

t = Taxa de extrapolação (*na*, se não aplicável).

E ainda, as configurações de operadores seguindo a notação:

$[C, M]$,

onde C é o operador de cruzamento, podendo ser:

CrP = Cruzamento plano;

CrA = Cruzamento aritmético;

CrI = Cruzamento Intermediário;

e M é o operador de mutação, que pode ser:

MuU = Mutação uniforme;

MuD = Mutação por deslocamento;

MeE = Mutação exponencial.

Na tabela que segue, vê-se os resultados dos processamentos para as diversas combinações e os erros em relação ao valor esperado. Embora a precisão de cálculo tenha sido a máxima precisão disponível na máquina, serão apresentados dados com quatro casas

decimais, já que esta precisão está muito além da praticável em termos de precisão de composição em larga escala.

Estes resultados foram registrados tomando-se o melhor dos resultados em quatro tentativas de otimização.

Tabela 4.5 : Resultados do aplicativo em Delphi®

Operadores Utilizados	Configurações de Parâmetros	Soma Encontrada	Soma Esperada	Erro [%]
[CrP, MuU]	[10; 1000; 0,95; 0,01; na]	8,7242	8,7	0,28
[CrP, MuD]	[10; 1000; 0,95; 1; na]	9,9179	8,7	12,28
[CrP, MuE]	[10; 1000; 0,95; 0,01; na]	9,1002	8,7	4,39
[CrA, MuU]	[10; 1000; 0,95; 0,01; na]	8,7789	8,7	0,90
[CrA, MuD]	[10; 1000; 0,95; 1; na]	10,2557	8,7	15,17
[CrA, MuE]	[10; 1000; 0,95; 0,01; na]	8,8853	8,7	2,08
[CrI, MuU]	[10; 1000; 0,95; 0,01; 0,25]	8,7000	8,7	0,00
[CrI, MuD]	[10; 1000; 0,95; 1; 0,25]	9,3233	8,7	5,61
[CrI, MuE]	[10; 1000; 0,95; 0,01; 0,25]	8,7235	8,7	0,27

Mesmo que alguns valores de erro tenham se mostrado altos, é difícil afirmar que estes operadores não são eficientes, porque se podem variar ainda os valores de probabilidades, o número de gerações e o tamanho da população. Tomando agora os piores resultados da Tabela 4.5, vamos alterar outros parâmetros para verificar seus efeitos.

Tabela 4.6 : Novos Resultados do aplicativo em Delphi®

Operadores Utilizados	Configurações de Parâmetros	Soma Encontrada	Soma Esperada	Erro [%]
[CrP, MuD]	[1000; 1000; 0,95; 1; na]	8,8767	8,7	1,99
[CrA, MuD]	[10; 1000; 0,95; 1; na]	9,7609	8,7	10,86

Pela comparação das Tabelas 4.5 e 4.6 observa-se que alterações nos parâmetros podem levar os operadores a convergirem para o resultado esperado. Neste caso, não é prudente fazer inferências sobre a eficiência de cada operador.

Variações devem ser implementadas em cada caso para localizar o conjunto de parâmetros mais adequado ao problema que está sendo otimizado.

4.11. Conclusões Preliminares

Por tudo o que foi discutido até este ponto, percebe-se claramente que o método dos Algoritmos Genéticos é robusto, tendo em vista a capacidade de adaptação ao problema. Mais ainda, é aplicável ao problema de otimização de materiais de atrito.

A codificação real será adotada como base para o desenvolvimento do aplicativo final, por se tratar de método mais eficiente no que diz respeito ao tempo de processamento e a precisão dos resultados.

Operadores específicos podem ser necessários, à medida em que a complexidade da função objetivo for aumentando. A decisão de implementar um operador diferenciado se dará a partir de testes experimentais que comprovem ou não a convergência dos resultados.

Capítulo V

Estudos de Influência da Composição Sobre os Parâmetros

Este capítulo resume os estudos experimentais preliminares da influência da composição sobre os parâmetros de controle que serão utilizados para formular a função objetivo. Descrevem-se os parâmetros e delimitam-se os intervalos de controle das variáveis em estudo. Os resultados estatísticos para o projeto fatorial 2^k são apresentados.

5.1. Projeto Fatorial 2^k	99
5.2. Testes Experimentais Envolvidos	100
5.3. Conclusões Sobre O Projeto Fatorial	121

5.1. Projeto Fatorial 2^k

Para avaliar o comportamento das variáveis que irão compor a função objetivo, um projeto fatorial 2^k foi implementado. A intenção deste estudo é obter informações preliminares sobre o comportamento das propriedades, aqui chamadas de fatores, que se deseja otimizar.

Este projeto considera dois níveis, alto e baixo, e executará a monitoração de três fatores. Evidentemente que as pastilhas de freio testadas têm mais de três componentes, mas estes têm percentual fixo ou são considerados elementos inertes.

Os níveis de cada fator, A , B e C , foram considerados em sua condição alta e baixa. Os valores numéricos atribuídos aos níveis ficam dentro de um limite aceitável e factível no que diz respeito ao processo produtivo como um todo. Segundo a classificação de componentes de materiais de atrito apresentada no Capítulo 2, os elementos são A : Fibra de Celulose , B : Resina e C : Pré-Mistura. A escolha destes elementos está relacionada com a prática descrita pelos engenheiros químicos da empresa e, também, por suas relações diretas com o ruído, desgaste e coeficiente de atrito. Os componentes com percentual em massa que foram mantidos fixos em todas as formulações são os seguintes: Lã de Aço, Óxidos, Grafites, Coque e Sulfetos.

As variáveis A , B e C são independentes, uma vez que podem assumir qualquer um dos valores contidos na faixa proposta de forma isolada. A complementação do percentual é feita com elementos inertes e efetivamente não relevantes nas propriedades medidas.

Para avaliação de influências, foram consideradas as respostas abaixo:

- Nível de Pressão Sonora Global [dB(A)];
- Coeficiente de Atrito [adimensional];

- Desgaste [mm];
- Amortecimento Médio [adimensional];
- Rigidez Estrutural a Frio [N/m];
- Rigidez Estrutural a Quente [N/m];
- Dureza Superficial [Gogan].

O projeto terá duas replicações e uma análise de variância será aplicada para avaliar os resultados obtidos. Será considerado um nível de significância de 5%, ou seja, uma confiança de 95%. Uma análise por blocos foi implementada, porque cada um dos blocos experimentais foi conduzido em diferentes momentos ao longo do desenvolvimento. Desta forma pode-se detectar a variabilidade experimental entre as replicações.

Todos os testes experimentais, bem como a confecção das formulações, serão conduzidos por pessoal técnico do quadro funcional da empresa Fras-le.

Para execução e avaliação do projeto fatorial 2^3 , o software comercial *Design Expert*[®] versão 5.0 será utilizado. As combinações propostas para avaliação podem ser encontradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 : Combinações do projeto 2^3 .

<i>Pastilha</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Fator C</i>	<i>Combinação</i>
1	-	-	-	1
2	+	-	-	a
3	-	+	-	b
4	+	+	-	ab
5	-	-	+	c
6	+	-	+	ac
7	-	+	+	bc
8	+	+	+	abc

Depois de realizadas as combinações, o software sugere uma ordem de execução aleatória para que sejam evitados vícios repetitivos na montagem e execução dos ensaios.

5.2. Testes Experimentais Envolvidos

Para proporcionar os resultados que alimentaram o software *Design Expert*[®] diversos testes experimentais foram desenvolvidos. A metodologia e os resultados obtidos são descritos nas seções que seguem. Os envolvimento pessoais nos testes experimentais limitaram-se a orientação e à análise dos dados, evitando-se qualquer interferência nos procedimentos e na execução final.

5.2.1. Testes em Dinamômetro

Os testes executados em dinamômetros inerciais para freios têm as seguintes finalidades:

- Avaliar o nível de ruído global – Procedimento AK-Master; [113]
- Avaliar o desgaste e o coeficiente de atrito – Método MF80930 [114].

Para executar os referidos testes foi implementado um sistema de freio, na forma de bancada, conforme a Figura 5.1. A correlação entre a bancada e o veículo foi amplamente estudada e detalhada [44]. Estes estudos mostram que as mesmas frequências de ruído de frenagem encontradas no veículo aparecem no sistema em bancada. Desta forma, esta correlação é bastante satisfatória, o que permite afirmar que a bancada é eficiente para o estudo e a medição do ruído de freios.

O procedimento de teste Ak-Master utiliza-se de um dinamômetro para freios equipado com uma cabine para prover isolamento acústico e controle de parâmetros ambientais e com um analisador de sinais Larson-Davis modelo 3200. Ao analisador está conectado um

microfone capacitivo de 1/2", incidência aleatória. O procedimento AK-Master dura cerca de 36 horas, nas quais são executadas 1400 frenagens. Estas frenagens varrem pressões entre 5 bar e 30 bar, com temperaturas variando entre 50 °C e 300 °C. O procedimento realiza, ainda, frenagens de parada, com desaceleração de 30 km/h para 0 km/h. A repetitividade dos ensaios é garantida devido ao alto número de frenagens. O ruído originado no processo é registrado desde o início até o final de cada aplicação de frenagem, tempo este em que o analisador integra os sinais registrados.

O teste de desgaste e coeficiente de atrito dura 18h. Tem-se 150 freadas, com temperaturas que chegam a 600°C e 100 bar de pressão de frenagem. Neste teste, o desgaste é determinado medindo-se a espessura das pastilhas e disco de freio em seu estado inicial e final. Já o coeficiente de atrito é registrado em gráficos, durante todo o processo de teste.

Os resultados obtidos para o ruído, nas duas replicações, podem ser vistos na tabela abaixo. As contribuições percentuais indicadas são calculadas com base no fator, ou iteração, dividido pela soma dos quadrados total (SS_T) menos o efeito do erro e menos o efeito do bloco.

Tabela 5.2 : Resultados dos testes de ruído.

<i>Pastilha</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Fator C</i>	<i>Combinação</i>	<i>Ruído [dB(A)]</i>			<i>Contribuição [%]</i>
					<i>Replicações</i>			
					<i>I</i>	<i>II</i>	<i>p</i>	
1	-	-	-	<i>l</i>	105,11	110,81	-	-
2	+	-	-	<i>a</i>	98,81	104,10	0,1418	3,03
3	-	+	-	<i>b</i>	124,74	122,84	<0,0001	81,76
4	+	+	-	<i>ab</i>	122,74	119,33	0,7764	0,096
5	-	-	+	<i>c</i>	81,04	103,28	0,0277	8,48
6	+	-	+	<i>ac</i>	84,67	90,29	0,9688	0,001
7	-	+	+	<i>bc</i>	124,65	123,24	0,0458	6,49
8	+	+	+	<i>abc</i>	117,66	120,14	0,7303	0,14

O critério para aceitação do fator ou iteração como significativo foi, em primeiro lugar, o valor de p estar abaixo de 5% e, depois, seu grau de contribuição e a relação com a experiência prática de influência de cada componente.

Baseando-se nos resultados da Tabela 5.2, verifica-se que os resultados apontam o fator B como o mais influente sobre o quesito ruído, seguido do parâmetro C , muito embora este último seja pouco significativo frente ao outro.

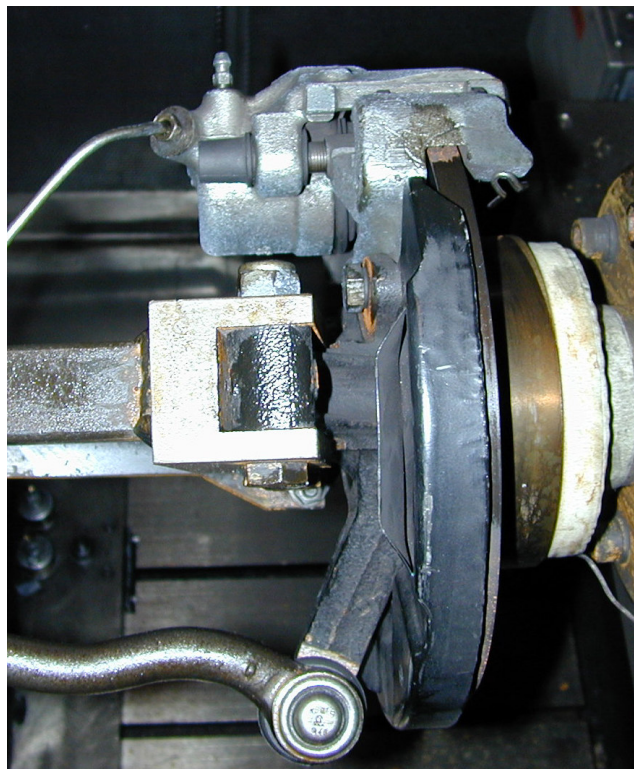


Figura 5.1 : Sistema de freio utilizado para os testes de dinamômetro.

Na Figura 5.2 tem-se a curva de probabilidade os resíduos referentes aos dados de ruído. Pela observação da Figura 5.2, observa-se que os resíduos apresentam-se em torno de uma reta, o que permite concluir que os dados estão obedecendo satisfatoriamente ao comportamento de uma distribuição normal.

Na Figura 5.3, podemos ver o efeito do fator B sobre o ruído. Vê-se claramente que, quando este fator assume seu valor máximo na mistura, tem-se um aumento no nível de ruído.

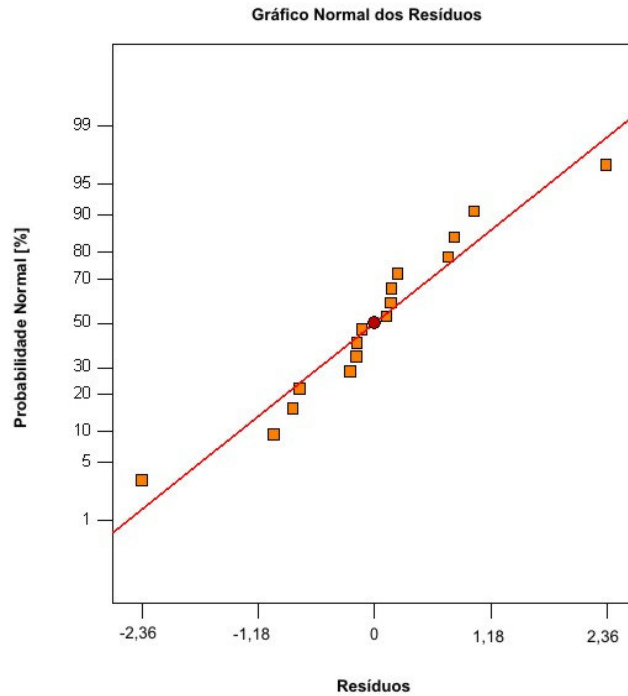


Figura 5.2 : Gráfico da distribuição normal dos resíduos do teste de ruído.

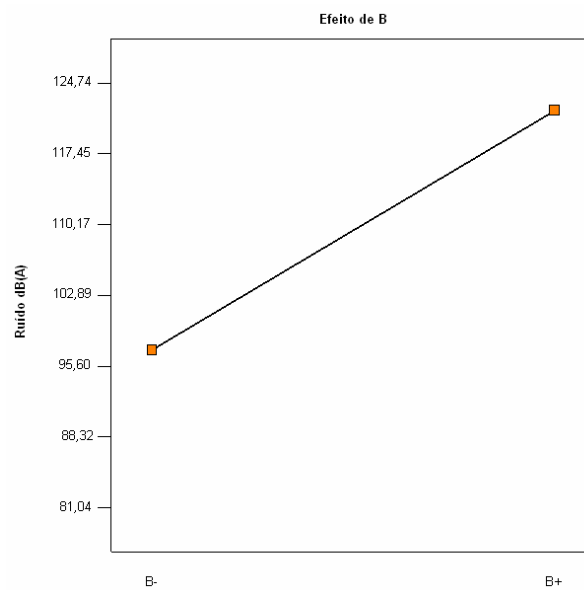


Figura 5.3 : Efeitos de B sobre o ruído.

A curva representativa do comportamento do ruído com a variação dos parâmetros pode ser vista na Figura 5.4.

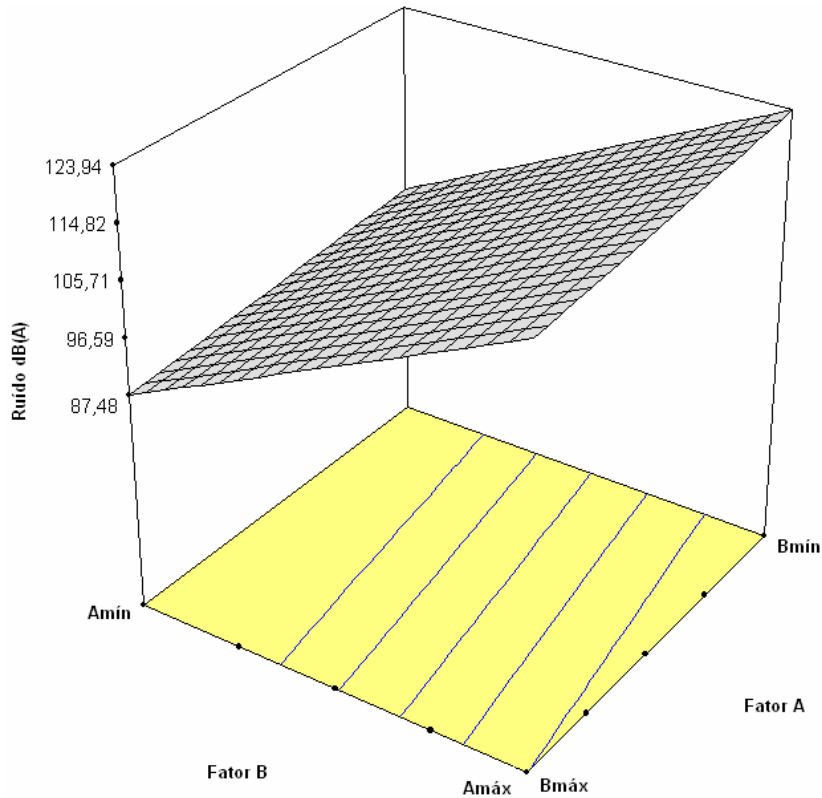


Figura 5.4 : Comportamento do ruído.

De forma numérica, o comportamento do ruído resume-se à equação resultante da análise estatística. Assim, pode-se avaliar o ruído através da equação:

$$NPS \text{ Global } (B) = 109,59 + 12,33 B \quad (5.1)$$

Ainda utilizando dinamômetro inercial para freios, testes de coeficiente de atrito e desgaste foram executados. Os resultados podem ser vistos nas tabelas que seguem.

Tabela 5.3 : Resultados dos testes de coeficiente de atrito.

<i>Pastilha</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Fator C</i>	<i>Combinação</i>	<i>Coefficiente de Atrito</i>			<i>Contribuição [%]</i>
					<i>Replicações</i>			
					<i>I</i>	<i>II</i>	<i>p</i>	
<i>1</i>	-	-	-	<i>1</i>	0,450	0,450	-	-
<i>2</i>	+	-	-	<i>a</i>	0,435	0,420	0,6182	0,45
<i>3</i>	-	+	-	<i>b</i>	0,415	0,395	0,0012	45,25
<i>4</i>	+	+	-	<i>ab</i>	0,425	0,410	0,3317	1,81
<i>5</i>	-	-	+	<i>c</i>	0,420	0,390	0,0022	36,65
<i>6</i>	+	-	+	<i>ac</i>	0,420	0,425	0,1618	4,07
<i>7</i>	-	+	+	<i>bc</i>	0,385	0,395	0,6182	0,45
<i>8</i>	+	+	+	<i>abc</i>	0,395	0,390	0,0351	11,31

Tabela 5.4 : Resultados dos testes de desgaste.

<i>Pastilha</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Fator C</i>	<i>Combinação</i>	<i>Desgaste [mm]</i>			<i>Contribuição [%]</i>
					<i>Replicações</i>			
					<i>I</i>	<i>II</i>	<i>p</i>	
<i>1</i>	-	-	-	<i>1</i>	0,27	0,27	-	-
<i>2</i>	+	-	-	<i>a</i>	0,34	0,44	0,0706	32,26
<i>3</i>	-	+	-	<i>b</i>	0,34	0,43	0,8583	0,24
<i>4</i>	+	+	-	<i>ab</i>	0,39	0,46	0,9288	0,061
<i>5</i>	-	-	+	<i>c</i>	0,29	0,53	0,7220	0,98
<i>6</i>	+	-	+	<i>ac</i>	0,31	0,51	0,4320	4,94
<i>7</i>	-	+	+	<i>bc</i>	0,27	0,35	0,0358	47,80
<i>8</i>	+	+	+	<i>abc</i>	0,31	0,45	0,2073	13,72

A distribuição dos resíduos para o atrito médio pode ser vista na Figura 5.5, que segue.

A interpretação dos efeitos dos fatores pode ser vista nas Figuras 5.6 e 5.7. Já a condição de atrito mais elevado ocorre quando se tem a combinação conforme visto na Figura 5.5. Este comportamento pode ser visto na Figura 5.8.

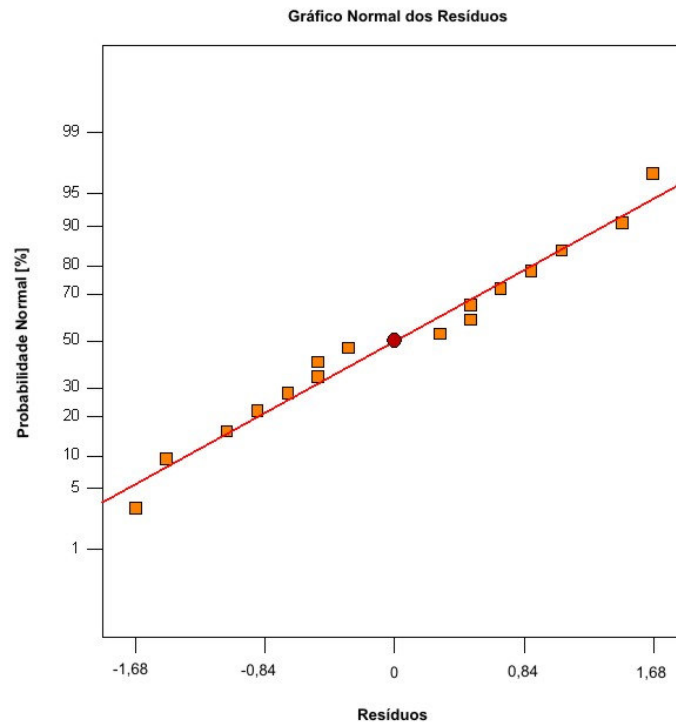


Figura 5.5 : Gráfico normal dos resíduos para o atrito.

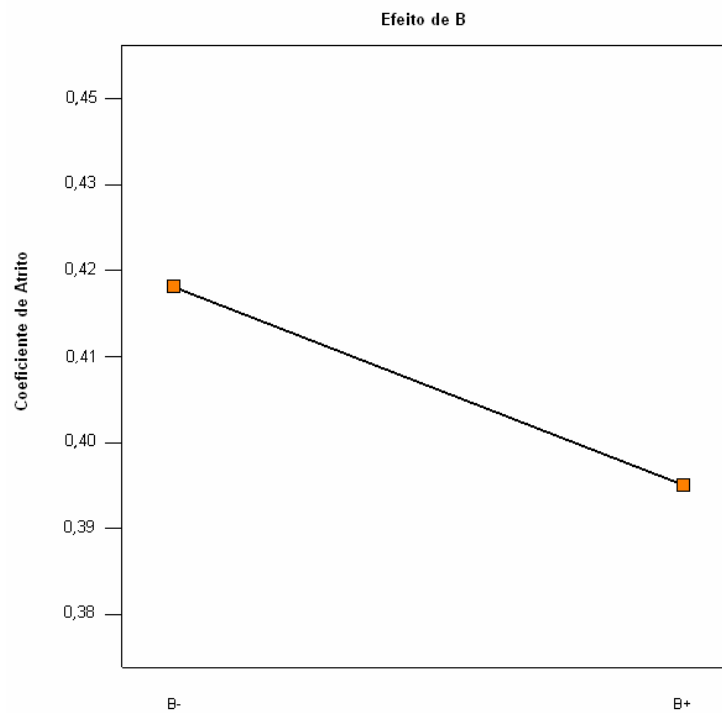


Figura 5.6 : Efeito do fator B sobre o atrito.

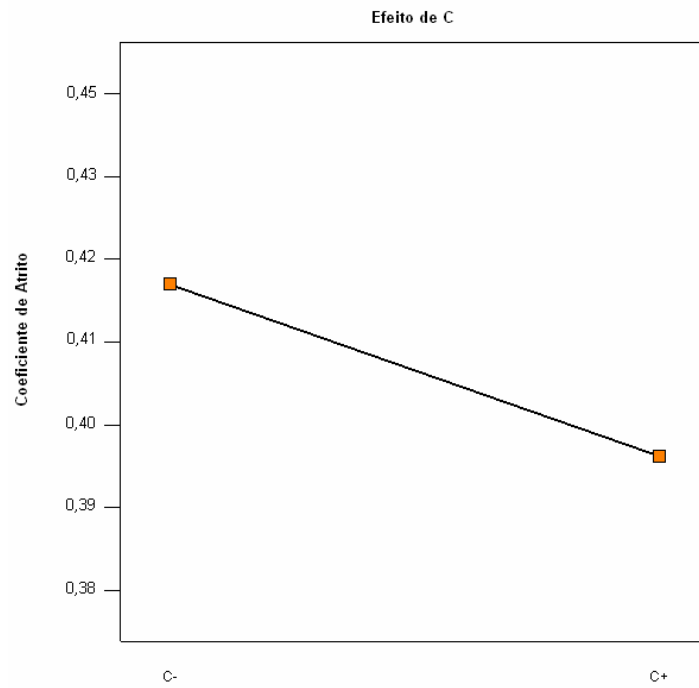


Figura 5.7 : Efeito do fator C sobre o atrito.

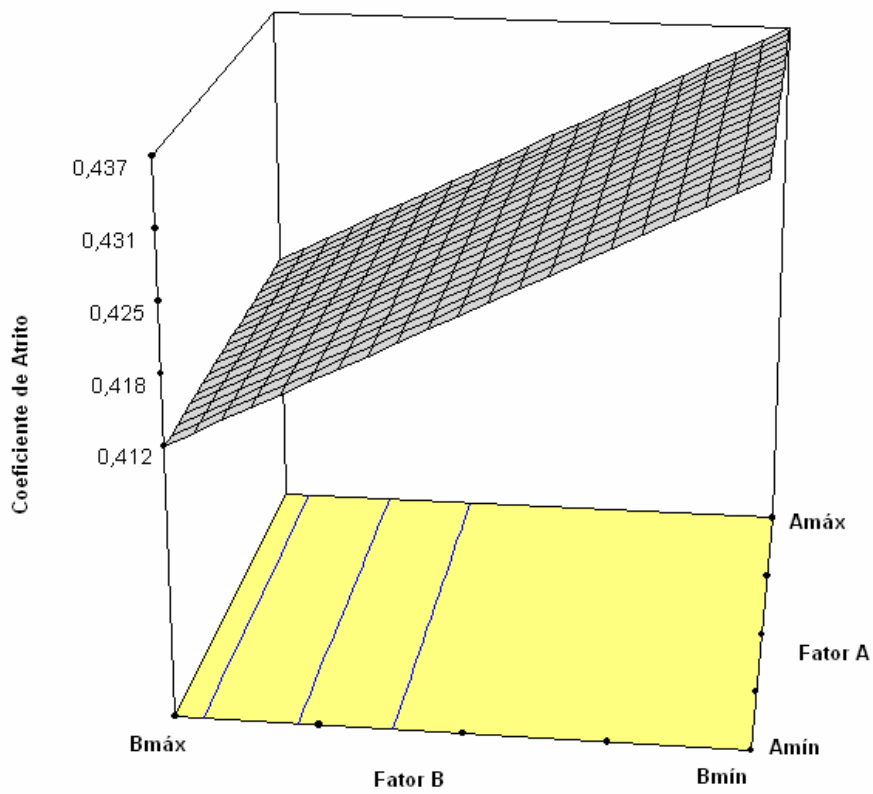


Figura 5.8 : Comportamento do coeficiente de atrito.

A equação que representa o comportamento da Figura 5.8 é dada por:

$$\text{Atrito}(A,B,C) = 0,41 - 0,013 B - 0,011 C - 0,006 ABC \quad (5.2)$$

Para o desgaste, o gráfico normal dos resíduos é dado pela Figura 5.9. A influência sobre o desgaste se dá através do efeito A e da interação BC.

A forma gráfica destas influências podem ser vistas nas Figuras 5.10 e 5.11. Uma das curvas de comportamento do desgaste com a variação dos fatores pode ser vista na Figura 5.12. A equação que representa as maiores influências sobre a curva da Figura 5.12 é dada por:

$$\text{Desgaste}(A,B,C) = 0,37 - 0,029 A + 0,035 BC \quad (5.3)$$

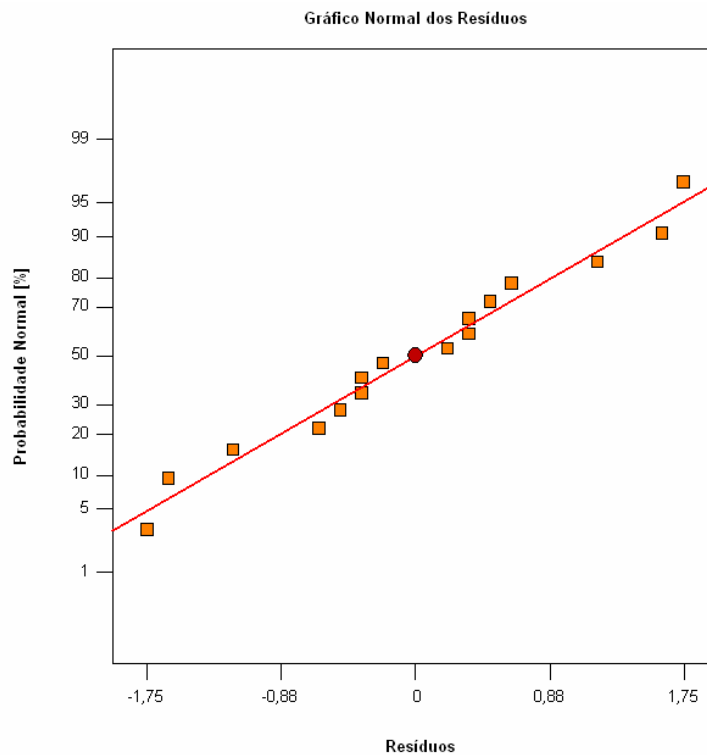


Figura 5.9 : Gráfico normal dos resíduos para o desgaste.

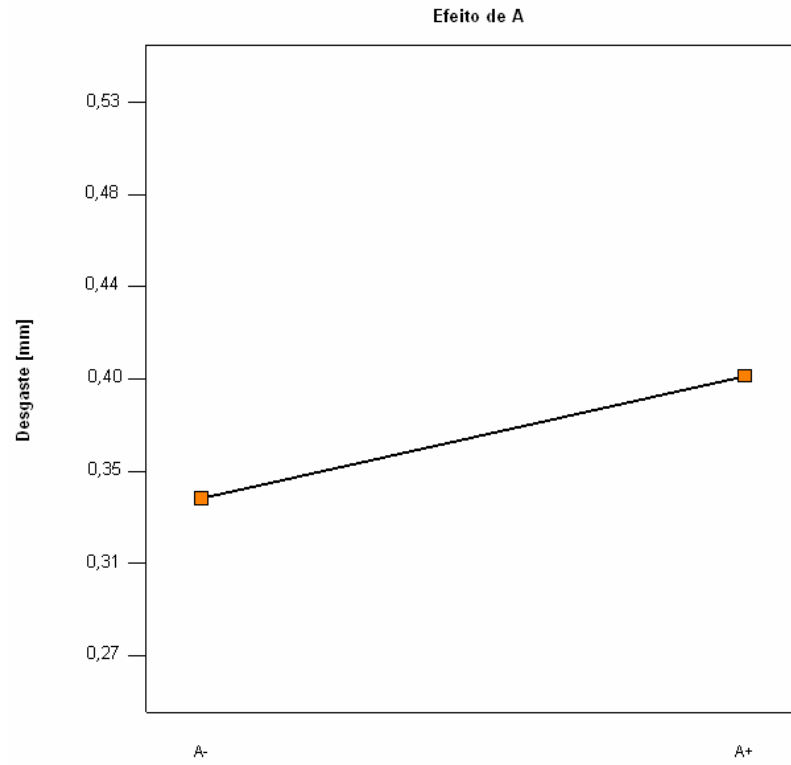


Figura 5.10 : Efeito do fator A sobre o desgaste.

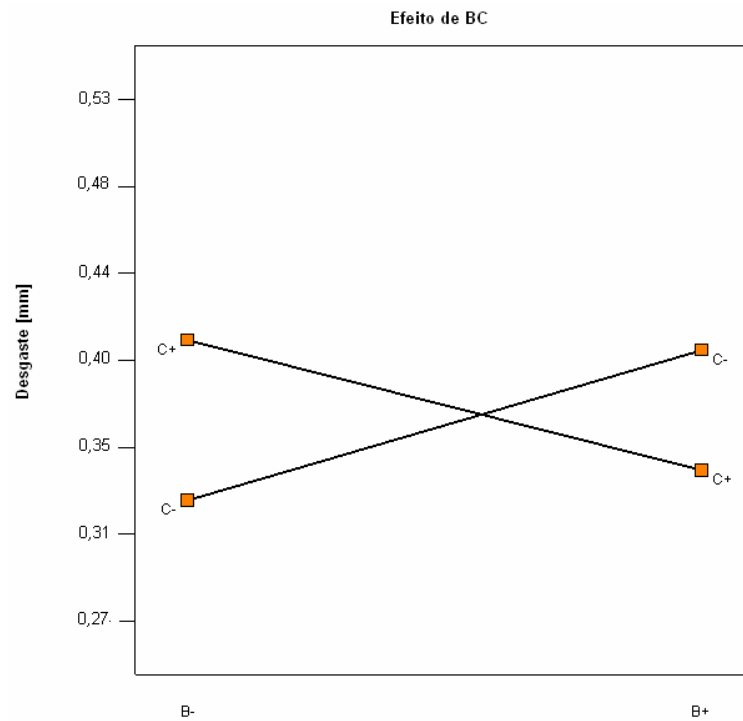


Figura 5.11: Efeito da interação BC sobre o desgaste.

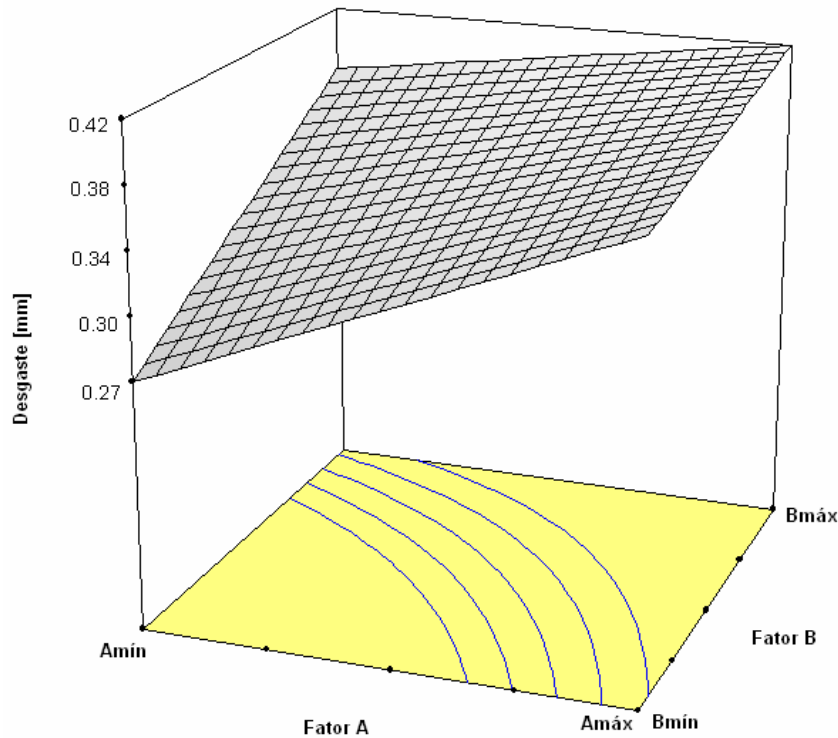


Figura 5.12 : Comportamento do desgaste.

5.2.2. Avaliação de Rigidez Estrutural

Para avaliar os valores de rigidez estrutural, testes de compressibilidade a quente e a frio foram executados. O procedimento consiste em elevar a pressão até 60 bar numa temperatura equivalente a 600°C, para o caso de rigidez a quente, e temperaturas abaixo dos 40°C para rigidez a frio. Para estes ensaios usa-se o procedimento ATE N543.27.

Para executar este teste, uma peça que obedece ao formato do cilindro de acionamento do freio é montada na máquina da Figura 2.23. A placa de contato com o material de fricção é aquecida até a temperatura de teste e a pressão é aplicada.

Mediante as curvas de pressão versus deslocamento, fornecidas pelo equipamento, é possível extrair os valores de rigidez, uma vez que a força pode ser obtida mediante cálculo.

Os resultados obtidos para rigidez a frio podem ser verificados na Tabela 5.5.

Para este caso, a variável influente foi detectada como sendo o fator *B*, exclusivamente.

Na Figura 5.13, pode-se ver a probabilidade normal dos resíduos do teste de rigidez a frio.

Tabela 5.5 : Resultados dos testes de rigidez a frio.

<i>Pastilha</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Fator C</i>	<i>Combinação</i>	<i>Rigidez a Frio [N/m]</i>		<i>p</i>	<i>Contribuição [%]</i>
					<i>Replicações</i>			
					<i>I</i>	<i>II</i>		
1	-	-	-	1	$6,57 \times 10^9$	$7,08 \times 10^9$	-	-
2	+	-	-	a	$7,67 \times 10^9$	$5,11 \times 10^9$	0,0394	5,44
3	-	+	-	b	$7,08 \times 10^9$	$8,85 \times 10^9$	<0,0001	70,66
4	+	+	-	ab	$1,15 \times 10^{10}$	$1,15 \times 10^{10}$	0,0138	9,08
5	-	-	+	c	$6,13 \times 10^9$	$6,57 \times 10^9$	0,0416	5,28
6	+	-	+	ac	$5,41 \times 10^9$	$6,57 \times 10^9$	0,7345	0,11
7	-	+	+	bc	$1,15 \times 10^{10}$	$1,15 \times 10^{10}$	0,0131	9,29
8	+	+	+	abc	$1,53 \times 10^{10}$	$1,31 \times 10^{10}$	0,6853	0,15

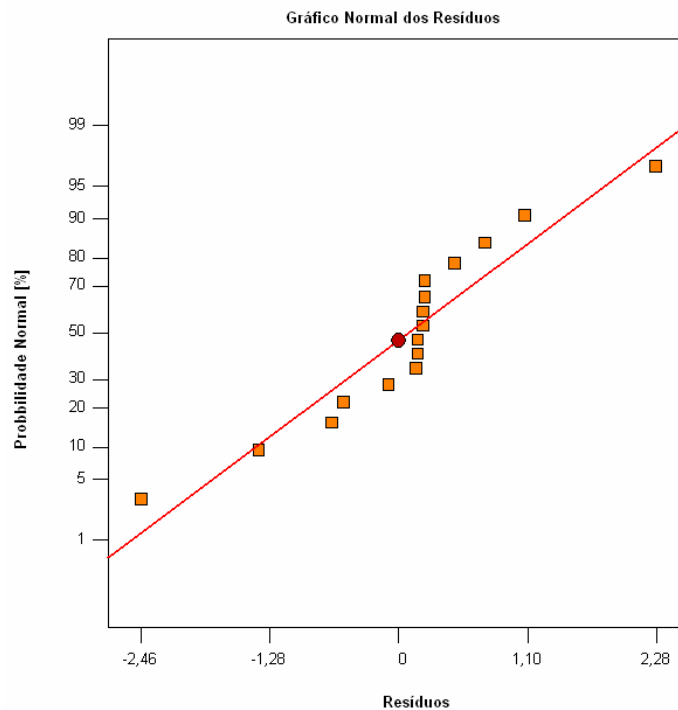


Figura 5.13 : Resíduos do teste de rigidez a frio.

O efeito do fator B sobre a rigidez a frio pode ser apreciado na Figura 5.14.

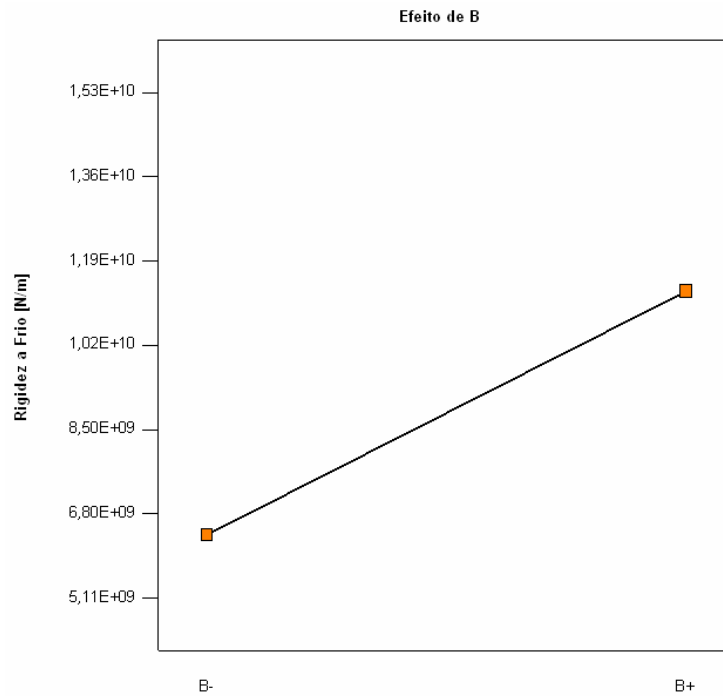


Figura 5.14: Efeito de B sobre a rigidez a frio.

Vê-se claramente que o aumento do fator B acarreta um aumento do valor da rigidez a frio. O software fornece a equação para este parâmetro como:

$$\text{Rigidez a Frio}(B) = 8.840 \times 10^9 + 2.451 \times 10^9 B \quad (5.4)$$

Para avaliação da rigidez a quente, procedeu-se conforme o teste já mencionado. Os resultados para as duas replicações estão apresentados na Tabela 5.6.

O gráfico normal de resíduos para os dados da Tabela 5.6 pode ser visto na Figura 5.15. Vê-se que esta distribuição de erro é satisfatória.

Tabela 5.6 : Resultados dos testes de rigidez a quente.

Pastilha	Fator A	Fator B	Fator C	Combinação	Rigidez a Quente [N/m]			Contribuição [%]
					Replicações			
					I	II	p	
1	-	-	-	I	6,13 x10 ⁹	9,20 x10 ⁹	-	-
2	+	-	-	a	5,75 x10 ⁹	6,13 x10 ⁹	0,1680	1,84
3	-	+	-	b	9,20x10 ⁹	1,02 x10 ¹⁰	0,0001	85,69
4	+	+	-	ab	9,20 x10 ⁹	1,02 x10 ¹⁰	0,5163	0,36
5	-	-	+	c	4,84 x10 ⁹	1,02 x10 ¹⁰	0,0072	10,97
6	+	-	+	ac	4,60 x10 ⁹	6,13 x10 ⁹	0,9212	0,008
7	-	+	+	bc	7,08 x10 ⁹	6,57 x10 ⁹	0,4913	0,41
8	+	+	+	abc	7,08 x10 ⁹	7,67 x10 ⁹	0,3706	0,71

O efeito relevante para o quesito rigidez a quente é o fator B. A Figura 5.16 apresenta o comportamento da rigidez a quente com a variação deste fator.

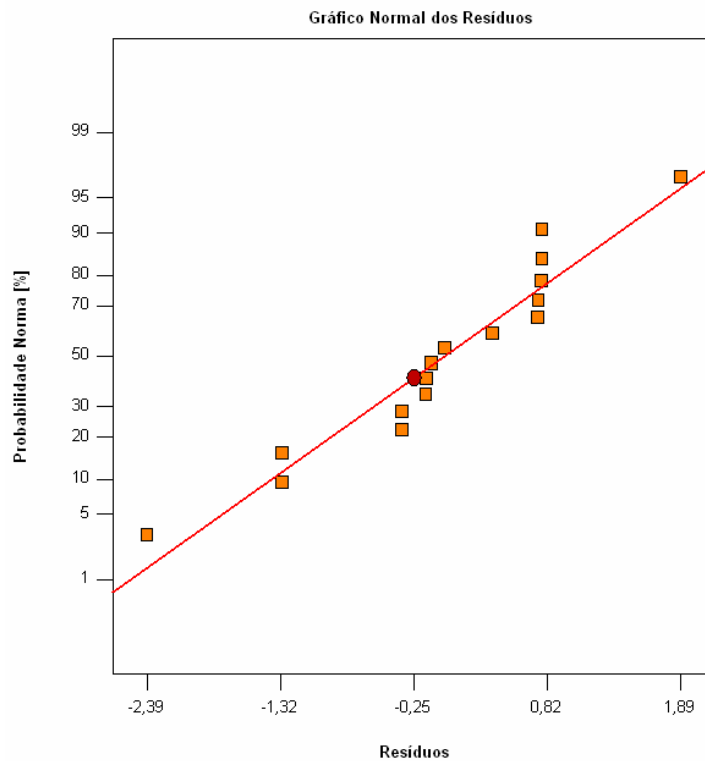


Figura 5.15: Gráfico normal dos resíduos para rigidez a quente.

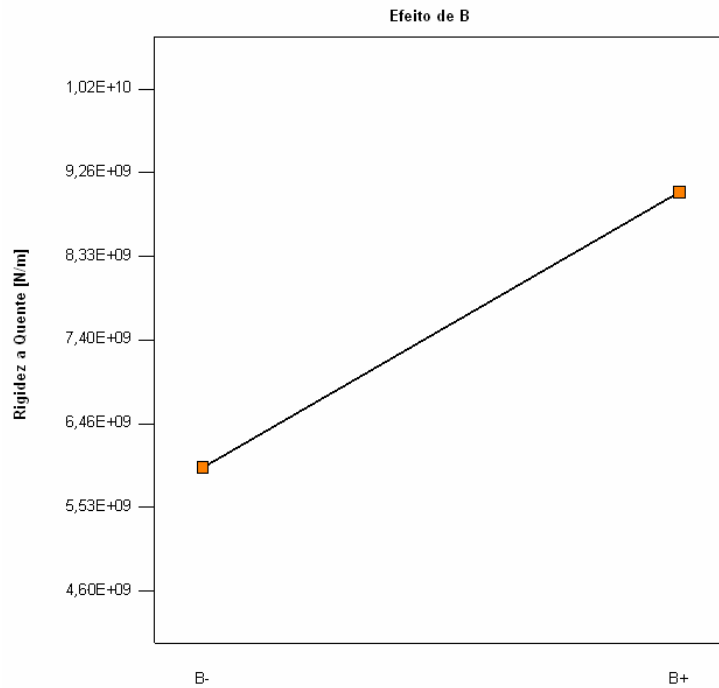


Figura 5.16: Efeito de B sobre a rigidez a quente.

Pode-se escrever a equação para o parâmetro rigidez a quente como segue :

$$\text{Rigidez a Quente}(B) = 7,511 \times 10^9 + 1,534 \times 10^9 B \quad (5.5)$$

5.2.3. Avaliação de Amortecimento Estrutural

Para avaliar os valores de amortecimento estrutural médio ($\bar{\xi}$), curvas de resposta em frequência foram determinadas em três pontos diferentes para cada pastilha. As pastilhas foram suspensas por cabo, onde o comprimento total do cabo apresentava uma frequência pendular abaixo da primeira frequência de ressonância da pastilha. Assim, a situação reproduz a condição livre-livre.

Mediante estas curvas, cada ressonância foi considerada como um sistema de um grau de liberdade e o método da banda de meia potência foi utilizado [35]. Um esquema do método da banda de meia potência pode ser visto na Figura 5.17. Com base nos resultados de amortecimento de cada “grau de liberdade”, o valor médio foi obtido.

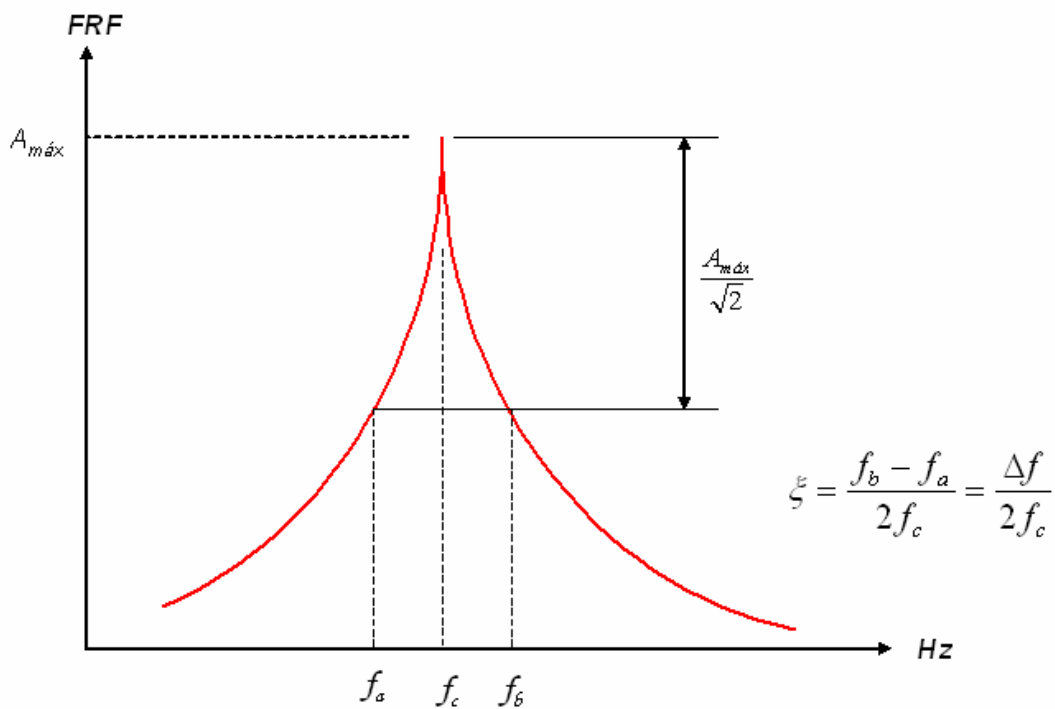


Figura 5.17 : Esquema do método da banda de meia potência.

O conjunto de valores referentes aos testes e suas replicações podem ser avaliados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 : Resultados dos testes de amortecimento.

Pastilha	Fator A	Fator B	Fator C	Combinação	Amortecimento		p	Contribuição [%]
					Replicações			
					I	II		
1	-	-	-	I	0,0105	0,0105	-	-
2	+	-	-	a	0,0089	0,0105	0,8307	0,72
3	-	+	-	b	0,0091	0,0127	0,2265	25,53
4	+	+	-	ab	0,0138	0,0096	0,6434	3,40
5	-	-	+	c	0,0134	0,0127	0,0804	60,61
6	+	-	+	ac	0,0103	0,0151	0,8307	0,72
7	-	+	+	bc	0,0098	0,0229	0,4612	8,83
8	+	+	+	abc	0,0123	0,0250	0,9082	0,21

Pela análise de variância dos dados da tabela acima, é possível concluir que o fator de influência sobre o amortecimento é o fator C .

O gráfico normal dos resíduos pode ser visto na Figura 5.18. Os efeitos dos fatores podem ser vistos nas Figuras 5.19 e 5.20.

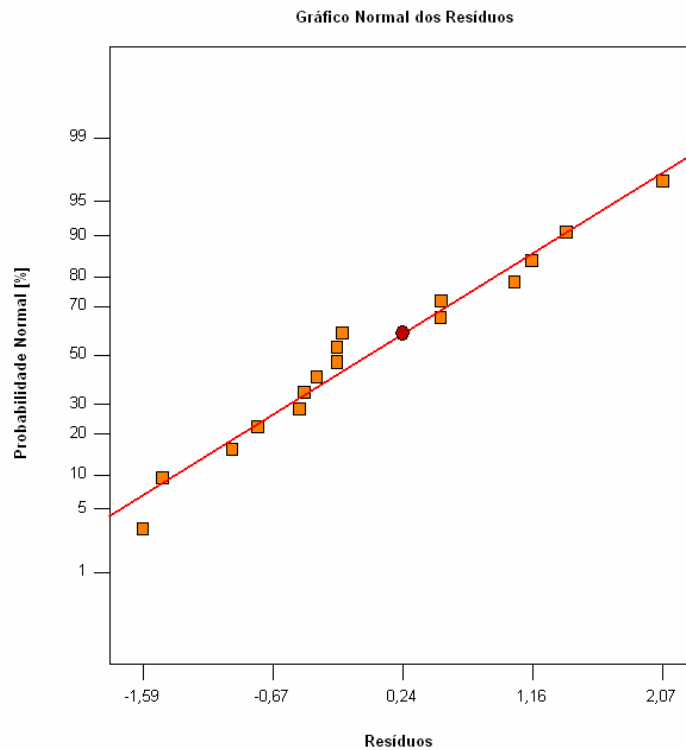


Figura 5.18 : Gráfico dos resíduos para amortecimento.

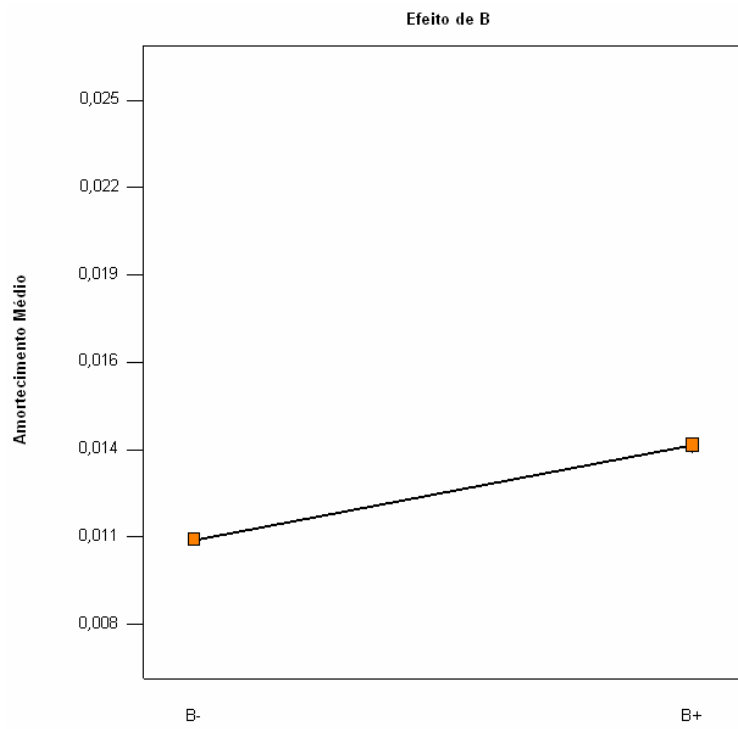


Figura 5.19 : Efeito de *B* sobre o amortecimento médio.

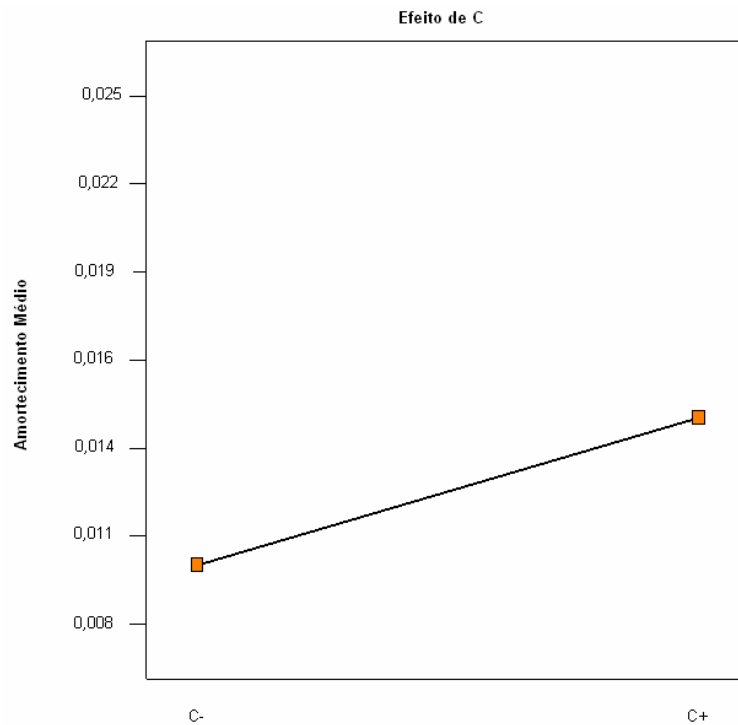


Figura 5.20 : Efeito de *C* sobre o amortecimento médio.

A curva de comportamento do amortecimento em função dos fatores pode ser vista na Figura 5.21. Esta curva representa a condição de menor amortecimento dentro das faixas escolhidas para os parâmetros.

A equação que dá origem à curva vista na Figura 5.21 pode ser escrita na forma que segue:

$$\text{Amortecimento}(B,C) = 0,013 + 2,244 \times 10^{-3} C \quad (5.6)$$

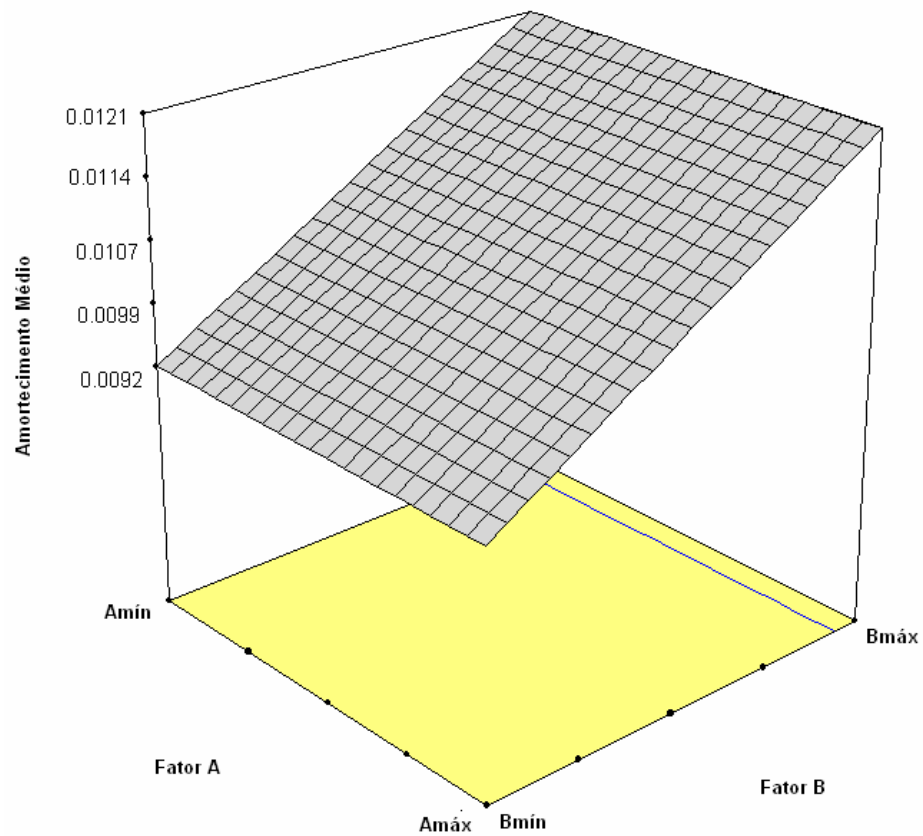


Figura 5.21 : Comportamento do amortecimento médio.

5.2.4. Avaliação da Dureza Superficial

O teste de avaliação de dureza superficial é o mais simples de todos. Ele foi executado usando-se um durômetro baseado na escala Gogan de dureza. Esta escala é tipicamente utilizada na área veicular.

Para executar as medições usa-se um durômetro Brinell onde se substitui o penetrador esférico por um penetrador cilíndrico. Usualmente este penetrador pode ser de 1" ou 3/4". Ambos são usados com uma carga de aproximadamente $1,47 \times 10^4$ N (1500 kgf). Sua interpretação diz que quanto maior o valor de penetração encontrado, mais macio é o material.

Os resultados obtidos são vistos na tabela que segue.

Tabela 5.8 : Resultados dos testes de dureza.

<i>Pastilha</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Fator C</i>	<i>Combinação</i>	<i>Dureza [Gogan]</i>		<i>p</i>	<i>Contribuição [%]</i>
					<i>Replicações</i>			
					<i>I</i>	<i>II</i>		
<i>1</i>	-	-	-	<i>1</i>	46,00	23,50	-	
<i>2</i>	+	-	-	<i>a</i>	50,33	50,50	0,3267	0,41
<i>3</i>	-	+	-	<i>b</i>	19,00	23,00	< 0,0001	97,4
<i>4</i>	+	+	-	<i>ab</i>	21,00	21,00	0,5866	0,12
<i>5</i>	-	-	+	<i>c</i>	50,67	20,50	0,0854	1,47
<i>6</i>	+	-	+	<i>ac</i>	45,00	58,50	0,3698	0,34
<i>7</i>	-	+	+	<i>bc</i>	22,67	53,00	0,6670	0,07
<i>8</i>	+	+	+	<i>abc</i>	23,00	43,50	0,4976	0,19

A distribuição normal dos resíduos para o conjunto de dados de dureza pode ser vista na Figura 5.22.

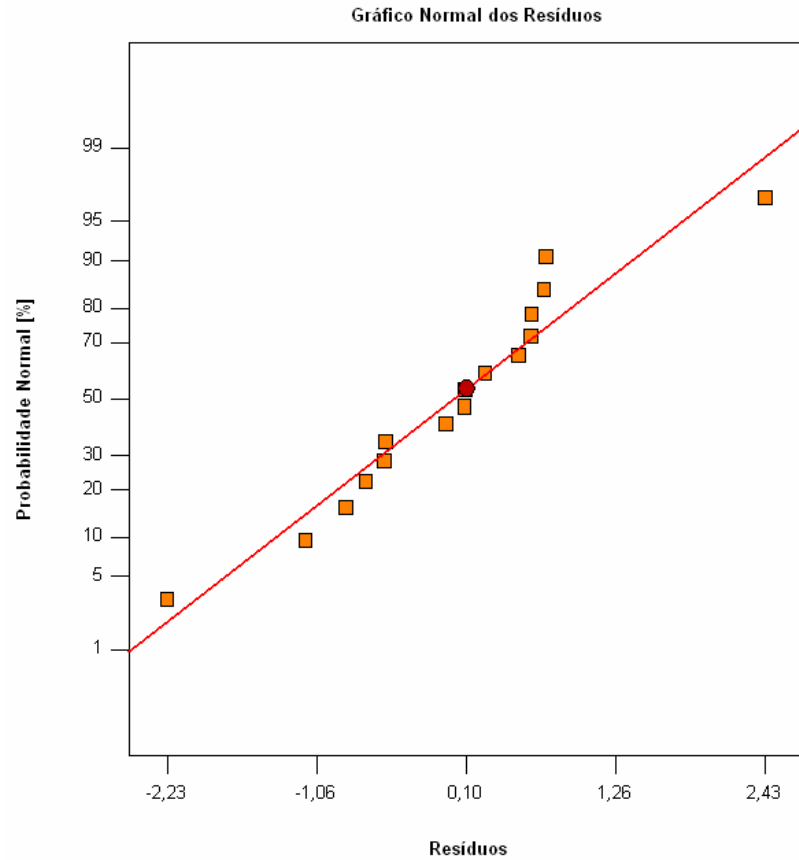


Figura 5.22 : Gráfico normal dos resíduos para os dados de dureza.

Para a dureza, o único efeito de influência sobre o parâmetro é o efeito B . Esta influência pode ser vista na Figura 5.23.

A equação que determina este comportamento é vista abaixo:

$$Dureza(B) = 96,32 - 9,33 B \quad (5.7)$$

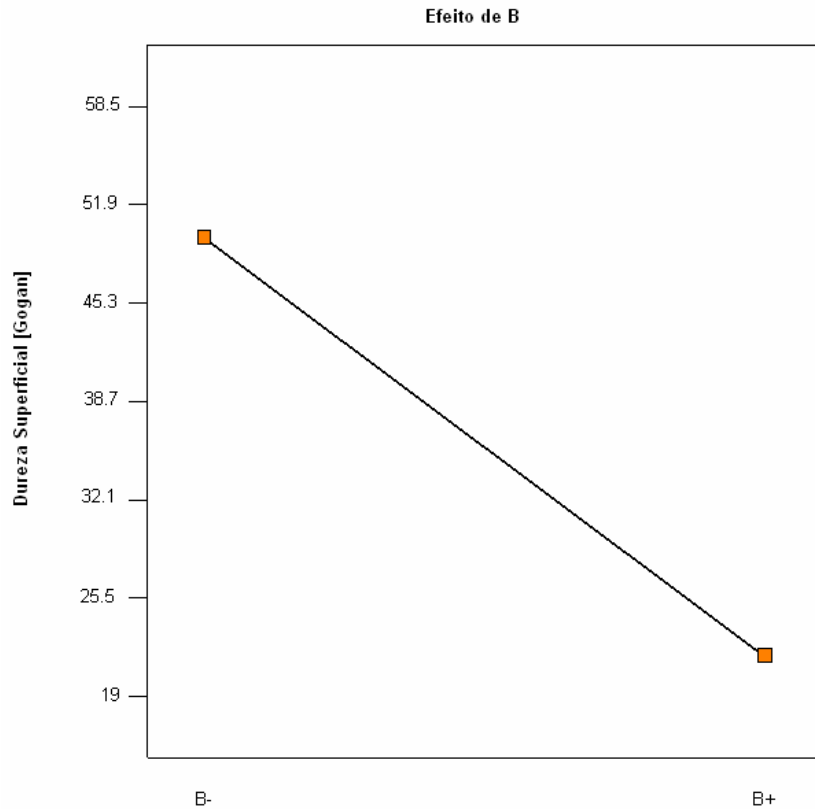


Figura 5.23 : Efeito do fator B sobre a dureza superficial.

5.3. Conclusões Preliminares

Observa-se que, para os resultados de desgaste, os valores da segunda replicação encontram-se sistematicamente superiores aos da primeira replicação. Mais do que isto se verifica que a variabilidade entre níveis é menor do que entre as replicações. Sabe-se que os parâmetros medidos têm variações complexas, conforme temperatura, situação da superfície dos materiais, comportamento do sistema de freio, entre outras. Mesmo assim, sugere-se uma revisão do procedimento experimental e da aquisição de dados para obtenção dos valores de desgaste.

Como mencionado, o projeto fatorial executado trabalhou com dois níveis: alto e baixo. Neste tipo de análise apenas relações lineares podem ser encontradas entre as variáveis. Para

que se proceda a uma verificação mais apurada, um projeto fatorial a três níveis forneceria uma relação mais precisa entre as variáveis.

Agrupando os fatores de influência elencados até aqui, é possível perceber a influência das variáveis sobre os resultados avaliados, conforme visto na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 : Dados agrupados das influências para o projeto 2³.

Variáveis	Fatores			Iterações			
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
<i>Amortecimento</i>			•				
<i>Rigidez a Frio</i>		•					
<i>Rigidez a Quente</i>		•					
<i>NPS Global</i>		•					
<i>Coefficiente de Atrito</i>		•	•				•
<i>Desgaste</i>	•					•	
<i>Dureza Superficial</i>		•					

Nota-se que o elemento *B* atua praticamente sobre todos os resultados avaliados. Como regra, pode-se dizer que iterações de ordem elevada não são significativamente influentes sobre as variáveis avaliadas.

Pode-se estabelecer algumas conclusões com base na Tabela 5.9. Dada a descrição de cada elemento *A*, *B* e *C*, conforme Item 5.1, tem-se :

- *Amortecimento*: é esperado da experiência teórica que o amortecimento tenha relação com a rigidez estrutural. Desta forma, o elemento de Pré-Mistura, a base de borracha, fornece características de rigidez e amortecimento, e aparece como influente para este parâmetro, sendo resultado alinhado com a teoria e com a prática.
- *Rigidez a Frio e a Quente*: para ambos os casos, a resina é elemento mais

influyente. Isto faz muito sentido, já que a resina determina o grau de “endurecimento” da mistura.

- *NPS Global*: da mesma forma, considerando-se que a resina atua no grau de rigidez estrutural do produto final, espera-se sua influência sobre o ruído.
- *Coefficiente de Atrito*: este parâmetro apresenta ligação estreita com as fibras. A fibra de celulose utilizada nas formulações teve baixo percentual em relação a fibra metálica, que coexiste em maior percentual com a fibra de celulose. Assim, os resultados apontaram a resina e a pré-mistura como elementos mais influentes. Isto pode ser aceito, já que a resina contribui com o grau de dureza da pastilha e, por conseguinte, pode afetar o atrito.
- *Desgaste*: o desgaste apresentou uma relação com a fibra de celulose, mas apresentou também relação com as iterações entre os três elementos utilizados. Aqui se esperava relação apenas com a fibra. No entanto, conclui-se que as relações entre os três elementos avaliados têm amparo na experiência prática.
- *Dureza Superficial*: o resultado encontrado, mais uma vez, está orientado com a experiência prática dos engenheiros químicos, já que a resina está diretamente ligada com a dureza superficial da pastilha.

As funções finais devem representar, com a maior precisão possível, as variáveis de interesse. Desta forma, serão computadas todas as iterações, inclusive as de ordem superior. A precisão no resultado será verificada, à medida que estas iterações forem sendo incluídas no processo de otimização.

Outro aspecto é que será necessário unir o comportamento de todas as variáveis numa única função objetivo, que deverá ser otimizada pelo algoritmo. Outra alternativa é utilizar a otimização em paralelo.

Devido ao alto custo experimental, as equações obtidas neste estudo serão utilizadas no algoritmo para possibilitar uma primeira aproximação e verificar a capacidade de otimização do método proposto. Para melhoria da precisão ou adequação das equações via projeto de experimentos, será necessária a revisão dos procedimentos experimentais ou a substituição das equações ineficientes.

Estudos para alargar as faixas percentuais precisam ser implementados, ainda que possam estar além do factível em termos de produção em larga escala.

Capítulo VI

A Função Objetivo

Este capítulo trata da construção da função objetivo e das premissas adotadas durante o processo de obtenção da função. Discute, ainda, a necessidade de escalonamento das grandezas envolvidas para melhorar o desempenho do algoritmo e a precisão da função objetivo.

6.1. Introdução	126
6.2. Premissas	126
6.3. Método de Obtenção	130
6.4. Escalonamento de Grandezas	132

6.1. Introdução

Considerando o aspecto prático da otimização em questão, o resultado de cada um dos parâmetros considerados no processo de minimização deve ser comparado a um alvo. O alvo para cada um dos parâmetros poderá ser definido pelo usuário, desde que respeitados os limites impostos pelas premissas que foram consideradas na construção da função objetivo, e que representa cada um dos parâmetros a serem otimizados.

6.2. Premissas

As premissas que regem não só as limitações em termos de resultados, mas também as restrições de uso do algoritmo, estão intimamente ligadas às hipóteses admitidas no projeto fatorial, descrito em detalhes no Capítulo 5.

Cabe agora agrupar essas premissas de modo a fornecer uma visão ampla das prováveis implicações de tais considerações sobre os resultados e limitações do algoritmo.

Deve-se entender estas limitações e restrições não como uma falha do método de algoritmos genéticos, mas sim às questões ligadas a considerações estatísticas do próprio projeto fatorial que originou as equações de controle para cada parâmetro.

Podemos agrupar as premissas como segue.

- **Comportamento Entre Níveis**

Conforme descrito no Capítulo 5, cada fator foi considerado com dois níveis: alto e baixo. Esta consideração implica que se admite um comportamento linear no intervalo compreendido entre os dois níveis. Esta consideração pode resultar numa equação que não

represente adequadamente o parâmetro, já que o comportamento pode ser de ordem mais elevada. Uma expressão gráfica desta discussão pode ser vista na Figura 6.1.

Se a equação não representar o parâmetro com precisão satisfatória, resultados inesperados ou divergências podem aparecer no processo de otimização.

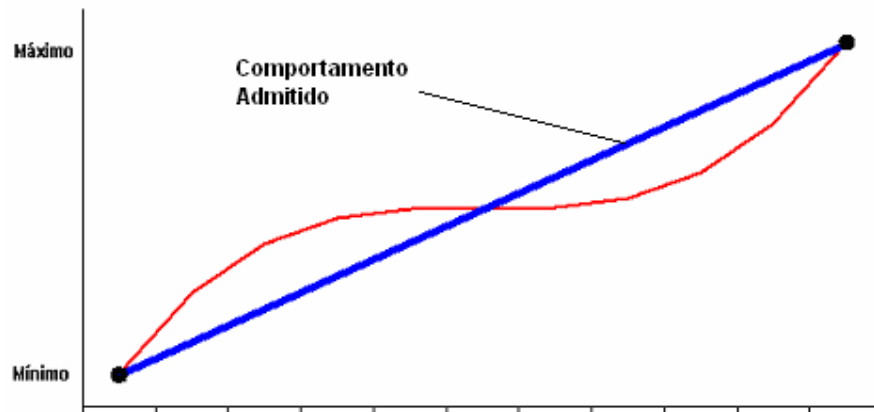


Figura 6.1 : Tipo de comportamento admitido e um dos possíveis comportamentos .

- **Níveis do Projeto Fatorial**

Os níveis escolhidos para compor os limites de cada parâmetro também são limitantes. Este fato deve-se ao próprio método estatístico escolhido. Não se pode fazer qualquer extrapolação com relação aos limites inferior e superior dos parâmetros porque as equações não podem ser aplicadas além destes limites. O nível de significância empregado nas análises do projeto fatorial implica que existe 95% de confiança nos resultados obtidos dentro da faixa especificada, e não fora dela.

- **Independência entre Variáveis**

As variáveis foram tomadas linearmente independentes, o que significa que se está admitindo não haver influência significativa proveniente da interação entre as variáveis.

Esta afirmação tem suas limitações práticas tendo em vista que podem existir algumas influências cruzadas devido ao comportamento químico da mistura em questão. No entanto, esta hipótese foi admitida porque apenas três elementos químicos da mistura foram variados e estes elementos apresentam respostas relativamente bem comportadas e conhecidas.

- **Adoção de Valores Médios**

Conforme comentado anteriormente, tanto o teste de desgaste quanto o de coeficiente de atrito são divididos em etapas que caracterizam o comportamento a frio e a quente. O ruído pode concentrar-se em diferentes faixas de frequência e, também, em diferentes níveis dB(A).

Durante a concepção do projeto fatorial foram considerados apenas valores médios, isto é, coeficiente de atrito e desgaste foram tomados em seus valores médios, unindo-se os comportamentos a frio e a quente. O ruído foi considerado em seu valor global, representação da soma logarítmica dos níveis de pressão sonora.

Assim, não é possível quantificar ou qualificar estes fatores em comportamento a frio ou a quente ou definir em que faixa de frequência determinado nível de ruído irá ocorrer.

- **Interação entre Fatores**

A interação de alta ordem entre fatores não foi considerada nas equações apresentadas no Capítulo 5. Isto foi admitido em função do próprio resultado das análises e, também, de que estatisticamente interações de alta ordem são menos significativas.

No entanto, como estamos buscando o maior grau de precisão possível no processo de otimização, para compor o conjunto de equações finais, todos os níveis de interação foram considerados.

6.3. Método de Obtenção

A função objetivo utilizada no processo de otimização foi obtida da junção das diferentes equações criadas a partir do projeto fatorial discutido no Capítulo 5. Para este fim, três parâmetros provenientes do projeto fatorial foram utilizados:

- a. Ruído Global, medido em dB(A);
- b. Desgaste médio das Pastilhas de Freio, em milímetros;
- c. Coeficiente de Atrito médio.

Além destes, uma equação referente ao custo da composição foi adicionada ao conjunto de equações mencionado acima.

As equações finais, advindas do projeto de experimentos onde foram consideradas todas as ordens de interação conforme Capítulo 5, ficam na forma:

- **Ruído Global**

$$NPS(A, B, C) = 122,73 - 22,46A + 0,27B - 10C + \\ 2,59AB + 2,17AC + 1,3BC - 0,34ABC . \quad (6.1)$$

- **Atrito Médio**

$$At(A, B, C) = 0,72 - 0,19A - 0,04B - 0,041C + \\ 0,027AB + 0,031AC + 4,92 \times 10^{-3} BC - 4,17 \times 10^{-3} ABC . \quad (6.2)$$

- **Desgaste Médio**

$$Dg(A, B, C) = -0,64 + 0,59A + 0,13B + 0,16C \\ - 0,071AB - 0,093AC - 0,023BC + 0,013ABC . \quad (6.3)$$

E, ainda, a função de custo, escrita na forma:

$$Ct(A, B, C) = \frac{M}{10^5} (A \times ca + B \times cb + C \times cc) . \quad (6.4)$$

onde :

A, B, C = componentes químicos as serem otimizados [% em massa];

M = massa total da mistura a ser otimizada [kg];

ca, cb, cc = custos de componentes químicos [R\$ / kg].

A maneira escolhida para agrupar as equações 6.1 a 6.4 foi a expressão que segue:

$$F(NPS, Dg, At, Ct) = k_1 \frac{(NPS - NPS_0)^2}{NPS_0^2} + k_2 \frac{(Dg - Dg_0)^2}{Dg_0^2} + k_3 \frac{(At - At_0)^2}{At_0^2} + k_4 \frac{(Ct - Ct_0)^2}{Ct_0^2} \quad , \quad (6.5)$$

onde:

NPS, Dg, At, Ct são os parâmetros a serem otimizados;

NPS_0, Dg_0, At_0, Ct_0 são os alvos da otimização;

k_n são índices para determinar a importância do parâmetro na otimização;

Desta forma, a Equação 6.5 constitui a função objetivo que será otimizada pelo algoritmo.

Um aspecto importante é que as ordens de grandeza de cada parâmetro diferem muito entre si. Assim não é possível aplicar a Equação 6.5 de forma direta no algoritmo. Um escalonamento das grandezas dos parâmetros é necessário.

6.4. Escalonamento das Grandezas

Assim, para obter maior precisão e estabilidade nos cálculos, um escalonamento foi aplicado aos termos da função objetivo.

Definiu-se o escalonamento no intervalo 1 a 10, onde 1 representa o menor valor possível para o parâmetro e 10 seu valor máximo.

Podemos equacionar uma formulação genérica estabelecendo uma interpolação, como segue:

$$\begin{array}{rcl} V_{max} & -- & 10 \\ X & -- & Y \\ V_{min} & -- & 1 \end{array}$$

onde:

V_{max} , V_{min} são os valores extremos que o parâmetro pode alcançar;

X é o parâmetro a ser escalonado;

Y é o parâmetro após o escalonamento.

Assim, pode-se escrever:

$$\frac{V_{max} - X}{V_{max} - V_{min}} = \frac{10 - Y}{10 - 1} \quad \therefore$$

$$Y = 10 - 9 \times \left(\frac{V_{max} - X}{V_{max} - V_{min}} \right) \quad (6.6)$$

Pode-se verificar que no momento do escalonamento do alvo de otimização este terá valor sempre igual à unidade. Este raciocínio é viável já que o objetivo do algoritmo é a minimização e o menor valor possível para cada um dos parâmetros é sempre o alvo. Desta forma, na Equação 6.5, pode-se fazer $NPS_0 = Dg_0 = At_0 = Ct_0 = 1$.

Capítulo VII

O Aplicativo AG *Noise*

Este capítulo apresenta as características e funcionalidades principais do aplicativo construído em Delphi®.

Discute-se, ainda, os testes efetuados para verificação da convergência das funções propostas no Capítulo 6 bem como a funcionalidade da função objetivo.

7.1. Características Principais	135
7.2. Recursos Disponíveis	138
7.3. Testes de Convergência	140
7.4. Discussões Sobre Convergência	144

7.1. Características Principais

O aplicativo final foi construído com base na teoria discutida no Capítulo 4 e nas equações apresentadas no Capítulo 6. Sua finalidade principal é a de minimizar todos os parâmetros envolvidos no problema.

Este aplicativo não pode ser utilizado para maximizar os valores, pois não foi preparado para tal tarefa.

Estão disponíveis três tipos de mutação e três tipos de cruzamento, conforme vistos na teoria. Estes tipos de mutação e cruzamento podem ser combinados em qualquer dupla que o usuário desejar. Os resultados podem ser observados e o que melhor se adequar ao propósito do problema a ser otimizado é selecionado.

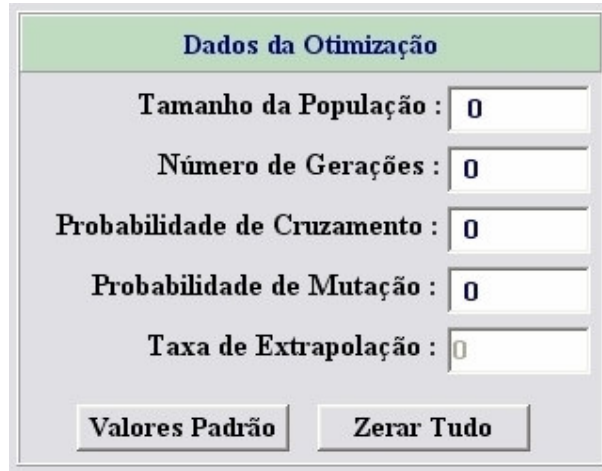


Figura 7.1 : Seleção de operadores genéticos.

Para cada combinação de operadores genéticos é possível configurar parâmetros referentes ao processo de otimização, tais como probabilidades de mutação e cruzamento, número de gerações e tamanho da população.

Na caixa *Limites Percentuais*, o usuário pode configurar os limites utilizados para gerenciar o processo de otimização, além de informar a massa total de componentes que será

misturada. Estes limites constituem limites ao processo e garantem a convergência de resultados.



Dados da Otimização	
Tamanho da População :	0
Número de Gerações :	0
Probabilidade de Cruzamento :	0
Probabilidade de Mutação :	0
Taxa de Extrapolação :	0
Valores Padrão Zerar Tudo	

Figura 7.2 : Configurações de parâmetros para o processo de otimização e operadores genéticos.



	Mínimo	Máximo	
A	0	0	%
B	0	0	%
C	0	0	%
Massa Total da Mistura :	0		g

Figura 7.3 : Configurações de limites percentuais e massa total da mistura.

Na caixa *Controle de Parâmetros*, é possível indicar quais parâmetros serão relevantes no processo de otimização assim como os alvos que o algoritmo deve buscar.

Controle de Parâmetros		
Influência	Targets	
<input checked="" type="checkbox"/> Ruído	<input type="text" value="0"/>	dB(A)
<input checked="" type="checkbox"/> Atrito	<input type="text" value="0"/>	--
<input checked="" type="checkbox"/> Desgaste	<input type="text" value="0"/>	mm
<input checked="" type="checkbox"/> Custo	(mínimo)	R\$

Figura 7.4 : Controle de parâmetros relevantes e definição de alvos de otimização.

Na caixa *Custo de Componentes*, ajustam-se os custos de cada um dos componentes da formulação que serão otimizados, com valores em Reais por quilograma de componente.

Custos de Componentes		
A :	<input type="text" value="0"/>	R\$/kg
B :	<input type="text" value="0"/>	R\$/kg
C :	<input type="text" value="0"/>	R\$/kg

Figura 7.5 : Caixa de configuração dos custos de componentes da formulação.

Como resultados do processo de otimização, o aplicativo devolve o tempo total gasto na otimização, os percentuais em massa de cada um dos componentes que devem ser misturados para produzir o resultado esperado e uma previsão dos valores experimentais que devem ser obtidos após a confecção das pastilhas.

Resultados	
Percentuais Otimizados	Parâmetros Esperados
A : 0	Ruído : 0 dB(A)
B : 0	Atrito : 0 --
C : 0	Desgaste : 0 mm
	Custo : 0 R\$

Figura 7.6 : Caixa onde são apresentados os resultados obtidos após otimização da mistura.

7.2. Recursos Disponíveis

Na intenção de adicionar funcionalidade ao aplicativo, foram incorporadas funções comuns à maioria dos softwares comerciais.

Desta forma, o aplicativo permite realizar tarefas comuns como salvar, abrir, exportar arquivos e copiar resultados para área de transferência, bem como ter acesso ao arquivo de ajuda.

Estas funcionalidades estão disponíveis no menu de ferramentas e, também, no menu suspenso.



Figura 7.7 : Menu suspenso e menu de ferramentas do aplicativo.

A tela principal do aplicativo AG Noise em sua forma final pode ser vista na Figura 7.8.

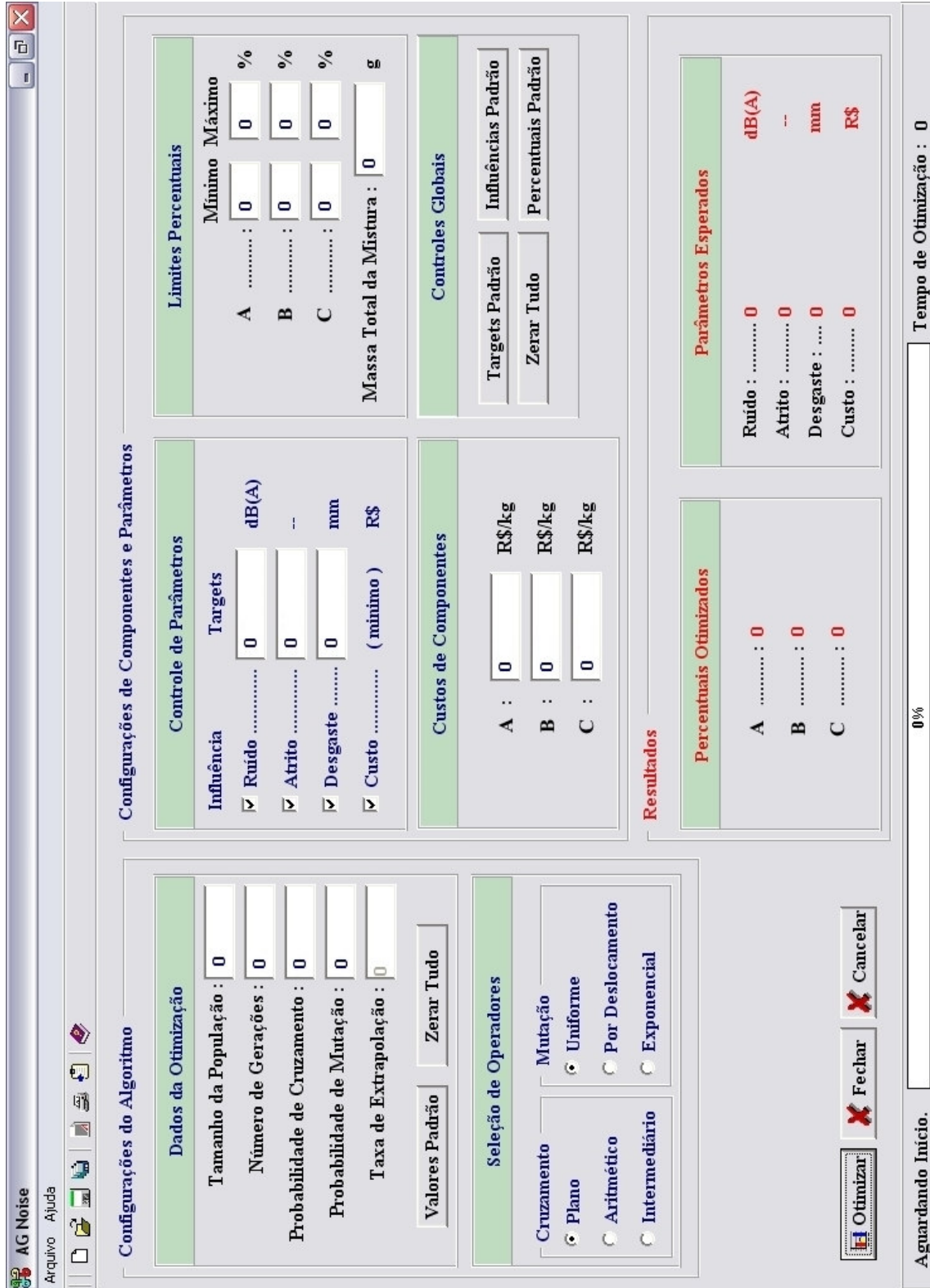


Figura 7.8 : Tela principal do aplicativo AG Noise.

7.3. Testes de Convergência

A fim de verificar o comportamento do algoritmo, foram executados alguns testes para avaliação de convergência.

Estes testes foram desenvolvidos considerando-se cada um dos parâmetros em separado e comparando-se os resultados proporcionados pelo aplicativo com aqueles provenientes do projeto fatorial.

As seguintes avaliações foram adotadas para análise:

- **Nível de Ruído Global**

Nesta etapa, apenas o nível de ruído global foi considerado relevante ao processo de otimização. Isto significa que os demais parâmetros irão assumir resultados baseados nas proporções em massa otimizadas a partir da função que representa o nível de ruído.

Por outro lado, comparando-se os percentuais encontrados para cada componente com aqueles provenientes do projeto fatorial poder-se-á ter idéia do nível de convergência e da precisão do algoritmo.

A Tabela 7.1 apresenta os resultados obtidos pelo algoritmo e o gráfico da Figura 7.9 os resultados do projeto fatorial.

Tabela 7.1 : Resultado da Otimização Usando Apenas Ruído Global como Parâmetro Relevante.

<i>Componente</i>	<i>Percentual em Massa Otimizado</i>	<i>Ruído Esperado dB(A)</i>
A	1,498	87,532
B	5,004	
C	7,991	

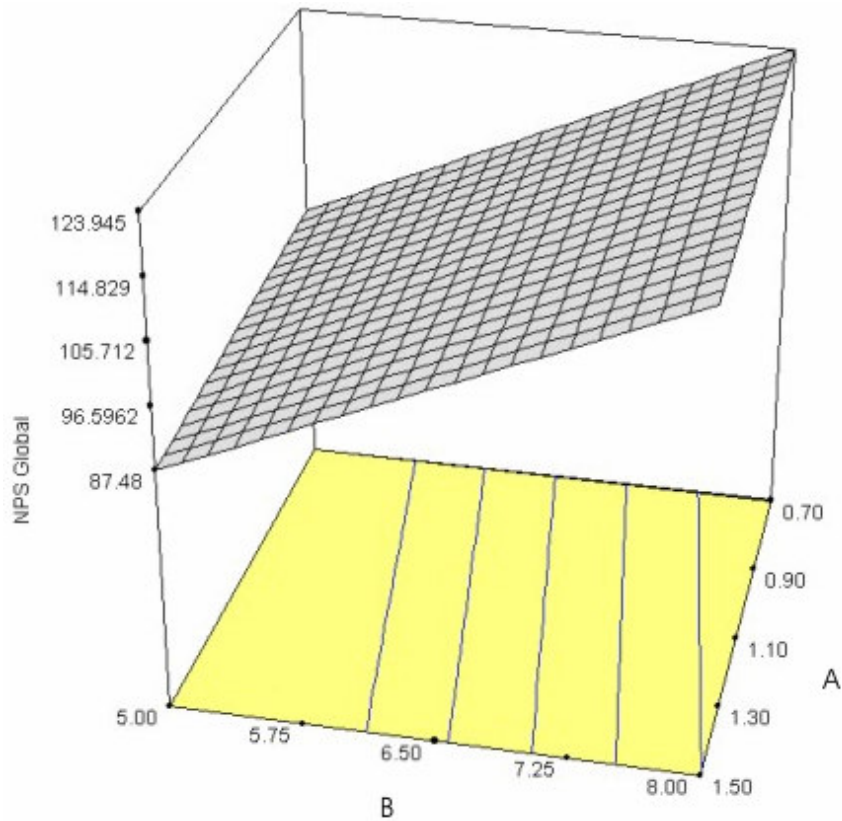


Figura 7.9 : Resultado do projeto fatorial para o parâmetro ruído.

- **Atrito Médio**

Da mesma forma, neste passo da verificação ficou determinado que apenas o parâmetro atrito seria considerado na otimização. Os demais parâmetros são tidos como consequência dos percentuais em massa encontrados pela equação que rege o comportamento do parâmetro atrito.

Na Tabela 7.2 tem-se os dados sugeridos pelo aplicativo e na Figura 7.10 os resultados obtidos do projeto fatorial para o parâmetro correspondente.

Tabela 7.2 : Resultado da Otimização Usando Apenas Atrito Médio como Parâmetro Relevante.

Componente	Percentual em Massa Otimizado	Atrito Esperado
A	0,700	0,391
B	7,999	
C	7,999	

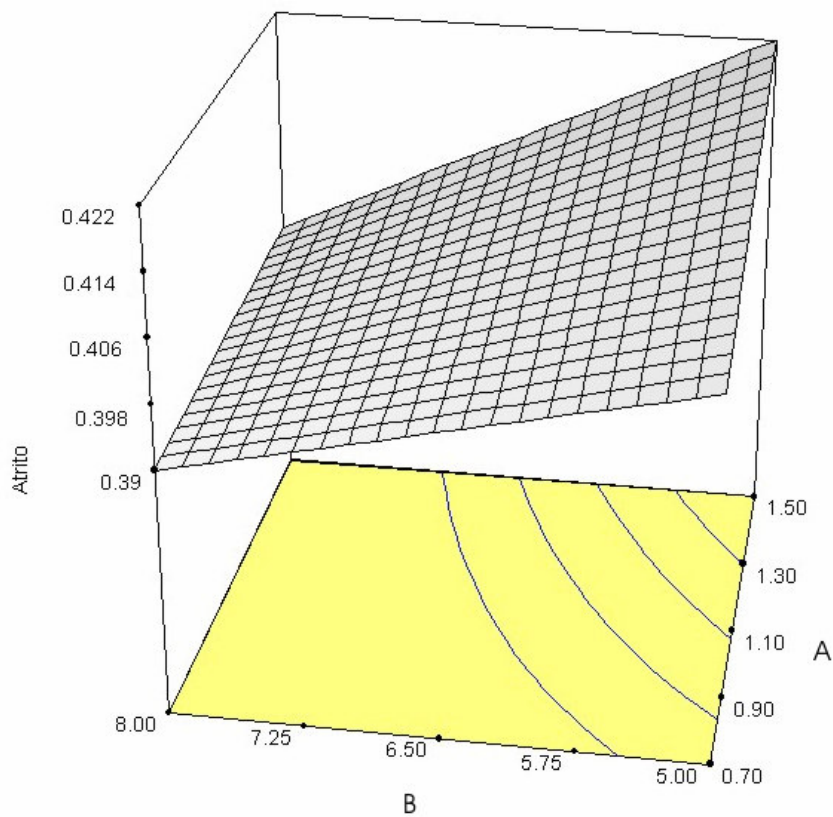


Figura 7.10 : Resultado do projeto fatorial para o parâmetro atrito.

- **Desgaste Médio**

Na mesma linha de raciocínio, o parâmetro desgaste foi verificado. Os resultados previstos pelo algoritmo podem ser vistos na Tabela 7.3 e os obtidos do projeto fatorial na Figura 7.11.

Tabela 7.3 : Resultado da Otimização Usando Apenas Desgaste Médio como Parâmetro Relevante.

<i>Componente</i>	<i>Percentual em Massa Otimizado</i>	<i>Desgaste Esperado[mm]</i>
A	0,744	0,287
B	5,176	
C	3,279	

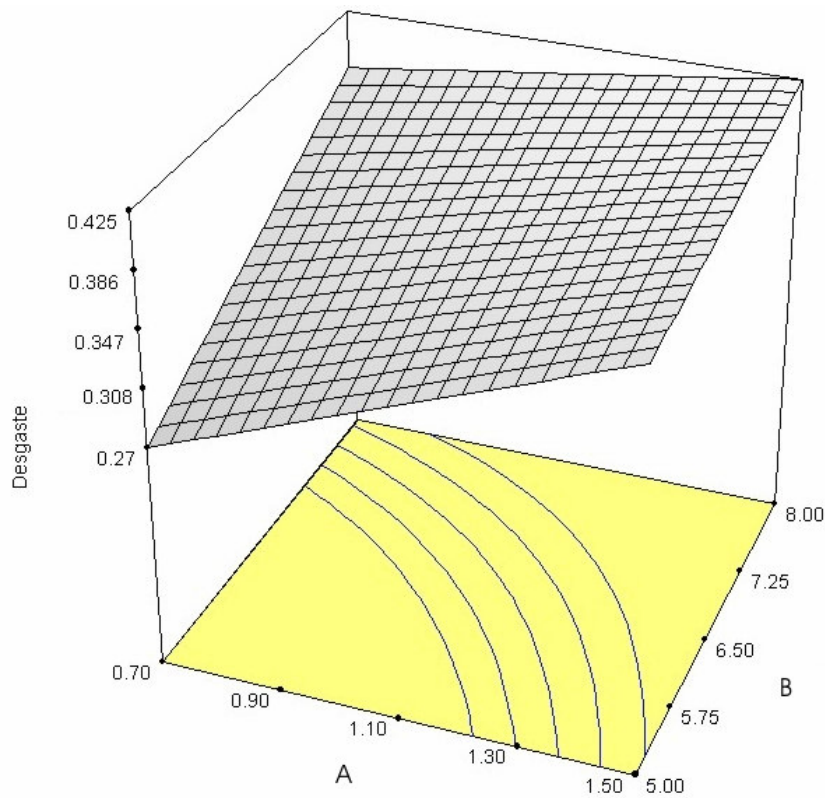


Figura 7.11 : Resultado do projeto fatorial para o parâmetro desgaste.

- **Custo da Mistura**

Embora o custo da composição não tenha sido avaliado mediante o uso de projeto fatorial, é possível avaliar sua convergência.

Com base na equação de custo apresentada no Capítulo 6, pode-se concluir que o menor custo, independentemente da massa total da mistura, será obtido quando a composição contiver o menor valor de percentual em massa de cada componente.

Desta forma, basta solicitar ao algoritmo que otimize a composição tendo como único parâmetro o custo. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 7.4

Tabela 7.4 : Resultado da Otimização Usando Apenas o Custo da Mistura como Parâmetro Relevante.

<i>Componente</i>	<i>Percentual em Massa Otimizado</i>
A	0,700
B	5,000
C	3,009

Considerando que os limites mínimos de percentual em massa utilizados para esta avaliação foram $A = 0,7\%$, $B = 5\%$ e $C = 3\%$, a precisão e a convergência são satisfatórias.

7.4. Discussões Sobre Convergência

Observadas as discussões apresentadas no Capítulo 6 sobre a função objetivo e os resultados provenientes da otimização, na forma das tabelas 7.1 a 7.4, podem-se destacar alguns pontos importantes.

Inicialmente, pode-se dizer que tanto a precisão como a convergência são bastante satisfatórias. Este resultado deve-se ao fato da capacidade do método de localizar mínimos globais ser muito elevada, conforme já discutido.

Os erros obtidos da otimização em comparação as curvas obtidas do projeto fatorial são reduzidos. Isto aponta para uma boa manipulação dos valores pelos operadores genéticos, indicando que o método tem boa estabilidade.

Em consideração aos aspectos discutidos no Capítulo 6, pode-se dizer que cada função, agindo separadamente, é capaz de produzir resultados com baixos índices de erro. No entanto, o aspecto teórico adotado é de que não existem grandes influências entre os próprios parâmetros. Dada a complexidade química da formulação e possíveis variações de comportamento do sistema de freio e da própria composição do disco de freio, essa afirmação não é de todo verdadeira.

A influência cruzada entre os parâmetros, se avaliada, poderia produzir uma função de ajuste, tendo em vista as variações mencionadas.

Dado o propósito deste trabalho, evitou-se a elevação excessiva dos custos da parte experimental, a fim de avaliar e validar a capacidade do método proposto frente à dificuldade do problema.

Posto desse modo percebe-se que o resultado global do processo de otimização, tendo em vista todos os parâmetros, deve ser comprovado através da criação de corpos de prova baseados no aplicativo desenvolvido. Estas “pastilhas” serão testadas usando-se os mesmos procedimentos de testes que foram usados durante o projeto fatorial, seguindo-se estritamente os mesmos critérios.

Capítulo VIII

Aplicações Práticas

Aqui se discutem os resultados práticos obtidos com a confecção de pastilhas que tiveram sua formulação baseada nas diretrizes do aplicativo desenvolvido.

São apresentados, ainda, os erros obtidos entre os resultados projetados e aqueles obtidos na prática.

8.1. Dados de Entrada para o Aplicativo	147
8.2. Composições Sugeridas pelo Aplicativo	148
8.3. Resultados Experimentais	153
8.4. Erros Obtidos	156

8.1. Dados de Entrada para o Aplicativo

Para efetuar as aplicações práticas os seguintes dados foram inseridos no aplicativo :

- **Dados da Otimização**

Em todos os experimentos, foram utilizados os mesmos dados de tamanho de população, gerações e probabilidades. Os valores definidos são :

Tamanho da População : 1000

Número de Gerações : 1000

Probabilidade de Cruzamento : 0,95

Probabilidade de Mutação : 0,05

- **Alvos de Otimização**

Como alvos de otimização, os valores definidos são os menores valores obtidos durante os testes experimentais do projeto fatorial. Estes valores consistem nos menores alvos práticos possíveis de se obter na prática, já que os níveis do projeto fatorial foram definidos segundo critérios factíveis do ponto de vista experimental.

Alvo para NPS : 81,04 dB(A)

Alvo para Atrito : 0,385

Alvo para Desgaste : 0,27 mm

Alvo para Custo : [automático, sempre o mínimo] R\$/kg

- **Limites Percentuais**

Os limites de percentual em massa dos componentes também é derivado dos limites práticos e factíveis para materiais de atrito e derivam do projeto fatorial que deu origem as funções de controle de parâmetros.

Desta forma, tem-se:

Tabela 8.1 : Configuração de limites percentuais dos testes experimentais.

Elemento	Mínimo [%]	Máximo [%]
<i>A</i>	0,7	1,5
<i>B</i>	5	8
<i>C</i>	3	8

Tem-se, ainda, a massa total da mistura definida em 4 kg, que é um valor mínimo de mistura que pode ser perfeitamente controlado em escala piloto a fim de produzir as pastilhas para teste.

8.2. Composições Sugeridas pelo Aplicativo

Depois de configurado o aplicativo, o mesmo produziu uma série de composições e valores esperados de parâmetros. O procedimento tomado em cada uma das otimizações foi o mesmo descrito no Capítulo 7, ou seja, cada um dos parâmetros foi considerado separadamente e, depois, todos otimizados simultaneamente. Este último representa o grande objetivo e propósito deste trabalho, pois trata de otimizar um conjunto de parâmetros simultaneamente. Além disso, deve garantir boa precisão ao informar os resultados esperados

de parâmetros evitando a confecção de um sem número de materiais de atrito para identificar a melhor composição.

Devido aos aspectos produtivos e limitações práticas, em alguns casos existiram diferenças entre o percentual sugerido pelo aplicativo e o percentual em massa realmente aplicado. As composições sugeridas para cada etapa, bem como aquelas aplicadas e os resultados experimentais esperados podem ser vistos nas tabelas que seguem.

- **Otimização do Ruído Global**

Quando solicitado a otimizar apenas o nível de ruído global, o aplicativo forneceu os dados vistos na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 : Percentuais Fornecidos pelo Aplicativo e Percentuais Aplicados na Confecção da Pastilha: Ruído.

Elemento	% Sugerido	% Aplicado
<i>A</i>	1,499	1,5
<i>B</i>	5,000	5,0
<i>C</i>	7,999	8,0

Como resultados esperados de parâmetros, o aplicativo apresentou os dados vistos na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 : Valores Esperados para os Parâmetros Otimizados.
Parâmetro Relevante: Ruído.

Parâmetro	Valor Sugerido
<i>Ruído Global</i>	87,46 dB(A)
<i>Atrito Médio</i>	0,43
<i>Desgaste Médio</i>	0,39 mm
<i>Custo da Mistura</i>	R\$ 4,48

- **Otimização do Atrito Médio**

Para o caso do atrito médio, os valores fornecidos pelo aplicativo foram os apresentados na Tabela 8.4.

Tabela 8.4 : Percentuais Fornecidos pelo Aplicativo e Percentuais Aplicados na Confeção da Pastilha: Atrito.

Elemento	% Sugerido	% Aplicado
<i>A</i>	0,700	0,7
<i>B</i>	7,999	8,0
<i>C</i>	7,999	8,0

Como resultados esperados de parâmetros, o aplicativo apresentou os dados vistos na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 : Valores Esperados para os Parâmetros Otimizados.
Parâmetro Relevante: Atrito.

Parâmetro	Valor Sugerido
<i>Ruído Global</i>	123,79 dB(A)
<i>Atrito Médio</i>	0,39
<i>Desgaste Médio</i>	0,28 mm
<i>Custo da Mistura</i>	R\$ 4,89

- **Otimização do Desgaste Médio**

Os resultados da otimização do desgaste médio são os apresentados na Tabelas 8.6.

Como resultados esperados de parâmetros, o aplicativo apresentou os dados vistos na Tabela 8.7.

Tabela 8.6 : Percentuais Fornecidos pelo Aplicativo e Percentuais Aplicados na Confeção da Pastilha: Desgaste.

Elemento	% Sugerido	% Aplicado
<i>A</i>	0,763	0,8
<i>B</i>	5,120	5,1
<i>C</i>	3,238	3,3

Tabela 8.7 : Valores Esperados para os Parâmetros Otimizados. Parâmetro Relevante: Desgaste.

Parâmetro	Valor Sugerido
<i>Ruído Global</i>	120,14 dB(A)
<i>Atrito Médio</i>	0,43
<i>Desgaste Médio</i>	0,41 mm
<i>Custo da Mistura</i>	R\$ 2,41

- **Otimização do Custo da Mistura**

No processo de otimização do custo da mistura, o aplicativo indicou os percentuais vistos na Tabela 8.8. É esperado que o aplicativo forneça como resultado os menores percentuais, já que o custo deve ser o menor possível.

Tabela 8.8 : Percentuais Fornecidos pelo Aplicativo e Percentuais Aplicados na Confeção da Pastilha: Custo.

Elemento	% Sugerido	% Aplicado
<i>A</i>	0,700	0,7
<i>B</i>	5,000	5,0
<i>C</i>	3,000	3,0

Os resultados dos parâmetros advindos da aplicação dos valores da Tabela 8.8 são vistos na Tabela 8.9

Tabela 8.9 : Valores Esperados para os Parâmetros Otimizados.
Parâmetro Relevante: Desgaste.

Parâmetro	Valor Sugerido
<i>Ruído Global</i>	107,91 dB(A)
<i>Atrito Médio</i>	0,45
<i>Desgaste Médio</i>	0,25 mm
<i>Custo da Mistura</i>	R\$ 2,26

- **Otimização de Todos os Parâmetros**

Este é o ponto máximo do trabalho, porque é aqui que reside a principal tarefa do algoritmo: otimizar todos os parâmetros simultaneamente.

A Tabela 8.10 mostra as indicações de composição e a Tabela 8.11 mostra os resultados esperados dos parâmetros.

Tabela 8.10 : Percentuais Fornecidos pelo Aplicativo e Percentuais Aplicados na Confeção da Pastilha: Geral.

Elemento	% Sugerido	% Aplicado
<i>A</i>	0,700	0,7
<i>B</i>	5,000	5,0
<i>C</i>	3,000	3,0

Tabela 8.11 : Valores Esperados para os Parâmetros Otimizados.
Parâmetro Relevante: Todos.

Parâmetro	Valor Sugerido
<i>Ruído Global</i>	121,91 dB(A)
<i>Atrito Médio</i>	0,42
<i>Desgaste Médio</i>	0,27 mm
<i>Custo da Mistura</i>	R\$ 2,63

8.3. Resultados Experimentais

Através do uso das recomendações produzidas pelo aplicativo desenvolvido, geraram-se as cinco pastilhas. Cada uma das formulações desenvolvidas foi submetida aos processos experimentais, conforme descrito no Capítulo 5.

Os resultados podem ser agrupados na forma da Tabela 8.12.

Tabela 8.12 : Resultados Experimentais para as Cinco Formulações Otimizadas.

Parâmetro Medido	Parâmetro de Controle				
	<i>Atrito</i>	<i>Custo</i>	<i>Desgaste</i>	<i>Ruído</i>	<i>Todos</i>
<i>Ruído Global [dB(A)]</i>	121,38	121,65	120,14	117,27	121,91
<i>Atrito Médio [adm.]</i>	0,38	0,44	0,43	0,39	0,42
<i>Desgaste Médio [mm]</i>	0,36	0,49	0,41	0,56	0,27
<i>Custo da Mistura [R\$/kg]</i>	4,89	2,25	2,41	4,48	2,63

Podemos, agora, agrupar os dados referentes aos dados experimentais comparados aos resultados previstos pelo aplicativo. Esta comparação apontará os erros percentuais entre estes resultados.

A Tabela 8.13 apresenta os valores experimentais em comparação aos valores previstos quando o aplicativo usou o atrito médio das pastilhas como único parâmetro relevante da otimização.

Tabela 8.13 : Erros nos Resultados Experimentais Durante a Otimização do Atrito Médio.

Parâmetro de Controle: Atrito Médio			
Fatores	Valores Projetados	Valores Experimentais	Erro %
Atrito [adim.]	0,39	0,38	2,56
Custo [R\$/kg]	4,89	4,89	0,00
Desgaste [mm]	0,28	0,36	28,57
Ruído [dB(A)]	123,79	121,38	1,95

Na Tabela 8.14 pode-se observar os erros referentes aos dados experimentais quando o único parâmetro de controle considerado relevante foi o custo da mistura. Aqui cabe lembrar que o aplicativo busca, como alvo, sempre o menor custo possível.

Tabela 8.14 : Erros nos Resultados Experimentais Durante a Otimização do Custo da Mistura.

Parâmetro de Controle: Custo da Mistura			
Fatores	Valores Projetados	Valores Experimentais	Erro %
Atrito [adim.]	0,45	0,44	2,22
Custo [R\$/kg]	2,25	2,25	0,00
Desgaste [mm]	0,25	0,49	96,00
Ruído [dB(A)]	107,91	121,65	12,73

Na Tabela 8.15, vê-se os resultados para a otimização com o desgaste médio das pastilhas como único parâmetro relevante.

Tabela 8.15 : Erros nos Resultados Experimentais Durante a Otimização do Desgaste Médio.

Parâmetro de Controle: Desgaste Médio			
Fatores	Valores Projetados	Valores Experimentais	Erro %
Atrito [adim.]	0,44	0,43	2,27
Custo [R\$/kg]	2,39	2,41	0,84
Desgaste [mm]	0,27	0,41	51,85
Ruído [dB(A)]	107,32	120,14	11,95

A próxima tabela apresenta os resultados de erros quando o parâmetro ruído médio foi considerado como único fator relevante à otimização.

Tabela 8.16 : Erros nos Resultados Experimentais Durante a Otimização do Ruído Médio.

Parâmetro de Controle: Ruído Médio			
Fatores	Valores Projetados	Valores Experimentais	Erro %
Atrito [adim.]	0,42	0,39	7,14
Custo [R\$/kg]	4,48	4,48	0,00
Desgaste [mm]	0,38	0,56	47,37
Ruído [dB(A)]	87,46	117,27	34,09

O próximo passo é a comparação dos erros obtidos quando se consideram todos os parâmetros como relevantes. Do ponto de vista prático esta é a condição mais importante, porque reflete a intenção real, ou seja, superar o problema de atender todos os requisitos de fabricação de uma única vez. Na Tabela 8.17 têm-se estes resultados.

Tabela 8.17 : Erros nos Resultados Experimentais Durante a Otimização de Todos os Parâmetros Simultaneamente.

Parâmetro de Controle: Todos			
Fatores	Valores Projetados	Valores Experimentais	Erro %
Atrito [adm.]	0,44	0,42	4,55
Custo [R\$/kg]	2,63	2,63	0,00
Desgaste [mm]	0,27	0,27	0,00
Ruído [dB(A)]	105,07	121,91	16,03

8.4. Análise dos Erros Obtidos

Diante dos resultados apresentados nas tabelas 8.13 a 8.17, é possível agrupar-se os valores de erros obtidos a fim de se verificar sua dispersão. Na Tabela 8.18 pode-se acompanhar tais resultados de forma agrupada.

Tabela 8.18 : Distribuição dos Erros nos Resultados Experimentais.

Parâmetro Medido	Erros Conforme Cada Parâmetro de Controle [%]				
	<i>Atrito</i>	<i>Custo</i>	<i>Desgaste</i>	<i>Ruído</i>	<i>Todos</i>
Atrito Médio [adm.]	2,56	2,22	2,27	7,14	4,55
Custo [R\$/kg]	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00
Desgaste Médio [mm]	28,57	96,00	51,85	47,37	0,00
Ruído Global [dB(A)]	1,95	12,73	11,95	34,09	16,03

Analisando-se a Tabela 8.18 é possível verificar que as equações que regem o comportamento do atrito médio e do custo da mistura estão satisfatoriamente estáveis e são representativas dos fenômenos, já que ambas apresentaram erros bastante aceitáveis, mesmo quando não eram elas que comandavam a otimização.

Já as equações referentes ao desgaste e o ruído médio, mostraram-se mal comportadas. Este fato pode ser observado quando nos reportamos aos erros entre os dados experimentais e os projetados e verificamos erros elevados. Isto indica que estas equações não representam o fenômeno com a precisão que poderiam representar.

Existem duas explicações possíveis para os erros obtidos: erros inerentes ao processo experimental e as premissas do projeto fatorial.

Com relação aos erros experimentais, não foram executados testes para averiguar os erros embutidos nos processos de medida, já que eram todos procedimentos automatizados e há muito tempo utilizados pela empresa, aceitando-se assim que os procedimentos e equipamentos ocasionariam erros experimentais reduzidos.

No processo de medição de ruído deve-se observar que a geração do ruído é, por si só, um fenômeno estocástico, já que depende tanto de características de materiais como do próprio sistema. Sendo assim, uma alta variabilidade de resultados pode ser esperada em duas avaliações do mesmo material.

Evidentemente que as equações propostas para desgaste e ruído, com base no projeto fatorial, podem estar carregando consigo os erros experimentais. Assim, devido aos resultados obtidos, recomenda-se uma revisão completa da aquisição e do processamento de dados dos procedimentos de medida envolvidos, antes que seja tomada qualquer outra medida relativa às equações em si.

Com respeito ao projeto fatorial, pode-se lembrar que em função dos altos custos experimentais, adotou-se um projeto fatorial de dois níveis. Para melhorar a precisão das equações e aproximá-las ainda mais do comportamento real seria aconselhável elevar o número de níveis do projeto fatorial, por exemplo, 3^k ou 4^k . Este procedimento nos levaria a admitir iterações de ordem superior, o que acarretaria numa melhora considerável na precisão.

Evidentemente o número de experimentos se elevaria muito, devido ao aumento do número de níveis.

Neste processo em particular, variando-se o número de níveis para 3^3 teríamos 27 experimentos ou, para 4^3 , 64 experimentos.

Outro aspecto a ser discutido é que consideraram-se apenas três elementos químicos variáveis na formulação. À medida em que se eleva este número é possível aproximar-se cada vez mais da realidade da mistura de uma pastilha de freio e, também, aproximar-se a relação que existe entre os componentes e o grau de mudança que esta iteração implica no resultado final de cada parâmetro. Evidentemente que o número de experimentos aumenta significativamente à medida que se modificam os níveis de iteração e o número de variáveis simultaneamente. Como exemplo, se forem tomados quatro componentes químicos ao invés de três e admitidos três níveis de variação, devem ser gerados 81 experimentos para cobrir todas as possíveis variações de composição. Ao usar quatro níveis, sube-se este número para 256 experimentos.

Outra maneira é substituir as equações referentes ao desgaste e ao ruído médio por outras de melhor precisão, que não necessariamente devem ter sido criadas usando-se o projeto fatorial. Esta é uma possibilidade real, já que o método dos algoritmos genéticos não faz distinção entre métodos de obtenção das equações.

Como um primeiro passo os valores de erro do algoritmo são muito interessantes quando se imagina que o projetista da formulação pode estabelecer, sem sair de sua mesa, o que ele vai obter em laboratório.

Do ponto de vista da engenharia, sabe-se que as equações podem ser melhoradas ou até substituídas, desde que haja interesse e disposição financeira para assumir os custos derivados da elevação significativa do número de experimentos ou da substituição das equações por outras, criadas com diferentes métodos.

Capítulo IX

Conclusões

O grande objetivo deste trabalho foi propor um método de construir as funções representativas de quatro parâmetros de interesse na formulação de materiais de atrito e submeter estas equações a um processo de otimização simultânea, a fim de atender a todos os requisitos de engenharia. A inovação proposta pela pesquisa reside no fato de incluir o nível de ruído como requisito e, também, de usar Algoritmos Genéticos como ferramenta de otimização.

Os parâmetros que este trabalho se propôs a estudar são todos interdependentes das condições do próprio sistema de freio, ou seja, dependem das condições do disco de freio, da geometria do sistema e da própria pastilha. Desta forma, foi necessário escolher um sistema e executar os procedimentos experimentais usando sempre discos de freio novos. Outro aspecto restritivo foi a escolha dos limites máximo e mínimo para os percentuais em massa de cada componente envolvido na formulação. Eles foram definidos segundo diretrizes baseadas na experiência dos engenheiros químicos e que garantiram a criação de pastilhas que atendessem a critérios mínimos de segurança e pudessem ser testadas. No entanto, se houver o interesse em manter experimentos fatoriais como procedimento para criar as equações de cada parâmetro, se faz necessário ir além destes limites para que se possa validar estatisticamente o

comportamento destes parâmetros usando limites mais abrangentes. Por outro lado, se o método for mudado, usando equações empíricas, por exemplo, os limites poderão ser alterados sem prejuízo ao método de otimização em si.

Todas as equações utilizadas neste trabalho, exceto o custo, foram criadas de uma forma estatisticamente controlada, através do uso de projeto fatorial. Este processo demandou cerca de 16 experimentos para alcançar a função objetivo como apresentada no Capítulo 6, o que representa um número elevado tendo-se em vista os custos envolvidos.

Uma vez que os resultados finais tenham sido alcançados pela otimização, podem ser avaliados do ponto de vista da precisão e eventuais correções nas funções podem ser implementadas com segurança, já que se sabe todas as etapas do processo de obtenção das mesmas.

Para o propósito de otimização, o método dos Algoritmos Genéticos (AGs) foi escolhido dentre uma série de métodos, inclusive com características derivativas. A razão para escolher Algoritmos Genéticos em detrimento de outro método qualquer é que este dispensa que as equações sejam diferenciáveis e contínuas no intervalo de otimização, o que não limita o método ao tipo de equações usadas. Outra importante razão é que os Algoritmos Genéticos dispensam treinamento e prestam-se a otimizar uma grande variedade de equações sem estar preso a condições de contorno ou variações amplas do problema.

Por outro lado, os AGs são extremamente flexíveis devido ao fato de os operadores genéticos não terem limitações baseadas na biologia, ou seja, o criador do algoritmo tem liberdade de adaptar seus operadores conforme a necessidade de sua otimização.

Do ponto de vista de convergência, os testes realizados mostram que o algoritmo foi capaz de encontrar os valores mínimos de cada equação com precisão bastante satisfatória. Este fato atestou a capacidade do algoritmo em buscar a minimização de cada função em separado.

Os erros experimentais apresentados pelas funções de custo e atrito médio foram pequenos. Este fato deve-se a boa representação do fenômeno pela equação, ou seja, os critérios admitidos no projeto fatorial comprovam-se.

Se considerados puramente sob a ótica da engenharia, os erros fornecidos pelas funções de desgaste e nível de ruído foram elevados. Para explicar este fato, devem ser observadas quatro idéias centrais:

- Os procedimentos experimentais apresentam erros elevados e devem ser revistos;
- A consideração de apenas dois níveis no projeto fatorial pode ser insuficiente;
- O número de componentes avaliados em cada uma das funções é bastante limitado;
- O impacto dos componentes não avaliados sobre os requisitos de engenharia em cada mistura é desconhecido.

Conforme comentado no Capítulo 8, ficou claro que existe uma grande possibilidade de terem sido negligenciados erros de ordem experimental. Já que avaliar os erros experimentais e aplicar uma correção cabível aos equipamentos acarretaria custo e tempo elevados, confiou-se na precisão destes. A recomendação neste caso é para que se avaliem as condições de aquisição de dados e dos procedimentos mecânicos dos equipamentos envolvidos e se executem as devidas correções para garantir a redução da variabilidade experimental.

A questão dos níveis adotados no projeto fatorial talvez seja o ponto mais relevante. A base para adoção de apenas dois níveis para o projeto fatorial foi calcada na questão custo de testes experimentais. O ponto central é que se admitiu com isso um comportamento linear

entre as iterações. A Figura 9.1 ilustra a possível diferença entre o comportamento de um projeto 2^k e um 3^k .

Vê-se, pela Figura 9.1, que a precisão e a sensibilidade de resposta das equações aumenta consideravelmente quando for aumentado o número de níveis na análise. Isto ocorre porque, com a elevação do número de níveis, admite-se comportamentos não lineares. Como já discutido, aumenta também o número de experimentos necessários para cobrir esta variação. Assim, um aumento do número de níveis poderia levar a concluir se a falta de precisão vista nos resultados experimentais deve-se apenas ao fato de ter-se usado apenas dois níveis ou se o número de componentes químicos em cada equação também deva ser alterado.

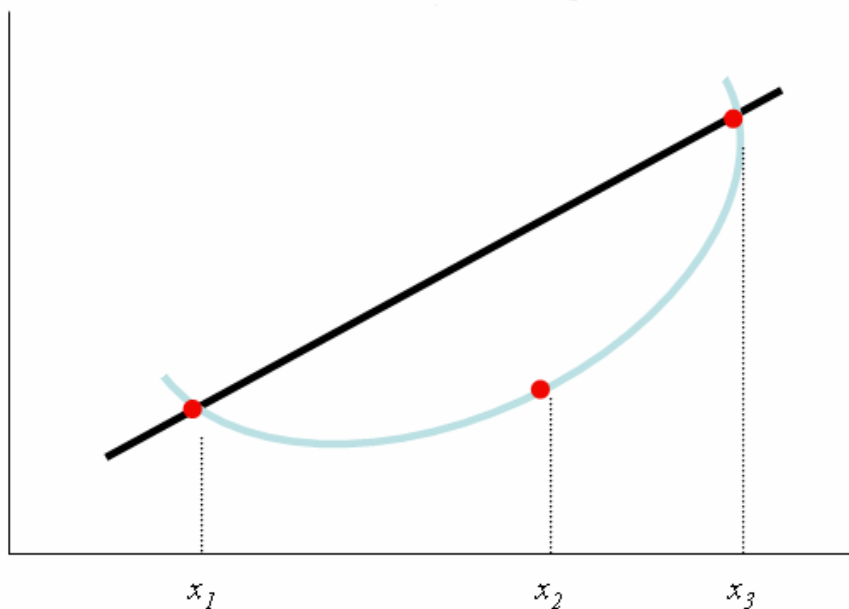


Figura 9.1 : Efeito dos níveis x_n no comportamento das iterações.

O outro aspecto que induz possíveis erros nas funções de desgaste e ruído é o número de componentes químicos incluídos na otimização. É sabido que existem interações entre os componentes e que, em alguns casos, esta interação possui certa sensibilidade.

Novamente por razões de custo vinculadas ao número de experimentos, adotaram-se três componentes químicos de diferentes grupos que, pela experiência prática, mostravam-se mais relevantes aos parâmetros globais que se desejava otimizar. Evidentemente que não existem comprovações efetivas de que interações ou mesmo componentes isolados que não foram computados no equacionamento tenham influências mais expressivas do que as consideradas nas premissas do projeto fatorial. Por estas razões, e pela complexidade de composição de pastilhas de freio, é de vital importância que este estudo tenha prosseguimento.

Pela simples observação dos tipos de componentes utilizados para criar uma pastilha de freio, vê-se que podem existir mudanças relativas ao próprio funcionamento do sistema. Pode-se ter, por exemplo, a queima de orgânicos na superfície da pastilha de freio, o que acabaria por expor os inorgânicos ou outros elementos que causem influência sobre o ruído e sobre o desgaste.

De qualquer forma, o método discutido neste trabalho, bem como as equações apresentadas, mostraram que é possível e aceitável abordar o problema de um ponto de vista macro, ou seja, medindo-se os parâmetros de projeto de uma pastilha ao invés de suas características micro-estruturais ou tribológicas.

E, sob a ótica da orientação experimental, este trabalho mostrou que é extremamente vantajoso e econômico partir da criação de uma pastilha de freio composta com o uso de um aplicativo baseado em Algoritmos Genéticos e depois refinar a composição, baseando-se na experiência do engenheiro químico. Além do mais, embora tenham sido encontrados erros, poder predizer quatro requisitos de engenharia, sem a criação de nenhum corpo de prova, é bastante interessante.

Melhor ainda se as equações forem refinadas, os erros experimentais reduzidos e o conjunto de equações for aumentado para incluir outros componentes e até mesmo outros parâmetros de interesse à indústria de materiais de atrito.

Por todas estas razões e pelo resultado geral deste trabalho, entende-se que esta linha de pesquisa é muito promissora e, se expandida com bases científicas, será capaz de simular a formulação e os testes de um material de atrito de forma satisfatoriamente precisa.

Capítulo X

Sugestões Para Trabalhos Futuros

Tendo em vista os resultados animadores desta pesquisa, podem-se salientar algumas direções para que se possa progredir ainda mais, incorporando novas equações ou novos elementos químicos às formulações.

Como primeiro passo, recomenda-se o refinamento das equações atuais por meio da elevação do número de níveis. Este fato deverá produzir um aumento significativo na precisão das equações que apresentaram maiores erros percentuais.

Uma segunda sugestão é aumentar o número de componentes químicos a fim de cercar o problema referente à interação química entre componentes. Com este procedimento espera-se melhorar a capacidade de prever as eventuais interações químicas entre componentes que não foram considerados anteriormente. Além disso, este fato aumentará o poder de otimização e controle do químico sobre sua formulação.

Outra consideração bastante oportuna é aumentar o número de equações, ou seja, adicionar novos parâmetros a serem controlados pelo algoritmo. Esta modificação produziria um grande avanço, pois permitiria ao químico escolher dentre vários parâmetros possíveis aqueles que interessam ao seu problema específico.

Por último, sugere-se um avanço no próprio algoritmo. Este avanço seria representado pela união de duas formas de inteligência artificial: Redes Neurais e Algoritmos Genéticos. A união destas duas ferramentas possibilitaria o treinamento de determinadas partes do algoritmo genético mediante o uso de dados arquivados pela empresa. Este treinamento poderia direcionar e refinar a busca do algoritmo ou até mesmo estabelecer parâmetros de controle baseados em diversos sistemas de freios e condições geométricas de pastilhas.

Entende-se que estas sugestões, implementadas em conjunto, proporcionariam uma ferramenta de alto desempenho, capaz de formular e prever resultados experimentais baseados tanto na experiência do químico como nos dados compilados durante anos de experiências e formulações realizadas pela empresa.

Referências Bibliográficas

- [1] **ABDELHAMID**, M.K. *Measurement and Signal Analysis Techniques for Brake Noise*. SAE. Technical Paper N° 95A4025.pg. 185-191.
- [2] **ABDO**, J. A.; **FARHANG**, K. *Theoretical Modeling and Experimental Techniques to Study of Contact Load Ratio – Friction Function*. 15th ASCE Engineering Mechanics Conference. Columbia University. New York. 2002. pg. 1-10.
- [3] **ANDRIEU**, C.; **BREYER**, L. A.; **DOUCET**, A. *Convergence of Simulated Annealing using Foster-Lyapunov Criteria*. Technical Report.
In : <http://www.lbreyer.com/preprints/ANNEAL.pdf>
- [4] **ANDRICIOAEI**, I.; **STRAUB** , J. E. *Generalized Simulated Annealing Algorithms Using Tsallis Statistics : Application to Conformational Optimization of a Tetrapeptide*. The American Physical Society. V 53. N° 4. 1996.
In : <http://people.bu.edu/straub/pdffiles/pubs/PRE.53.3055.1996.pdf>
- [5] **BAILLET**, L.; **BERTHIER**, Y.; **LAULAGNET**, B. *Modelling of the Origin of Tribological Noises – Application to a Brake System*. The 2002 International Congress and Exposition on Noise Control engineering. Miami. USA. 2002
- [6] **BALLINGER**, R. S.; **DUNLAP**, B.; **KUNG**, S. *Complex Eigenvalue Analysis for Reducing Low Frequency Brake Squeal*. SAE. Technical Paper N° 0444. January. 2000.
- [7] **BITTENCOURT**, G. *Inteligência Computacional*. Monografia de Especialização em Controle e Automação. Departamento de Automação e Sistemas. UFSC. 2000.

- [8] **BLAU, P. J.** *Composition, Functions and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives*. OAK Ridge National Laboratory. Internal Report. 2001. pg. 1-29.
- [9] **BORCHERT, T.** *Dynamical Behavior of the Disc Brake Pad*. SAE. Technical Paper N° 912656. 1991.
- [10] **BOWRON, S.** *Composite Materials in Transport Friction Applications – A Critical UK Industry Review*. Transport Office. UK Transport Division. 1990.
- [11] **BRECHT, J.; SCHINFFNER, K.** *Influence of Friction Law on Brake Creep-Groan*. Proceedings of the 19th Annual SAE Brake Colloquium & Engineering Display. New Orleans. 2001. pg. 107-117.
- [12] **CAMP, C.; PEZESHK, S.; CAO, G.** *Optimized Design of Two-Dimensional Structures Using a Genetic Algorithm*. Journal of Structural Engineering. 1998. pg. 551-559.
- [13] **CANTÚ-PAZ, E.** *On Random Numbers and the Performance of Genetic Algorithms*. In : <http://gal4.ge.uiuc.edu/~cantupaz/publications/gecco02-random.pdf>.
- [14] **CASTRO, P. M. M.** *Método de Taguchi: Controlo de Qualidade com Recurso não Convencional ao Desenho Estatístico de Experiências (DOE)*. Instituto Português de Administração de Marketing. Lisboa. 2001. In: <http://www.ine.pt/prodserv/estudos>
- [15] **CASTRO, R. E.** *Otimização de Estruturas com Multi-Objetivos via Algoritmo Genéticos*. UFRJ. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro. 2001.
- [16] **CHIKAMORI, S.** *Study on Brake Noise*. Nagoya Motor Vehicle. Relatório Interno. January. 1968. pg. 35-45.
- [17] **CHO, M. H.; BAE, E. G.; JANG, H. et al.** *The Role of Raw Material Ingredients of Brake Linings on the Formation of Transfer Film and Friction Characteristics*. Proceedings of the 19th SAE Annual Brake Colloquium & Engineering Display. New Orleans. 2001. pg. 49-54.

- [18] **CLAUMANN, C. A.** *Modelagem Dinâmica e Controle de Processos Não Lineares: Uma Aplicação de Algoritmos Genéticos para Treinamento de Redes Neurais Recorrentes*. Dissertação de Mestrado. UFSC. Florianópolis. 1999.
- [19] **COELLO, C. C.; HERNÁNDEZ, F. S.; FARRERA, F. A.** *Optimal Design of Reinforced Concrete Beams Using Genetic Algorithms*. Elsevier Science. 1997. pg. 101-108.
- [20] **COHEN, B.** *Training Synaptic Delays in a Recurrent Neural Network*. M.Sc. Thesis. Tel-Aviv University. 1994.
- [21] **CORRÊA, E. S.** *Algoritmos Genéticos e Busca TABU Aplicados ao Problema das P-Medias*. Dissertação de Mestrado. UFPR. Curitiba. 2000.
- [22] **DANTE, R.; FERNANDÉZ, M. C.; RIVACOBÉ, D.** *Development of a Friction Material Formulation without Metals by Taguchi Design of Experiments*. SAE. Technical paper N° 2000-01-2754. 2000.
- [23] **DE CASTRO, L. N.; ZUBEN, F. G. V.** *Artificial Immune Systems: Part I – Basic Theory and Applications*. Technical Report. TR-DCA 01/99. December. 1999. In: http://www.dca.fee.unicamp.br/~vonzuben/research/lnunes_dout/relatorios/rtdca0199.pdf
- [24] **DE JONG, K. A.**, *An Analysis of the Behavior of a class of Genetic Adaptive System*. Ph.D. Thesis. University of Michigan. Ann Arbor. MI. 1975.
- [25] **DIMAROGONAS, A.** *Vibration for Engineers*. Prentice Hall. Second Edition. New Jersey. 1996.
- [26] **DUNLAP, K. B.; RIEHLE, M. A.; LONGHOUSE, R. E.** *An Investigative Overview of Automotive Disc Brake Noise*. SAE. Technical Paper N° 010142. October. 1999.

- [27] **EARLES, S. W.; BADI, M. N. M.** *On the Interaction of a Two-Pin-Disc System with Reference to the Generation of Disc Brake Squeal*. SAE. Technical Paper N° 780331. March. 1978.
- [28] **EARLES, S. W. E.; CHAMBERS, P. W.** *Disc Brake Squeal Noise Generation: Predicting its Dependency on System Parameters Including Damping* – Interscience Enterprises. U.K. 1986. pg. e25-e41.
- [29] **ELMOHAMED, S.; CODDINGTON, P.; FOX, G.** *A Comparison of Annealing Techniques for Academic Course Scheduling*. Northeast Parallel Architectural Center. Syracuse. NY. 1997.
In : www.npac.syr.edu/users/paulc/papers/patat97/patat97.ps.gz
- [30] **ELZEY, D. M.; VANCHEESWARAN, R.; MYERS, S.; McLELLAN, R.** *Multi-Criteria Optimization in the Design of Composites for Friction Applications*. Brakes 2000 – International Conference on Automotive Braking : Technologies for the 21st Century. Professional Engineering Publishing. Great Britain. 2000.
- [31] **ELZEY, D. M.; VANCHEESWARAN, R.; MYERS, S.; McLELLAN, R.** *Intelligent Selection of Materials for Brake Linings*. SAE. Technical paper N° 2000-01-2779. 2000.
- [32] **ERIKSSON, M.; JACOBSON, S.** *Tribological Surfaces of Organic Brake Pads*. Tribology International. 2000. pg. 817-827.
- [33] **ERIKSSON, M.; BERGMAN, F.; JACOBSON, S.** *Surface Characterisation of Brake Pads After Running Under Silent and Squealing Conditions*. Wear. 1999. pg. 163-167.
- [34] **ERIKSSON, M.** *Friction and Contact Phenomena of Disc Brakes Related to Squeal*. Comprehensive Summary of PhD. Thesis. ACTA Universitatis Upsaliensis. Uppsala. 2000.

- [35] **EWINS**, D. J. *Modal Testing : Theory and Practice*. Research Studies Press. London. April. 1986.
- [36] **FELSKE**, A.; **HOPPE**, G.; **MATTHÄI**, H. *Oscillations in Squealing Disk Brakes – Analysis of Vibration Modes by Holographic Interferometry*. SAE Technical Paper N° 780333. 1978. pg. 1-20.
- [37] **FERREIRA**, C. *Mutation, Transposition, and Recombination: An Analysis of the Evolutionary Dynamics*. Proceedings of the 6th Joint Conference on Information Sciences and 4th International Workshop on Frontiers in Evolutionary Algorithms. pg. 614-617. In: <http://www.gene-expression-programming.com/webpapers/ferreira-fea02.pdf>
- [38] **FERREIRA**, R. C. R.; **JOÃO**, R. C. *Planejamento e Otimização de Experimentos via Método Taguchi: Uma Aplicação no Processo de Cromação de Anéis*. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. 2001.
In : <http://www.iem.efei.br/dpr/td/dezembro2001/resumos.htm>
- [39] **FIELDHOUSE**, J.D.; **NEWCOMB**, T.P. *An Experimental Investigation into Disc Brake Noise*. Imech – C444/036/93. 1993. pg. 145-159.
- [40] **FIELDHOUSE**, J.D. *A Study of the Interface Pressure Distribution Between Pad and Rotor, the Coefficient of Friction and Caliper Mounting Geometry with Regard to Brake Noise*.
- [41] **FLINT**, J.; **HULTÉN**, J. *Lining-Deformation-Induced Modal Coupling as Squeal Generator in a Distributed Parameter Disc Brake Model*. Journal of Sound and Vibration. 2002. pg. 1-21.
- [42] **FURMANIK**, K. *Experimental Investigations of Self-Excited Friction Vibrations Into a Friction Brake*. 5th Mini Conference on Vehicles System Dynamics, Identification and Anomalies. Budapest. November. 1996. pg. 547-555.

- [43] **GOLDBERG, D.E.** *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley Longman, Inc. USA. 1989.
- [44] **GONÇALVES, J.** *Geração de Ruído de Alta Frequência em Sistemas de Freio a Disco*. Dissertação de Mestrado. UFSC. 2001.
- [45] **GUIMARÃES, F. G.; RAMALHO, M. C.** *Implementação de um Algoritmo Genético*. Trabalho da Disciplina de Otimização. Curso de Eng. Elétrica. UFMG. 2001.
- [46] **GREG, P.; NASHIF, A.** *Controlling Disc Brake Noise with Constrained Layer Damping*. SAE Technical Paper. 1998. pg. 29-35.
- [47] **HARTOG, J. P. D.** *Vibrações nos Sistemas Mecânicos*. Ed. Edgard Blucher LTDA. SP. 1972.
- [48] **HARRIS, C. M.; CREDE, C. E.** *Shock and Vibration Handbook*. Ed. McGraw Hill. 1976.
- [49] **HEPPES, P.** *Brake Squeal Reduction by the Design of the Interface Calliper – Friction Pads – Brake Shoe Holder*.
- [50] **HOFMANN, T.; BUHMANN, J. M.** *Pairwise Data Clustering by Deterministic Annealing*. In : <http://www.cs.brown.edu/people/th/papers/HofmannBuhmann-PAMI97.pdf>
- [51] **HOLLAND, J. H.**, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press. Michigan. USA. 1975.
- [52] **HOLLMAN, M.** *Brake Noises, Their Causes and Some Methods for Their Elimination*. A.T.Z. N° 3. Vol 56. March 1954.
- [53] **HOLUBECKI, Z.; FOSBERRY, R.C.A.** *An Investigation of the Cause and Nature of Brake Squeal*. SAE. Technical Paper N° 0895. June. 1955.

- [54] **HOLUBECKI, Z.; FOSBERRY, R. C. A.** *Some Experiments on the Prevention of Brake Squeal*. SAE. Technical Paper N° 0332. January. 1957.
- [55] **INGBER, L.; ROSEN, B.** *Genetic Algorithms and Very Fast Simulated Reannealing: A Comparison*. In : http://www.ingber.com/asa92_saga.pdf
- [56] **KALLASSY, A.; MARCELIN, J. L.** *Optimization of Stiffened Plates by Genetic Search*. 1997. pg. 134-141.
- [57] **KARMI, R. J.** *A Preliminary Dynamic Model of Brake Friction Using Pressure and Temperature*. Proceedings of the 19th Annual SAE Brake Colloquium & Engineering Display. New Orleans. 2001. pg.159-166.
- [58] **KAWASH, J.; MANSOUR, N.; DIAB, H.** *General Applicability of Genetic and Simulated Annealing Algorithms for Data Mapping*.
In : <http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~kawash/papers/pdcs95.pdf>
- [59] **KEANE, A. J.** *Passive Vibration Control via Unusual Geometries : The Application of Genetic Algorithm Optimization to Structural Design*. Journal of Sound and Vibration. 1995. pg. 441-453.
- [60] **LEE, A.** *Diagnosis of Noise and Vibration Problems During Braking*. ISATA Magazine. January. 1997. pg. 8-10.
- [61] **LEE, G. Y.; DHARAN, C. K. H.; RITCHIE, R. O.** *A Physically-Based Abrasive Wear Model for Composite Materials*. pg. 1-29.
In : <http://www.lbl.gov/Ritchie/Library/PDF/Gun.pdf>
- [62] **LEE, H.; SINGH, R.** *Vibro-Acoustics of a Brake Rotor with Focus on Squeal Noise*. The 2002 International Congress and Exposition on Noise Control engineering. Miami. USA. 2002

- [63] LIU, W.; PFEIFER, J. *Reducing High Frequency Disc Brake Squeal by Pad Shape Optimization*. SAE Technical Paper N° 2000-01-0447. 2000. pg. 1-7.
- [64] LUKE, S.; SPECTOR, L. *A Revised Comparison of Crossover and Mutation in Genetic Programming*. In : <http://www.cs.umd.edu/users/seanl/papers/revisedgp98.pdf>
- [65] LOH, W.; BASCH, R. H.; LI, D.; SANDERS, P. *Dynamic Modeling of Brake Friction Coefficients*. Proceedings of the 18th Annual SAE Brake Colloquium & Engineering Display. USA. 2000. pg.7-16.
- [66] LONGLEY, J. W.; GARDNER, R. *Some Compositional Effects in the Static and Dynamic Properties of Commercial Vehicle Disc Brakes*. ImechE. Paper N° C453/88. 1988. pg. 31-38.
- [67] LOUIS, S. J.; RAWLINS, G. J. E. *Syntactic Analysis of Convergence in Genetic Algorithms*. In : <http://www.cs.unr.edu/~sushil/papers/conference/conf.html>
- [68] LUCAS, D. C. *Algoritmos Genéticos: Um Estudo de Seus Conceitos Fundamentais e Aplicação no Problema de Grade Horária*. Trabalho Final de Graduação. UFPEL. 2000.
- [69] MATOUSEK, R. *Realisation of Fuzzy-Adaptative Genetic Algorithms in a MatLab Environment*. In : <http://phobos.vscht.cz/matlab01/matousek.pdf>.
- [70] MAWHINNEY, D. *Preventing Early Convergence in Genetic Programming by Replacing Similar Programs*. In : <http://goanna.cs.rmit.edu.au/~vc/gp.html>
- [71] MIGNERY, L.; WANG, J.; LUO, J. *Prediction of Damper Effects in a Brake System Model*. Proceedings of the 19th SAE Annual Brake Colloquium & Engineering Display. New Orleans. 2001. pg. 119-126.
- [72] MIGNERY, L. A.; NASHIF, A. D. *Prediction of Damping Treatment Dynamics as Bonded to a Brake Shoe and Lining*. Proceedings of the 17th SAE Annual Brake Colloquium & Engineering Display. USA. 1999. pg. 95-100.

- [73] **MILLNER**, N. *An Analysis of Disc Brake Squeal*. SAE. Technical Paper N° 780332. March. 1978.
- [74] **MIRANDA**, M. N. *Algoritmos Genéticos : Fundamentos e Aplicações*. In : www.gta.ufrj.br/~marcio/genetic.html.
- [75] **MONTGOMERY**, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. J.W.&Sons. Fourth Edition. New York. 1999.
- [76] **NICHOLSON**, G. *Facts About Friction*. P&W Price Enterprises, Inc. USA. 1995. pg. 167-186.
- [77] **NISHIWAKI**, M. *Generalized Theory of Brake Noise*. I.Mech.E. Technical Paper N° D02392 . 1993. pg. 195-202.
- [78] **NOISSER**, T. A., **SAID**, M. A. R.; **EL NAHAS**, N. S. et al. *Significance of Squeal in Disc Brake Design*. International Journal of Vehicle Design, v.19, N° 01, 1998, pg. 124-133.
- [79] **NORTH**, M. R. *Disc Brake Squeal – A Theoretical Model*. MIRA . Technical Report N° 1972/5. 1972.
- [80] **NORTH**, M. R. *Frictionally Induced Self Excited Vibration in a Disc Brake*. Ph.D. Thesis. Loughborough University. January. 1972.
- [81] **OUYANG**, H. et al. *Dynamic Instabilities in a Simple Model of a Car Disc Brake*. Proceedings of the 17th SAE Annual Brake Colloquium & Engineering Display. USA. 1999. pg. 117-128.
- [82] **PAPINNIEMI**, A.; **LAI**, J. C. S; **ZHAO**, J.; **LOADER**, L. *Brake Squeal : a literature review*. Applied Acoustic. 2002. pg. 391-400.

- [83] **PARDUS, J. e NASHIF, A.** *Controlling Disc Brake Noise With Constrained Layer Damping*. MSC Laminates and Composites Inc, USA, 1998, pg. 29-35.
- [84] **PERSSON, B. N. J.** *Theory of Friction : on the origin of the stick-slip motion of lubricated surfaces*. Chemical Physics Letters. May. 1996. pg.114-121.
- [85] **PITTMAN, J. L.** *Adaptative Splines and Genetic Algorithms for Optimal Statistical Modeling*. Ph.D. Thesis. In : <http://etda.libraries.psu.edu/theses/available/etd-0426100-155225/unrestricted/etd.pdf>
- [86] **POMPON, J. P.** *The Brake Disc Manual*. Brembo Italy. 1998.
- [87] **PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.** *Numerical Recipes In C : The Art of Scientific Computing*. 1992. pg. 444-455.
In : http://www.ulib.org/webRoot/Books/Numerical_Recipes/bookcpdf/c10-9.pdf
- [88] **RATLE, A.; BERRY, A.** *Use of Genetic Algorithms for the Vibroacoustic Optimization of a Plate Carrying Point-masses*. Acoustical Society of America. December. 1998. pg. 3385-3397.
- [89] **RIBEIRO, J. L. D.** *Projeto de Experimentos na Otimização de Produtos e Processos*. Apostila. Pós-Graduação em Engenharia de Produção. UFRGS. 1995.
- [90] **RICHMOND, J. W.; KAO, T.** *The Application of Predictive Techniques to Study Thermo-elastic Instability of Brakes*. SAE. Technical Paper N° 942087. 1994.
- [91] **ROSS, P. J.** *Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade*. McGraw-Hill. 1991. São Paulo.
- [92] **SANDIKCI, B.** *Genetic Algorithms*. In: http://www.op.dlr.de/FF-DR/dr_mkd/staff/weiss/papers/gaintro.pdf

- [93] **SINGH, R.; SHEIKH, A. A.; MITCHELL, M. J.** *Viscoelastic Damping to Control Disc Brake Squeal*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 32. N° 10. October 1998. pg. 18-22.
- [94] **SOREMEKUN, G. A. E.** *Genetic Algorithms for Composite Laminate Design and Optimization*. M.Sc. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. 1997. In : <http://scholar.lib.vt.edu/theses/public/etd-4246173049751491/etd.pdf>
- [95] **SUOEKA, A.; YOSHITAKE, Y.; TAMURA, H.; TAKAYAMA, Y.** *Self-Excited Vibration of a Circular Plate Subjected to a Frictional Forces Exerted in Two Regions on Its Outer Circunference*. Bulletin of JSME, v.29, N° 256, October, 1986, pg. 3499-3504.
- [96] **TEITELBAUM, B. R., SUTTLE, W. C.; SUNG, C. B.** *Instrumentation Techniques for Brake Noise Investigation*. SAE. Technical Paper N° 650488. May. 1965.
- [97] **TIAN, J.; HUTTON, S. G.** *Self-excited Vibration in Flexible Rotating Disks Subjected to Various Transverse Interactive Forces : a General Approach*. Journal of Applied Mechanics, v. 66, September, 1999, pg. 800-805.
- [98] **TREVISAN, M.** *Métodos de Otimização para a Determinação da Estrutura de Átomos e Moléculas*. Trabalho de Graduação N° 61. UFSM. 1999.
- [99] **TRICHES, M. Jr. et al.** *Application of Constrained Layer Material on the Reduction of Disc Brake Noise*. The 2002 International Congress and Exposition on Noise Control engineering. Miami. USA. 2002
- [100] **UESAKA, Y.** *Foundations of real-world intelligence*. Center for the Study of Language and Information. Stanford University. 2001.
In: <http://ais.gmd.de/~mahnig/publications/MueMa01d.pdf>
- [101] **WAGENFÜHRER, H.** *Noise from Brakes*. MIRA Report. August. 1964.pg. 1-20.

- [102] **WANG, B. P.; CHEN, J. L.** *Application of Genetic Algorithm for the Support Location Optimization of Beams*. Elsevier Science. 1996. pg.797-800.
- [103] **WATSON, C.; MILLSAP, T.** *Friction Material; from Prototype to Production*. Proceedings of the 17th SAE Annual Brake Colloquium & Engineering Display. USA. 1999. pg. 13-18.
- [104] **WU, A. S.; DE JONG, K. A.; BURKE, D. S.; GREFENSTETTE, J. J.; RAMSEY, C. L.** *Visual Analysis of Evolutionary Algorithms*.
In : <http://www.jhsph.edu/cir/cec99.pdf>
- [105] **YANG, J.; SOH, C. K.** *Structural Optimization by Genetic Algorithms with Tournament Selection*. Journal of Computing in Civil Engineering. 1997. pg. 195-200.
- [106] **YAP, A. Y. C.; COSIC, I.** *Comparison of a Genetic Algorithm versus Annealing for Predicting a Tertiary Structure of Peptide Chain*. Monash University. Australia.
In : <http://www.eng.monash.edu.au/ieee/ieebio1999/p207.htm>
- [107] **YIM, D.; XU, Y.** *Brake Noise Data Acquisition and Analysis System*. Proceedings of the 16th Annual SAE Brake Colloquium & Engineering Display. USA. 1998. pg.105-107.
- [108] **YUAN, Y.** *Lining Selection with Surrogate Brakes*. Proceedings of the 19th Annual SAE Brake Colloquium & Engineering Display. USA. 2001. pg.13-22.
- [109] **ZAFFIRO, P. A.** *Understanding and Solving Mechanical Instabilities*. Sound and Vibration Magazine. v.31. September. 1997.
- [110] *Introduction to Genetic Algorithms* In : www.rennard.org/alife/english/gavintrgb.html
- [111] *Introduction to Genetic Algorithms* In : <http://cs.felk.cvut.cz/~xobitko/ga/>
- [112] *Algoritmos Genéticos* In : www.geocities.com/igoryepes/visualizar.htm

- [113] *AK-Master (Arbeits Kreiss)*. AK Noise Performance. Europa.
- [114] *Método Fras-le de Avaliação de Desgaste e Coeficiente de Atrito – MF80930*. Fras-le S/A.
- [115] *SAE J661 – Brake Lining Quality Test Procedure*. Revision February 1997. Developed by the SAE Brake Standards Committee 2 – Brake Linings.
- [116] *ATE N543.27.00 – Product Specification – Disc Brake Pads*. Revision January 2003. Continental Teves AG. & Co. OHG.