

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE PRODUÇÃO**

GEREMIAS SEVERINO

**OTIMIZAÇÃO DO TORNEAMENTO VERTICAL DE ANÉIS
DE PISTÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO
MARTENSÍTICO UTILIZANDO FERRAMENTA DE METAL
DURO COM GEOMETRIA ESPECIAL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Produção*.

Orientador: Prof. João Roberto Ferreira, Dr.

Co-orientador: Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr.

Setembro de 2011

Itajubá – MG

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Cristiane Carpinteiro- CRB_6/1702

S498o

Severino, Geremias

Otimização do torneamento vertical de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico utilizando ferramenta de metal duro com geometria especial / por Geremias Severino -- Itajubá (MG) : [s.n.], 2011.
128 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. João Roberto Ferreira.

Coorientador : Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Torneamento vertical. 2. Ferro fundido cinzento martensítico. 3. Geometria de corte especial. 4. Otimização. I. Ferreira, João Roberto, orient. II. Paiva, Anderson Paulo de, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE PRODUÇÃO**

GEREMIAS SEVERINO

**OTIMIZAÇÃO DO TORNEAMENTO VERTICAL DE ANÉIS
DE PISTÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO
MARTENSÍTICO UTILIZANDO FERRAMENTA DE METAL
DURO COM GEOMETRIA ESPECIAL**

Banca Examinadora:

Prof. Álisson Rocha Machado, PhD. (UFU)

Prof. João Roberto Ferreira, Dr. (UNIFEI)

Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr. (UNIFEI)

Prof. Pedro Paulo Balestrassi, Dr. (UNIFEI)

Setembro de 2011

Itajubá - MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, por fazer parte da minha vida. Que toda honra, toda glória seja dada a DEUS.

À minha família, pela educação e pelo exemplo de vida, em especial minha querida Mãe Rosália.

Aos meus Orientadores, Professores Dr. João Roberto Ferreira e Dr. Anderson Paulo de Paiva pela motivação, orientação, amizade, paciência e pelas importantes contribuições no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ambos pela capacidade de me fazer superar os desafios e obstáculos conciliando a vida profissional e acadêmica.

A empresa Mahle Metal Leve S.A. pelo apoio na realização desta tão sonhada conquista.

A empresa Fecial Indústria e Comércio Ltda. pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os Professores do Programa de Mestrado em Engenharia de Produção da UNIFEI, pela formação e conhecimento adquirido, em especial ao Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi.

A todos os meus amigos, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O processo de usinagem por torneamento vertical duplo do ferro fundido cinzento martensítico é de grande importância para a indústria automobilística, principalmente no processo de fabricação de anéis de pistão. O objetivo deste trabalho é demonstrar o processo de desenvolvimento de ferramentas de metal duro recobertas com vistas à maximização da taxa de produção do processo, considerando-se a máxima vida da ferramenta de corte e o mínimo custo de usinagem por peça. Utilizando-se arranjos fatoriais completos (DOE), foram testadas duas geometrias diferentes: uma ferramenta com geometria quadrada especial, formada por duas arestas e duas pontas de corte simultâneas e outra, hexagonal. Considerando-se que a geometria quadrada especial proporcionou a máxima vida, modelos quadráticos completos para as respostas de interesse foram construídos utilizando-se um arranjo composto central (CCD) para o avanço (f) e a rotação (n). Aplicando-se o algoritmo gradiente GRG, os objetivos da otimização propostos foram alcançados com avanço = 0,37mm/rot., rotação de 265 rpm para a utilização da ferramenta de geometria quadrada especial. Experimentos de confirmação comprovam a eficiência da abordagem adotada.

Palavras-chave: Torneamento Vertical Duplo; Anéis de Pistão; Ferro Fundido Cinzento Martensítico; Geometria de Corte Especial; Otimização.

ABSTRACT

The machining process for double vertical turning of martensitic gray cast iron is of great importance to the automotive industry, mainly in the manufacturing process of piston rings. The aim of this work is to demonstrate the process of development of coated carbide tools to maximize the productivity of the process, considering the maximum life of the cutting tool and the minimum machining cost per part. Using full-factorial Design of Experiments (DOE), we tested two different tool geometries were tested: a square tool with special geometry - formed by two edges and two ends simultaneous cutting - and a hexagonal tool. Considering that the special square geometry provided the maximum life, full quadratic models for responses of interest were constructed using a central composite design (CCD) for feed (f) and rotation (n). Applying the Generalized Reduced Gradient algorithm (GRG), the proposed optimization goals were achieved with feed = 0.37 mm / v, rotation of 265 rpm for the use of special square tool. Validation experiments proved the effectiveness of this solution.

Keywords: Double Vertical Turning; Piston Rings; Martensitic Gray Cast Iron; Special Cutting Geometry; Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Centro de Torneamento Vertical Romi Emag VSC 250	5
Figura 2.2 - Torneamento Vertical dos Anéis de Pistão	6
Figura 2.3 - Deflexão da Barra de Mandrilar Interno	7
Figura 2.4 - Ferramentas Interna e Externa	9
Figura 2.5 - Microdureza dos Revestimentos	15
Figura 2.6 - Principais Propriedades das Coberturas	17
Figura 2.7 - Ângulos da Ferramenta de Torneamento	18
Figura 2.8 - Quebra Cavacos	21
Figura 2.9 - Desgaste da Ferramenta de Corte	23
Figura 2.10 - Desgaste e Avaria da Ferramenta de Corte	23
Figura 2.11 - Desgaste e Avaria	24
Figura 2.12 - Representação do Anel de Pistão	27
Figura 2.13 - Célula de Potência Típica com os Anéis de Pistão	27
Figura 2.14 - Forma e Distribuição dos Veios de Grafita	38
Figura 2.15 - Estrutura do Ferro Fundido Cinzento Perlítico-Ferrítico	39
Figura 2.16 - Estrutura do Ferro Fundido Cinzento Martensítico	40
Figura 2.17 - Superfície do Ferro Fundido Cinzento Martensítico	41
Figura 3.1 - Fluxograma de Procedimento de Condução de Experimentos	47
Figura 3.2 - Gráfico do Efeito Principal X_i com Relação à Resposta y_i	51
Figura 3.3 - Gráfico de Interação	52
Figura 3.4 - Gráfico de Teste de Normalidade	52
Figura 3.5 - Arranjo Composto Central para Três Fatores	57
Figura 3.6 - Tipos de Planejamento CCD	57
Figura 3.7 - Estratégia de Otimização Experimental	59
Figura 3.8 - Método do Vetor Gradiente	60
Figura 4.1 - Torno Vertical	70
Figura 4.2 - Matriz Martensítica Revenida	71
Figura 4.3 - Torneamento Vertical dos Anéis de Pistão de FoFo Cinzento Martensítico	72

Figura 4.4 - Ferramenta Quadrada e Hexagonal	73
Figura 4.5 - Fluxograma do Método Experimental	76
Figura 4.6 - Critérios de Fim Vida da Ferramenta de Corte	80
Figura 5.1 – Experimentos	82
Figura 5.2 - Gráfico de Pareto dos Efeitos	84
Figura 5.3 - Gráfico de Pareto dos Efeitos	85
Figura 5.4 - Análise de Resíduo	86
Figura 5.5 - Efeitos Principais para Vida da Ferramenta	86
Figura 5.6 - Ponto de Ótimo, Método <i>Desirability</i>	89
Figura 5.7 - Análise de Resíduo da Vida Taxa Produção e Custo	91
Figura 5.8 - Análise de Resíduo da Vida, Taxa Produção e Custo	92
Figura 5.9 - Efeito da Interação entre Avanço e Rotação sobre a Vida da Ferramenta	94
Figura 5.10 - Efeito da Interação entre Avanço e Rotação sobre o Custo	94
Figura 5.11 - Efeito da Interação entre Avanço e Rotação sobre a Taxa de Produção	95
Figura 5.12 - Planilha Desenvolvida para encontrar Pontos de Ótimo Individuais	96
Figura 5.13 - Pontos de Ótimo Individuais para as Respostas (T, Txp e Kp)	97
Figura 5.14 - Planilha Desenvolvida para encontrar Ponto de Ótimo Múltiplo	98
Figura 5.15 - Ponto de Otimização Comum para as Respostas (T, Txp e Kp)	99
Figura 5.16 - Iterações do GRG no Plano da Vida Útil	99
Figura 5.17 - Gráfico de Controle X-bar com Intervalo de Confiança de 95% para os Experimentos de Confirmação	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Relação Comprimento / Diâmetro da Barra de Tornear	7
Tabela 2.2 - Parâmetros Estudados no Processo de Torneamento	25
Tabela 2.3 - Efeito dos Elementos Químicos na Usinagem	30
Tabela 2.4 - Faixa de Temperatura para Alívio de Tensões do Ferro Fundido Cinzento	32
Tabela 2.5 - Práticas Recomendadas para Recozimento dos Ferros Fundidos	33
Tabela 2.6 - Processo de Normalização	34
Tabela 2.7 - Processo de Têmpera e Revenido	35
Tabela 3.1 - Características Fundamentais das Principais Técnicas de DOE	48
Tabela 3.2 - Matriz de Planejamento 2 ³	49
Tabela 4.1 - Composição Química do Material	71
Tabela 4.2 - Propriedades Mecânicas do Substrato das Ferramentas de Metal Duro	73
Tabela 4.3 - Propriedades Mecânicas do Revestimento das Ferramentas	73
Tabela 4.4 - Detalhe da Geometria das Ferramentas	74
Tabela 4.5 – Características Físico-Química do ECOCOOL MH 6000	75
Tabela 4.6 - Fatores e Níveis do Fatorial Completo 2 ³	76
Tabela 4.7 - Níveis dos Fatores da Metodologia de Superfície de Resposta	78
Tabela 4.8 - Condições Técnicas e Econômicas do Processo	79
Tabela 5.1 - Planejamento Fatorial para Vida da Ferramenta (T)	82
Tabela 5.2 - Efeitos Estimados e Coeficientes da Vida da Ferramenta	83
Tabela 5.3 - Análise de Variância	83
Tabela 5.4 - Efeitos Estimados e Coeficientes da Vida da Ferramenta	84
Tabela 5.5 - Análise de Variância	85
Tabela 5.6 - Objetivos da Otimização	88
Tabela 5.7 - Matriz Experimental	90
Tabela 5.8 - Análise de Significância dos Termos Individuais dos Modelos e ANOVA	90
Tabela 5.9 - CCD para Vida, Taxa produção e Custo Usinagem	92
Tabela 5.10 - Análise de Significância dos Termos Individuais dos Modelos e ANOVA	92
Tabela 5.11 - Comparativo entre Condição Anterior versus Otimizada	100
Tabela 5.12 - Experimentos de Confirmação para Análise da Vida da Ferramenta	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Balanço da Barra de Mandrilar Interna	8
Quadro 2.2 - Classes de Metal Duro e Materiais Usinados	12
Quadro 2.3 - Classificação do Metal Duro Classe K segundo Norma ISO 513 (2004)	13
Quadro 3.1 - Objetivos de Otimização no Método de Derringer	67
Quadro 3.2 - Relações de Importância entre o Alvo e os Limites no <i>Desirability</i>	67
Quadro 4.1 - Relação entre a Geometria das Ferramentas e a Profundidade de Corte	74
Quadro 5.1 - Desgaste de Flanco das Ferramentas Hexagonal e Quadrada	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AlCrN	Nitreto de Cromo Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
ANOVA	Análise de Variância
APC	Aresta Postiça de Corte
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
CCC	Arranjo Composto Circunscrito
CCD	Arranjo Composto Central ou Box-Wilson <i>Central Composite Design</i>
CCF	Arranjo de Face Centrada
CCI	Arranjo Composto Inscrito
CI	Intervalo de Confiança
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DOE	Metodologia de Projetos de Experimentos ou <i>Design of Experiments</i>
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
Gt	Geometria da Ferramenta de Corte
ISO	Organização Internacional para Padronização
Kp	Custo por Peça Usinada
MSR	Metodologia de Superfície de Respostas
Qc	Quebra Cavaco
R-Sq (adj)	Coefficiente de Determinação Ajustado
R-Sq	Coefficiente de Determinação
T	Vida da Ferramenta de Corte
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
Txp	Taxa de Produção
Vc	Velocidade de Corte

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Distância dos Pontos Axiais em Relação aos Pontos Centrais
α_0	Ângulo de Folga
Al	Alumínio
ap	Profundidade de Corte
apt	Profundidade de Corte Total
β	Coefficiente do Modelo Matemático a ser Estimado
β_0	Ângulo de Cunha
C	Carbono
Co	Cobalto
Cr	Cromo
ε	Erro Experimental
Σ	Somatório
ε_r	Ângulo da Ponta
f	Avanço
i.C	Círculo Inscrito
l	Comprimento da Aresta
Mn	Manganês
n	Rotação
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
r_ε	Raio da Ponta
s	Espessura da Ferramenta
Si	Silício
t	Tempo
Ti	Titânio
χ_r	Ângulo de Posição
γ_0	Ângulo de Saída
λ	Auto Valor
λ_s	Ângulo de Inclinação
V	Vanádio
W	Tungstênio

*Lâmpada para os meus pés é a tua palavra,
e luz para os meus caminhos.*

Salmo 119:105

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Importância do Tema	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Contribuição do Trabalho	3
1.4. Limitações	3
1.5. Estrutura do Trabalho	4
2. FUNDAMENTOS DE USINAGEM	5
2.1. Torneamento Vertical	5
2.2. Ferramentas de Corte	10
2.3. Materiais de Ferramentas de Corte	10
2.4. Metal Duro Revestido	11
2.5. Geometria da Ferramenta de Corte	17
2.6. Desgaste e Vida da Ferramenta	21
2.7. Anéis de Pistão de Ferro Fundido Cinzento	26
2.8. Ferro Fundido Cinzento Martensítico	28
2.9. Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento Martensítico	36
3. METODOLOGIA DE PROJETO DE EXPERIMENTOS	42
3.1. Considerações Iniciais	42
3.2. Aplicação da Metodologia de Projeto de Experimentos na Usinagem	44
3.3. Técnicas de Planejamento de Experimentos	46
3.4. Planejamento Fatorial Completo 2^k	48
3.5. Análise de Variância	53
3.6. Metodologia de Superfície de Resposta	55
3.7. Arranjo Composto Central	56
3.8. Otimização de Processo	57
3.9. Otimização de uma Única Resposta	59
3.10. Ponto Estacionário	61
3.11. Gradiente Reduzido Generalizado	62
3.12. Otimização de Múltiplas Respostas	65
3.13. O Método <i>Desirability</i>	65

4. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	70
4.1. Considerações Iniciais	70
4.2. Processo de Torneamento Vertical Duplo de Anéis de Pistão	70
4.3. Ferro Fundido Cinzento Martensítico	71
4.4. Desenvolvimento das Ferramentas de Corte	72
4.5. Metodologia e Condição de Usinagem	75
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
5.1. Modelagem Matemática da Vida da Ferramenta de Corte	81
5.2. Análise de Curvatura	89
5.3. Arranjo Composto Central	91
5.4. Obtenção da Superfície de Resposta	93
5.5. Otimização	95
5.6. Otimização Individual	95
5.7. Otimização Simultânea	98
5.8. Validação dos Resultados	100
6. CONCLUSÕES	102
6.1. Conclusões Gerais	102
6.2. Sugestões para Estudos Futuros	103
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1. Introdução

1.1. Importância do Tema

As indústrias manufatureiras, cujo maior expoente é a indústria automobilística, têm sido muito estimuladas para tornar seus processos eficientes. Esta demanda advém da maior competitividade imposta pelas transformações que têm afetado a ordem econômica mundial.

O Brasil se enquadra também nesta tendência e tem experimentado profundas mudanças no seu setor produtivo no que tange a modernização de seus processos de produção, melhoria da qualidade de seus produtos e racionalização administrativa. Sendo os processos de fabricação elementos importantes para o sistema produtivo, seu maior entendimento é ponto importante para o contínuo desenvolvimento nesta área, pois são responsáveis por boa parte das operações de transformação e agregação de valor dos bens produzidos. Existem vários tipos de processos de fabricação tais como, usinagem, fundição, soldagem, metalurgia do pó, conformação, além de vários outros. Dentre os exemplos anteriores, segundo Trent e Wright (2000), a usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo. Sendo o torneamento o processo de usinagem convencional mais empregado em ambientes industriais e acadêmicos. A importância do processo de torneamento está correlacionada com sua flexibilidade frente às mudanças impostas pelo mercado, que exige peças de geometria complexa no menor tempo de processamento possível, atendendo as características de qualidade do produto.

A fabricação dos anéis de pistão do tipo raspador, alojados na 2ª canaleta do pistão, com perfil geométrico simples de ferro fundido cinzento martensítico, via de regra utiliza-se de vários tipos de processos de usinagem convencional (torneamento, fresamento, mandrilamento e retificação), sendo a representatividade do torneamento de 50% na fabricação deste tipo de anéis de pistão. Segundo Machado *et al.* (2009) apesar da popularidade dos processos de usinagem, trata-se de um processo bastante imprevisível e a definição paradoxal que se segue relata com exatidão toda sistemática que o envolve: ***“Processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produzem peças removendo-se o excesso de material na forma de cavacos”***.

É um processo complexo devido às dificuldades em determinar as imprevisíveis condições de corte. É simples porque, uma vez determinadas essas condições, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de intervenção do operador. As condições ideais de corte são capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível. A usinagem tem ainda a peculiaridade de ser um

processo essencialmente prático e que envolve um elevado número de variáveis. O torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico é um processo que apresenta vários parâmetros de controle entre eles: (avanço, rotação e geometria da ferramenta de corte e múltiplas variáveis de resposta entre eles: (vida da ferramenta, taxa de produção e custo). O adequado controle do processo de usinagem é fundamental para que o desempenho da ferramenta de corte, a taxa de produção, o custo de fabricação de cada peça, a qualidade do produto, entre outras respostas sejam alcançadas com sucesso. Com o objetivo de atender as expectativas do mercado atual e por ser um diferencial competitivo, várias empresas estão optando por otimizar os seus processos de usinagem visando melhorar o desempenho global da organização. Por este motivo, segundo Coppini *et al.* (2007) trata-se de um tema que deve ser sempre estudado a fim de disponibilizar novas opções a serem exploradas. Otimizar o processo de usinagem é uma tarefa relativamente árdua, porque o número de soluções possíveis que atendem a fabricação de peças com qualidade é grande. Entretanto, difícil é saber qual destas é a melhor. Nesse contexto, o aprimoramento dos processos e dos métodos de otimização são fundamentais para a evolução dos processos de usinagem. A necessidade por processos cada vez mais eficientes e econômicos tem feito com que diversos métodos de otimização pudessem ser desenvolvidos nas últimas décadas. Assim, métodos como o *Desirability*, que permitem a otimização simultânea de múltiplas características, e algoritmos de busca como o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) vêm sendo constantemente empregados. Da mesma forma, a utilização de técnicas estatísticas como o Projeto e Análise de Experimentos permite uma ampla compreensão a respeito de um dado fenômeno, o que tem contribuído substancialmente para a melhoria da eficiência dos processos e aumento dos níveis de qualidades dos produtos (GOMES, 2010).

1.2. Objetivos

Considerando a concomitante utilização de arranjos experimentais eficientes, funções objetivo e restrições não-lineares e algoritmos de solução por métodos gradientes, este trabalho propõe otimizar o processo de torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico, através da combinação ideal dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta. Como objetivos específicos, este trabalho pretende:

- Determinar uma condição de usinagem que conduza a uma máxima vida da ferramenta de corte (T), alta taxa de produção (T_{xp}) e mínimo custo de usinagem por peça (K_p).

- Determinar modelos matemáticos relacionando os parâmetros do torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico com as respostas de interesse.

1.3. Contribuição do Trabalho

Este trabalho pretende contribuir no campo da indústria, no que diz respeito à utilização de técnicas estruturadas e científicas na resolução de problemas e otimização de processos, em contraposição ao empirismo.

Pretende-se mostrar que a resolução de problemas de forma estruturada pode perfeitamente suprir às necessidades da indústria, de maneira eficiente e eficaz, alcançando resultados de uma forma relativamente rápida e bastante satisfatória.

A contribuição na área acadêmica é a apresentação de um processo de torneamento vertical, com usinagem simultânea no diâmetro interno e externo que se utiliza de ferramentas de corte gêmeas, para a usinagem de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico.

1.4. Limitações

O presente trabalho encontra-se limitado pelos seguintes elementos:

- O processo de torneamento vertical dos anéis de pistão, foi estudado somente com a usinagem do ferro fundido cinzento martensítico, os resultados obtidos não podem ser extrapolados para outros tipos de ferro fundido como, por exemplo, o ferro fundido cinzento perlítico ou ferrítico;
- Entre as respostas do processo, este trabalho se propôs à otimização apenas da vida da ferramenta de corte, da taxa de produção e do custo de fabricação de cada peça. Sendo assim, a variabilidade presente nas propriedades como a dureza e a microestrutura não foram analisadas;
- Entre as técnicas do Projeto e Análise de Experimento, foi utilizado somente o Planejamento Fatorial Completo ²³ e a Metodologia de Superfície de Resposta;
- O único algoritmo de otimização utilizado foi o Algoritmo de Gradiente Reduzido Generalizado, executado a partir de *software* comercial.

1.5. Estrutura do Trabalho

No primeiro capítulo, apresentou-se a introdução do trabalho, bem como os objetivos principais e específicos. Além disso, foram abordadas a contribuição e limitações do trabalho, além da organização do texto.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos necessários para a fundamentação teórica desta pesquisa. São apresentados os principais conceitos relacionados ao processo de torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico.

O Capítulo 3 relata sobre às técnicas de experimentação e otimização, discute-se o Projeto e Análise de Experimentos, Planejamento Fatorial Completo ²³, a Metodologia de Superfícies de Resposta e Algoritmo de Gradiente Reduzido Generalizado.

O Capítulo 4 descreve o método experimental utilizado, detalhando os equipamentos empregados e as etapas seguidas em cada fase do estudo.

O Capítulo 5 o método experimental é aplicado para a otimização do torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico, apresentando e discutindo simultaneamente os resultados obtidos em cada etapa do estudo.

O Capítulo 6 encerra o trabalho, apresentando as conclusões e sugestões para estudos futuros.

2. Fundamentos de Usinagem

2.1. Torneamento Vertical

O torneamento vertical de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico é um processo de usinagem de relativa complexidade, por se tratar de uma operação de desbaste realizada simultaneamente no diâmetro externo e interno das peças. A usinagem ocorre utilizando-se duas ferramentas de corte gêmeas com geometria especial e com refrigeração abundante durante todo o processo de corte. O torneamento vertical é de suma importância para fabricação dos anéis de pistão, que necessita de alternativas mais produtivas e econômicas. Segundo Trent e Wright (2000), Xavier (2003), Delijaicov *et al.* (2007) e Machado *et al.* (2009) entre as operações de usinagem convencional com ferramentas de corte com geometria definida é o torneamento a operação de usinagem mais comumente empregada em trabalhos de corte de metal, sendo uma das operações de usinagem convencional mais importantes. A cada cinco operações de usinagem, pelo menos uma é de torneamento. O processo também é um dos mais utilizados na indústria, é responsável por 40% do tempo total gasto em usinagem e por 30% do número de operações. A vasta utilização do processo de torneamento é caracterizada por sua fácil operacionalização, boa taxa de produção e vantagens econômicas. Dentre os vários tipos de torno, destaca-se o torno vertical conforme Figura 2.1.



Figura 2.1- Centro de Torneamento Vertical Romi Emag VSC 250

Dentre os tipos de torno vertical existentes, o diferencial do processo de torneamento vertical de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico é a junção de duas operações

convencionais de usinagem, o torneamento longitudinal do diâmetro externo e o mandrilamento do diâmetro interno, em apenas uma operação de usinagem, conforme Figura 2.2.

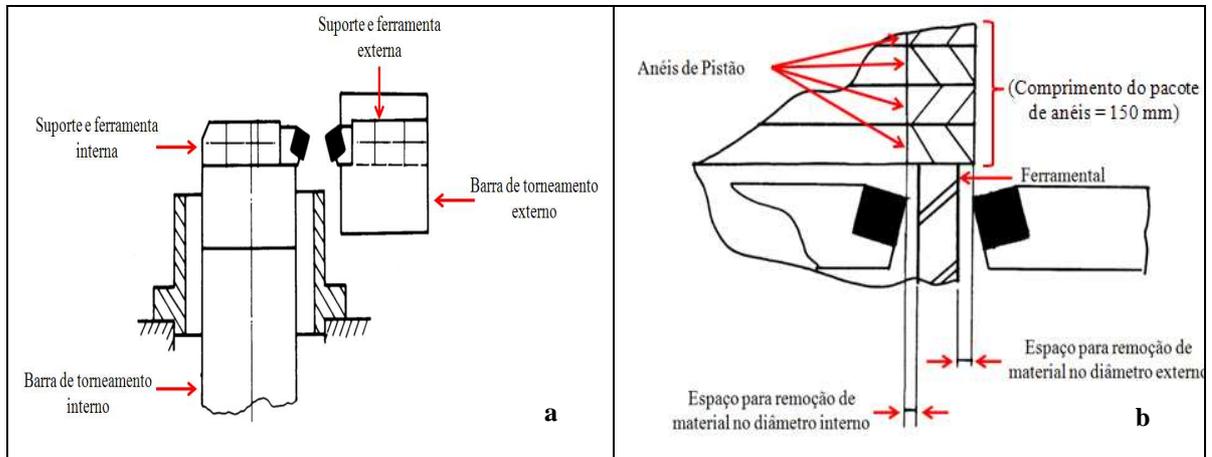


Figura 2.2 - Torneamento Vertical dos Anéis de Pistão

O torneamento vertical de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico utiliza-se de uma barra de torneamento interna cuja função é eliminar o mandrilamento interno convencionalmente realizado nas peças. A barra externa por sua vez realiza a usinagem externa dos anéis de pistão.

A usinagem ocorre simultaneamente no diâmetro interno e externo dos anéis de pistão em pacotes contendo várias peças sobrepostas, onde a quantidade é condicionada a altura dos anéis de pistão em um espaço fixo de 150 mm, conforme Figura 2.2 (b).

O torneamento vertical dos anéis de pistão apresenta as seguintes vantagens quando comparado ao processo de torneamento longitudinal e o mandrilamento:

- Menor área ocupada no espaço fabril;
- Redução de custo com mão de obra direta;
- Melhoria da qualidade do produto devido à redução de erro de forma e posição;
- Facilidade em compensações durante a usinagem;
- Maior controle sobre a vida da ferramenta;
- Aumento significativo da taxa de produção.

Devido suas particularidades, assim como num processo convencional, alguns cuidados são imprescindíveis para o sucesso nesta operação, destacam-se:

a) Dimensionamento e balanço da ferramenta interna

O diâmetro da barra interna é um fator preponderante para uma condição de usinagem favorável. As operações internas são muito sensíveis à proporção entre o balanço da ferramenta e o diâmetro, recomendando-se utilizar o maior diâmetro e o menor balanço possível.

A estabilidade é aumentada quando se usa uma barra de tornear interno com diâmetro maior, mas frequentemente as possibilidades são limitadas, já que o espaço permitido pelo diâmetro do furo na peça deve ser levado em consideração, para o escoamento dos cavacos e para qualquer movimento radial (NETO, 2009).

A importância de manter o balanço em um valor mínimo está ilustrada na Figura 2.3 e Tabela 2.1 a seguir.

O exemplo mostra a deflexão de uma barra de aço sólida com diferentes balanços e uma força de corte média de 1600 N.

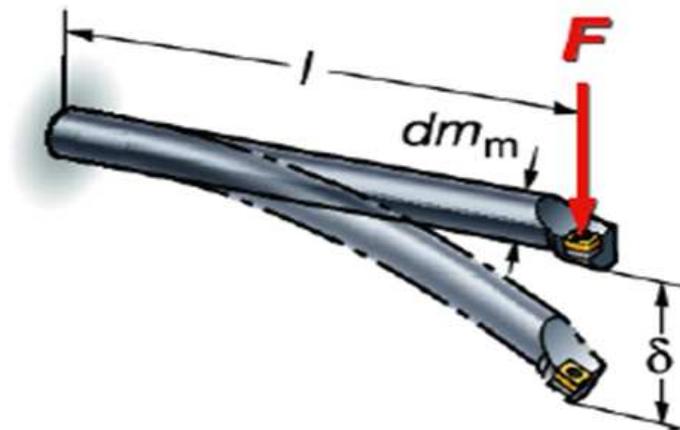


Figura 2.3 - Deflexão da barra de mandril interno
Adaptado do Catálogo Sandvik (2010)

Tabela 2.1 - Relação Comprimento/Diâmetro da Barra de Tornear
Adaptado do Catálogo Sandvik (2010)

Comportamento da barra de mandril			
Diâmetro da Barra (32 mm)	$l = 12 \times dm_m$ 384 mm	$l = 10 \times dm_m$ 320 mm	$l = 4 \times dm_m$ 128 mm
Deflexão (δ mm)	2.7	1.6	1

Os seguintes materiais da barra de mandrilar, conforme Quadro 2.1 podem ser selecionados para adequar-se ao comprimento apropriado da proporção do diâmetro e o material da barra de mandrilar.

Tipo de Barra	Balanço	Demonstração
Barras de mandrilar de aço	Até 4 x d_{m_m}	
Barras de mandrilar de metal duro	Até 6 x d_{m_m}	
Barra de mandrilar em aço antivibratória e curta	Até 7 x d_{m_m}	
Barra de mandrilar em aço antivibratória e longa	Até 10 x d_{m_m}	
Barra de mandrilar em metal duro reforçada antivibratória	Até 14 x d_{m_m}	

Quadro 2.1 - Balanço da Barra de Mandrilar Interna
Adaptado do Catálogo Sandvik (2010)

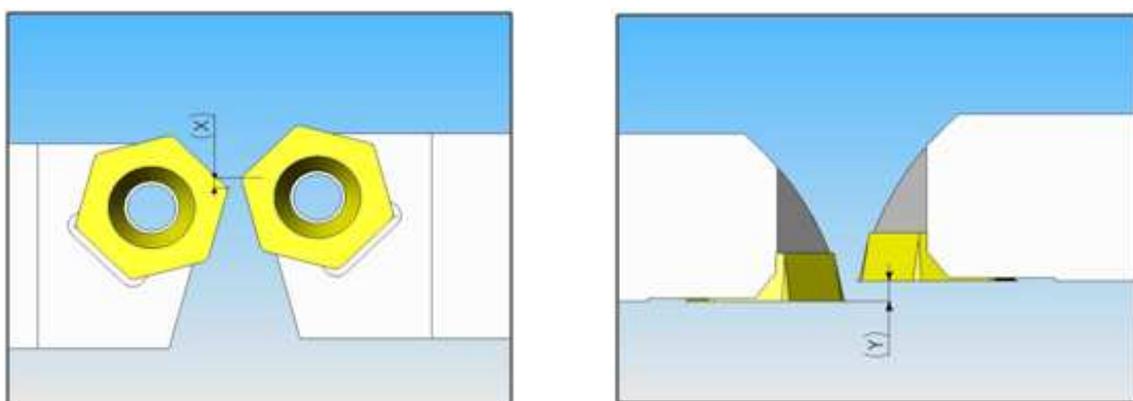
Vários são os cuidados na aplicação para torneamento interno, segundo Marcondes (2007) e Sandvik (2010):

- Escolha o maior diâmetro possível da barra, sem comprometimento do escoamento de cavaco entre a barra e o furo;
- Escolha o menor balanço possível, mas ao mesmo tempo, verifique se o comprimento da barra de mandrilar permite que se alcance o comprimento de fixação recomendada. O comprimento de fixação não deve ser menor que 3 vezes o diâmetro da barra;
- Um contato insuficiente da aresta de corte pode aumentar a vibração pela fricção durante o corte, em vez de uma ação de corte limpa;
- Um contato excessivo da aresta de corte (grande profundidade de corte e/ou avanço) pode aumentar as vibrações pela deflexão da ferramenta;
- As pastilhas com camadas finas de cobertura, ou sem cobertura, geralmente oferecem forças de corte menores em comparação com as pastilhas com cobertura espessa. É extremamente importante quando a relação de comprimento / diâmetro é grande. Uma aresta de corte viva geralmente melhora a qualidade do furo pela menor tendência a vibrações.

No torneamento externo, o balanço da ferramenta não é afetado pelo comprimento da peça e o tamanho do suporte porta-ferramenta pode ser escolhido em função das forças e tensões que surgem durante as operações. No torneamento interno a escolha da ferramenta é muito mais restrita devido ao diâmetro e ao comprimento do furo da peça, já que esses fatores determinam o balanço da ferramenta. Uma regra geral que se aplica a todas as operações de torneamento interno é a de sempre minimizar o balanço da ferramenta e selecionar o maior tamanho de ferramenta possível, para obter a melhor estabilidade e, dessa forma, a melhor precisão. As limitações relacionadas com estabilidade no torneamento interno implicam em cuidados extras que devem ser tomados no planejamento e na preparação da produção (MARCONDES, 2007; NETO, 2009).

b) Alinhamento das ferramentas interna e externa no mesmo plano de trabalho

O alinhamento das ferramentas interna e externa é extremamente importante visto que o seu desalinhamento implica em vibração durante a usinagem, variação das dimensões do produto e desgaste prematuro das ferramentas de corte. Segundo Goodrich (2005), em um estudo de caso na operação de torneamento vertical, na usinagem do tambor de freio de automóvel fabricado de ferro fundido cinzento, o desalinhamento das ferramentas causa desgaste prematuro nas ferramentas de corte. Na usinagem dos anéis de pistão o impacto também é negativo com o desalinhamento das ferramentas, conforme Figura 2.4 (a) e 2.4 (b). Além dos impactos negativos para a ferramenta de corte os anéis de pistão são afetados pela variação das dimensões, acabamento irregular, rebarba e lasca. Essas irregularidades no processo de usinagem não podem acontecer, uma vez que prejudicam todo o sistema de usinagem e qualidade das peças conforme citado anteriormente.



a) Desalinhamento da Altura

b) Desalinhamento do Centro

Figura 2.4 - Ferramentas Interna e Externa

O torneamento é um processo altamente otimizado, porém solicita uma cuidadosa avaliação dos diversos fatores envolvidos em suas mais variadas aplicações.

2.2 Ferramentas de Corte

A tecnologia de ferramentas é sem dúvida o item que mais evoluiu no contexto da usinagem dos materiais. As ferramentas além de terem de se adequar a enorme variedade de produtos no mercado com suas respectivas características e propriedades particulares como fragilidade, tenacidade, cortes interrompidos, dureza entre outras, ainda devem se adequar às necessidades produtivas e aos parâmetros de corte, como: velocidades, avanços, profundidades de corte, fluidos de corte, condições de acabamento da peça, produtividade, custo, rigidez das máquinas, vida útil e outras (CORRÊA, 2002; STEMMER, 2005).

Assim, na hora de eleger a ferramenta de corte mais adequada às suas necessidades é preciso levar em consideração as características do produto que será usinado, a demanda dos clientes da empresa e o tempo de produção da peça, além das propriedades das máquinas que serão utilizadas no processo. Ou seja, a escolha da ferramenta não deve ser feita isoladamente, mas em conjunto com outros fatores que podem influenciar em seu desempenho final. Por isso, vale à pena dedicar atenção especial a esta etapa do projeto para obter melhores resultados.

Dentro deste cenário, os fabricantes de ferramentas investem fortemente no desenvolvimento de novos materiais e na melhoria da geometria das ferramentas, buscando assim ter uma gama de produtos capazes de atender o mercado (SANDVIK, 2010).

2.3. Materiais de Ferramentas de Corte

As exigências do mercado mundial para com os processos de usinagem geram um grande interesse em pesquisa e desenvolvimento de novos materiais utilizados na fabricação de ferramentas de corte. O surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribui para o aparecimento de novos materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem permitindo trabalhar com velocidades de corte sempre maiores (DINIZ *et al.* 2008; MACHADO *et al.* 2009). Segundo Shaw (2004), o material da ferramenta de corte é um dos elementos mais importantes no sistema de usinagem. A escolha correta do tipo de material para a ferramenta implica numa análise criteriosa de vários fatores que interagem entre si, resultando num mecanismo complexo e difícil de ser quantificado (TELES, 2007).

Para a escolha correta do material e a geometria da ferramenta de corte deve-se analisar o material a ser usinado, o processo de usinagem, as condições da máquina operatriz, custo do material da ferramenta, as condições de usinagem (parâmetros de corte) e as condições da operação.

Segundo Stemmer (2005), Diniz *et al.* (2008) e Machado *et al.* (2009) as principais propriedades que um material de ferramenta deve apresentar são:

- Dureza;
- Tenacidade;
- Resistência ao desgaste, a compressão, a choque térmico e ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas;
- Inércia química.

Atualmente tem-se disponível no mercado uma grande quantidade de materiais para ferramentas de corte. Com base nas características químicas, os principais materiais podem ser agrupados da seguinte maneira: aço rápido, aço rápido com cobertura, metal duro, metal duro com cobertura, cerâmica, nitreto cúbico de boro (CBN) e diamante (PCD) (DINIZ *et al.* 2008).

Bitterlich, Bitsch e Friederich (2008), comentam que existe uma necessidade contínua para melhorar os materiais das ferramentas de corte, que é acelerado pela forte competição no mercado e também pelas dificuldades de usar materiais como ferros fundidos cinzentos altamente ligados. Nos processos de usinagem, o potencial da produtividade só é atingido com uma combinação ótima do material da ferramenta de corte, geometria da ferramenta e da máquina-ferramenta (SCHRAMM *et al.* 2007).

2.4. Metal Duro Revestido

Segundo Marcondes (2007), o metal duro foi o segundo grande impulso na área dos materiais para ferramentas de corte, sendo o primeiro o aço rápido. Com a descoberta do metal duro as velocidades de corte puderam ser aumentadas na ordem de dez vezes (de 35 m/min. para 300 m/min.). A descoberta do metal duro aconteceu por volta de 1920, na Alemanha, quando Schroter conseguiu produzir em laboratório o carboneto de tungstênio (WC) em pó pela primeira vez, e foi patenteada, na Alemanha, em 1925. A mistura desse pó principalmente com cobalto (Co), também em pó, trouxe ao mercado, em 1928, esse que é um dos materiais mais revolucionários para a fabricação de ferramentas de corte. Denominado

metal duro, o carboneto de tungstênio, fabricado pelo processo de metalurgia do pó, possui uma excelente combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade. O material originalmente desenvolvido, na Alemanha, continha WC + Co e se mostrou muito eficiente na usinagem de ferros fundidos cinzentos. A Norma ISO 513:2004 E padronizou a classificação dos metais duros em seis Classes designados pelas letras P, M, K, N, S e H. Existe ainda uma subdivisão dentro de cada um desses grupos usando números. Para cada classe de metal duro existe uma aplicação específica, conforme Quadro 2.2.

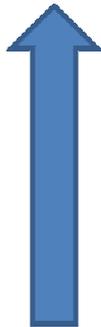
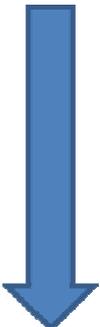
Classe de Metal Duro	Materiais Usinados
<p>P</p>  <p>Aços</p>	<p>Aço é o maior grupo de materiais na área de usinagem de metal, variando de material sem liga a material de alta-liga, incluindo fundidos de aços e aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos. A usinabilidade é normalmente boa, porém difere muito dependendo da dureza do material, do teor de carbono, etc.</p>
<p>M</p>  <p>Aços inoxidáveis</p>	<p>Aços inoxidáveis são materiais com liga com um mínimo de 12% de cromo; outras ligas podem incluir níquel e molibdênio. Condições diferentes, como ferrítico, martensítico, austenítico e austenítico-ferrítico (duplex), criam uma grande família. O ponto comum entre todos estes tipos é que as arestas de corte são expostas a uma grande quantidade de calor, desgaste tipo entalhe e aresta postiça.</p>
<p>K</p>  <p>Ferros fundidos</p>	<p>Ferro fundido é, diferentemente do aço, um tipo de material de cavacos curtos. Ferros fundidos cinzentos (GCI) e ferro fundido maleável (MCI) são consideravelmente fáceis de usinar, enquanto que os ferros fundidos nodulares (NCI), ferros fundidos vermiculares (CGI) e ferros fundidos austemperados (ADI) são mais difíceis. Todos os ferros fundidos contêm SiC, um abrasivo para a aresta de corte.</p>
<p>N</p>  <p>Alumínio</p>	<p>Metais não ferrosos são metais mais macios, como alumínio, cobre, latão etc. Alumínio com teor de Si de 13% é muito abrasivo. Geralmente, velocidades de corte muito altas e longa vida útil da ferramenta podem ser esperadas destas pastilhas com arestas de corte vivas.</p>
<p>S</p>  <p>Ligas resistentes ao calor</p>	<p>Superligas resistentes ao calor incluem uma variedade de materiais à base de ferro de alta liga, níquel, cobalto e titânio. Eles são pastosos, criam aresta postiça, endurecem durante o trabalho (endurecido por trabalho), e geram calor. Eles são muito semelhantes à área ISO M, mas são muito mais difíceis de cortar e reduzem a vida das arestas da pastilha.</p>
<p>H</p>  <p>Materiais endurecidos</p>	<p>Este grupo inclui aços com uma dureza entre 45-65 HRC e também ferro fundido coquilhado em torno de 400-600 HB. A dureza os torna difíceis de usinar. Os materiais geram calor durante o corte e são muito abrasivos para a aresta de corte.</p>

Quadro 2.2 - Classes de Metal Duro e Materiais Usinados
Adaptado do Catálogo Sandvik (2010)

Outros fatores que também influem na seleção do metal duro para uma determinada aplicação segundo Diniz *et al.* (2008):

- Severidade da operação de usinagem: Operações com avanços e profundidade de usinagem simples (desbaste) ou cortes interrompidos criam tensões elevadas na ferramenta, exigindo-se o emprego de classes com maior tenacidade (maior teor de Co);
- Velocidade de corte: À medida que a velocidade de corte cresce a usinagem de peças que já sofreram uma operação anterior que retirou-se excentricidade, casca endurecida, etc. (operações de acabamento), aumenta a adequação da utilização de classes com maior resistência ao calor e à abrasão (menos Co e mais carbonetos).

Na usinagem dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico utiliza-se da ferramenta de metal duro classe ISO K10 revestidas de nitreto de titânio (TiN), conforme Quadro 2.3.

Letra de Identificação	Cor da Identificação	Material Usinado	Metais duro	Aplicação	
K	Vermelho	Ferro Fundido: Cinzento, Nodular e Maleável	K01		
			K05		
			K10		
			K15		
			K20		
			K25		
			K30		
			K35		
			K40		
			a - Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.		
b - Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.					

Quadro 2.3 - Classificação do Metal Duro Classe K segundo Norma ISO 513 (2004)

A norma ISO designou como classe K os que contém WC + Co. Essa classe também é conhecida como classe dos ferros fundidos ou classe aplicada a materiais que produzem cavacos curtos. O grupo K foi o primeiro tipo de metal duro a ser desenvolvido. O metal duro

desta classe é composto de carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto. E não é resistente ao mecanismo que gera o desgaste de cratera e, assim, são indicados para a usinagem de materiais que formam cavacos curtos (ferros fundidos), e que não atritam muito com a superfície de saída da ferramenta (DINIZ *et al.* 2008). A letra de designação dos metais duros é sempre acompanhada de um número que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta. Quanto maior o número, que normalmente varia entre 01 e 50, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste. A subdivisão dentro de cada classe depende principalmente de:

- Composição química do material da ferramenta, incluindo qualidade e quantidade de carbonetos. A presença de carbonetos de titânio (TiC), por exemplo garante maior resistência ao desgaste. Uma quantidade de cobalto, porém, garante maior tenacidade.
- Tamanho dos grãos de carbonetos. Quanto mais finos os carbonetos, maior a tenacidade da ferramenta, aliada a uma maior dureza média.

Com o objetivo de melhorar o desempenho das ferramentas de metal duro durante o processo de usinagem ultimamente pastilhas de metal duro com cobertura de carboneto de titânio e/ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio têm sido utilizadas com muita frequência.

O revestimento de ferramentas de metal duro ganhou uma grande importância, pois tal revestimento pode garantir um desempenho superior à ferramenta sem revestimento. Entre todo o metal duro utilizado na indústria, os revestimentos representam, atualmente, mais de 85%, com tendência a crescimento contínuo. Os revestimentos são de fundamental importância no segmento de otimização de ferramentas de corte (TIKAL *et al.* 2007). Segundo Diniz *et al.* (2008), a finalidade principal dessas camadas é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e a peça, sendo que o núcleo da pastilha permanece com a tenacidade característica do metal duro mais simples (WC + Co). Assim consegue-se, em muitos casos, aumentar muito a vida da ferramenta e diminuir os esforços de corte. Com isto, é possível conjugar no mesmo material características que eram até então inconciliáveis, quais sejam, tenacidade com resistência ao desgaste e dureza a quente. A aplicação de coberturas nas ferramentas de usinagem implicam em ferramentas mais eficientes que se traduz em maior volume de cavaco por tempo, aumento da vida útil com aumento da velocidade de corte. A aplicação dessa tecnologia produz aumento significativo da produtividade, com a consequente redução dos custos de produção. A

relevância de se estudar as funções dos revestimentos implica na escolha ótima da ferramenta em prol de uma produtividade máxima (MARCONDES, 2001). Segundo Pereira *et al.* (2006), na usinagem de ferro fundido o desgaste das ferramentas aumenta abruptamente para desgastes de flanco acima de 0,20 mm. Este fato está associado à perda do revestimento na aresta de corte dessas ferramentas, que traz como consequência uma maior solicitação térmica e maior abrasão sobre o substrato. Os revestimentos apresentam características específicas e que se completam quando associados. Entre as características, uma das principais é a microdureza do revestimento, conforme Figura 2.5 a seguir.

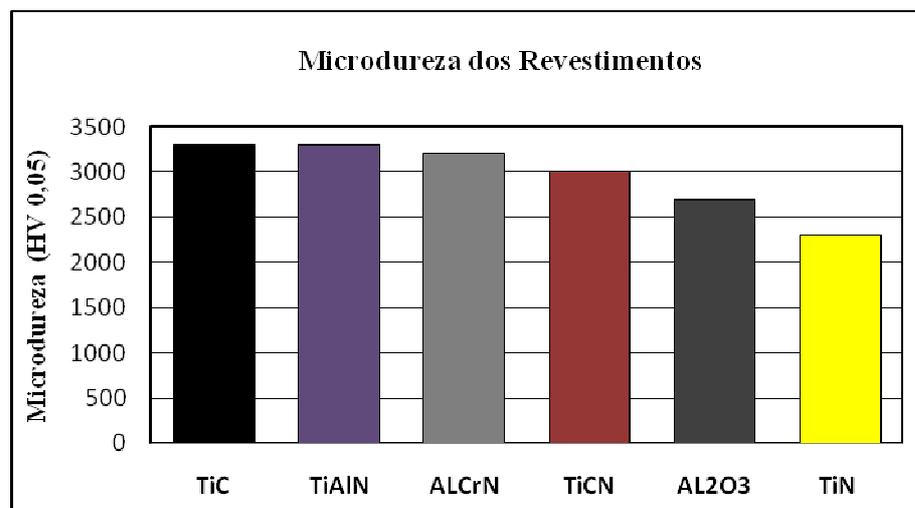


Figura 2.5 - Microdureza dos Revestimentos
Fonte: Balzers, (2011)

Dentre os vários revestimentos existentes destacam-se:

a) Carboneto de titânio (TiC): possuem excelente resistência ao desgaste por abrasão, além de funcionar como elementos que promove a adesão das camadas de cobertura com o metal duro do núcleo, já que o óxido de alumínio (camada que normalmente está por cima do carboneto de titânio) não possui alta afinidade físico-química com o metal duro a fim de conseguir uma forte adesão com o núcleo. Outras características importantes deste material são a baixa tendência de soldagem com o material da peça, dificultando o desgaste por adesão e a formação de aresta postiza de corte, e baixo coeficiente de dilatação térmica (DINIZ, *et al.* 2008).

b) Nitreto de titânio alumínio (TiAlN): O TiAlN é uma evolução natural da camada mais utilizada até os dias de hoje, o TiN. Um aumento considerável na vida útil da ferramenta de corte tem sido obtido com a utilização do nitreto de titânio e alumínio. Sua principal

vantagem é formar um filme protetivo extremamente denso e com alta adesão de Al_2O_3 em sua superfície quando é aquecida, aumentando-se a resistência a difusão e oxidação. A segunda grande vantagem deste revestimento em usinagem é a sua baixa condutividade térmica. Assim uma maior quantidade de calor é dissipada pelo cavaco, permitindo a utilização de velocidades de corte maiores, já que a carga térmica no substrato é menor (YUHARA, 2000).

c) Nitreto de cromo alumínio (AlCrN): A busca por melhoria nas ferramentas de corte levou ao desenvolvimento de novas gerações de revestimentos baseados nos elementos Al-Cr-N. A grande vantagem desses sistemas é a otimização da resistência ao desgaste abrasivo, da dureza a altas temperaturas e da resistência a oxidação, em comparação com os revestimentos tradicionais de TiAlN . As realizações de testes abrangentes demonstram que, tanto a altas velocidades de corte quanto em condições convencionais, há uma melhoria efetiva da eficiência (TELES, 2007; MATTES, 2009; BALZERS, 2011).

d) Carbonitreto de titânio (TiCN): Tem propriedades similares ao TiC (dureza, resistência ao desgaste e capacidade de adesão ao núcleo), a não ser por seu menor coeficiente de atrito. Tanto a camada de TiC quanto a de TiCN , por conterem carbono, necessitam de uma barreira térmica para evitar o desgaste difusivo durante o processo de usinagem. Por essa razão, muitas vezes, o óxido de alumínio é utilizado como cobertura sobre a camada de TiC ou TiCN (BALZERS, 2011).

e) Óxido de alumínio (Al_2O_3): garante a estabilidade térmica necessária em temperaturas elevadas devido ao fato de ser um material cerâmico refratário e possuir alta resistência ao desgaste por abrasão, além de alta resistência a ataques químicos e à oxidação. É o principal responsável pela baixa tendência de formação de desgaste de cratera das ferramentas de metal duro recoberto. Por outro lado, apresenta pequena resistência a choques térmicos e mecânicos (DINIZ *et al.* 2008).

f) Nitreto de titânio (TiN): Favorece a formação de um baixo coeficiente de atrito na face da pastilha, o que resulta em melhoria da resistência ao desgaste por crateras na usinagem de materiais ferrosos, além de possuir uma cor dourada, que propicia alto brilho e acabamento à pastilha permitindo fácil detecção do desgaste da pastilha (MATTES, 2009). O TiN foi a primeira camada disponível comercialmente e por muitos anos a única, portanto não é surpreendente sua representatividade na indústria. TiN tem um grande espectro de utilização devido ao fato de possuir um bom balanço entre propriedades como: dureza, tenacidade, aderência (sobre o aço e metal duro), estabilidade química e térmica e reduzido coeficiente de

atrimento (YUHARA, 2000). Revestimentos de nitreto de titânio possuem excelente resistência à corrosão e à erosão, alta temperatura de sublimação, dureza elevada e boas propriedades ópticas e eletrônicas. São utilizados em dispositivos microeletrônicos, e para melhorar o desempenho e prolongar a vida útil de ferramentas de corte (GONÇALVES, 2010). A Figura 2.6 apresenta graficamente as principais características para as coberturas mais utilizadas atualmente.

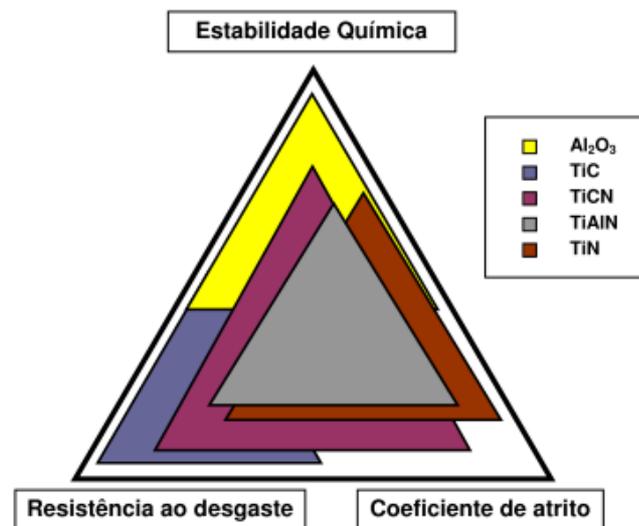


Figura 2.6 - Principais Propriedades das Coberturas
Fonte: Catálogo Iscar, (2001)

Deve-se, portanto, executar o revestimento para que se obtenham um balanço adequado entre as características acima.

2.5. Geometria da Ferramenta de Corte

Vários são os parâmetros que podem influenciar o desempenho dos processos de usinagem, tendo em vista as variáveis de saída, como as propriedades do material usinado, o material da ferramenta de corte, a geometria da aresta de corte, as condições de corte etc. Como parâmetros de saída e avaliadores do desempenho do processo, podem-se listar o tempo de vida da aresta de corte, o tipo de cavaco, a textura superficial, a taxa de remoção de material, a força ou potência de usinagem e o desgaste. Conhecendo-se a influência de cada um dos parâmetros de usinagem no desempenho do processo, a tomada de decisão em prol da busca da melhor forma de combiná-los gera como resultado a otimização do processo (MACHADO *et al.* 2009). A geometria da ferramenta de corte exerce grande influência nos resultados qualitativos da região usinada e da vida útil da ferramenta utilizada (CORRÊA, 2002). Por melhor que seja o material da ferramenta, se a sua geometria não for preparada

adequadamente, não haverá êxito na operação de usinagem (MACHADO *et al.* 2009). O rendimento de todos os processos de usinagem está diretamente ligado às propriedades das ferramentas e aos parâmetros de corte empregados na fabricação das peças, e isso se traduz na busca constante de inovações e fornecedores que possam atender o nível extremo de produtividade com competitividade do mercado metal-mecânico. A geometria da ferramenta de corte tem um papel muito importante nos processos de usinagem dos metais. Ela exerce uma influência marcante sobre algumas variáveis do processo de usinagem tais como: força, potência de corte, temperatura de corte, acabamento, desgaste da ferramenta (REIS, 2000).

Para a otimização de um processo de usinagem é necessário que as máquinas e as ferramentas sejam compatíveis com o tipo de operação a ser executada em uma determinada peça, daí a importância da escolha da ferramenta em função de sua aplicação (MARCONDES, 2001). Isso significa que a forma da ferramenta não é a mesma para todas as condições de corte. Ela depende de uma solução de compromisso entre as exigências, que muitas vezes são contraditórias. Uma das maneiras de atender a essas exigências é trabalhar a variação dos valores dos ângulos que compõem a ferramenta. A influência desta dimensão afeta diretamente o processo de corte, no qual, como será mostrada a seguir, uma variação pode significar melhora ou piora nos resultados obtidos na usinagem. A seguir os principais ângulos de uma ferramenta de torneiar são descritos na Figura 2.7:

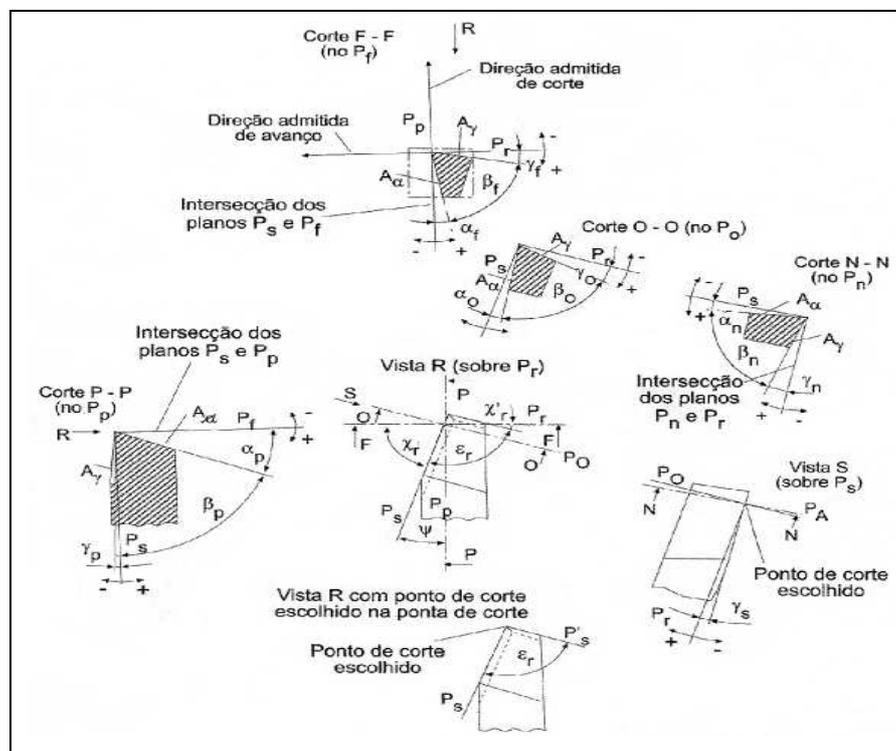


Figura 2.7 - Ângulos da Ferramenta de Torneiar
Adaptado de Diniz *et. al* (2008)

A importância dos principais ângulos da ferramenta de corte de tornear são apresentados a seguir:

a) Ângulo de folga (α_o): Influência consideravelmente as características da usinagem. Normalmente varia de 5° a 20° e sua principal função é evitar atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. Se o valor do ângulo de folga for muito baixo, entretanto, a cunha não penetrará adequadamente na peça e, assim, a ferramenta perderá sua afiação rapidamente, visto que há grande geração de calor.

Além disso, o acabamento da peça será prejudicado. Porém, se o ângulo de folga for muito elevado, a cunha da ferramenta perderá resistência, podendo soltar pequenas lascas ou até mesmo quebrar. O valor do ângulo de folga depende principalmente da resistência mecânica do material da ferramenta e da peça: quanto maior for a resistência mecânica, menor será o ângulo (FERRARESI, 1970; STOETERAU, 2004).

b) Ângulo de Posição (χ_r): Geralmente varia de 45° a 95° e tem as seguintes funções, distribuir as tensões de corte favoravelmente no início e no fim do corte e influenciar na direção de saída do cavaco. Esse ângulo também induz uma força passiva na ferramenta e, por conseguinte, na máquina-ferramenta. Ele é o principal responsável pela flexão de peças muito esbeltas nas operações de torneamento cilíndrico externo.

O ângulo de posição é aquele entre a aresta de corte e a direção de avanço. É importante na seleção de uma ferramenta de torneamento para uma operação e influência: a formação dos cavacos, a direção das forças de corte e o comprimento da aresta de corte no corte (STEMMER, 2005; DINIZ *et al.* 2008).

c) Ângulo de cunha (β_o): É o resultado da soma dos valores dos ângulos de incidência e de saída do cavaco, diminuídos de 90° . Sendo assim, sua variação está diretamente relacionada à resistência mecânica da ferramenta (STOETERAU, 2004).

d) Ângulo de saída (γ_o): Em geral o ângulo de saída varia -8° a 20° e influência decisivamente na força e na potência necessárias ao corte, uma vez que quanto maior o ângulo de saída, menor será o trabalho de dobramento e o encruamento do material do cavaco. Consequentemente, o acabamento da peça e a temperatura de corte serão afetados.

O valor do ângulo de saída dependerá, em especial, da resistência mecânica do material da ferramenta e da peça, bem como da quantidade de calor gerado pelo corte e da velocidade de avanço.

Valores negativos do ângulo de saída são comumente empregados no corte de materiais de difícil usinabilidade e em cortes interrompidos, por garantir maior resistência à cunha de corte. Em contrapartida, a usinagem de materiais dúcteis como liga de alumínio e de cobre, requer o emprego de ângulos de saída altamente positivos para evitar extensas áreas de adesão do cavaco à superfície de saída da ferramenta, que resultam na sua quebra (MACHADO *et al.* 2009).

d) Raio de ponta (r_ϵ): Determina a resistência mecânica da ponta da ferramenta de corte. Além disso, o raio de ponta tem grande influência sobre a rugosidade da peça. Em geral, o raio de ponta varia de 0,2 a 2,4 mm. Valores elevados do raio de ponta garantem maior resistência à ponta da ferramenta, entretanto, há maior contato entre ferramenta e peça, o que provoca o aumento da força passiva (STOETERAU, 2004; DINIZ *et al.* 2008).

e) Ângulo da ponta (ϵ_r): É definido pelo formato da ferramenta, assumindo, por exemplo, 90° em insertos quadrados e 60° em insertos triangulares, ao passo que insertos circulares têm o ângulo de ponta definido em função da profundidade de usinagem. Sua principal função é assegurar a resistência da ponta da ferramenta e sua capacidade de dissipar calor (STOETERAU, 2004; DINIZ *et al.* 2008).

f) Ângulo de inclinação (λ_s): Normalmente varia de -11° a 11° e tem as seguintes funções, controlar a direção de saída do cavaco, proteger a aresta de corte (gume) da ferramenta contra impactos e quando positivo atenuar vibrações (STOETERAU, 2004; DINIZ *et al.* 2008).

A presença do quebra cavaco (Q_c) é uma alteração na geometria da ferramenta cuja principal finalidade é provocar a fratura periódica do cavaco. Segundo Sandvik (2010), o controle de cavacos é um dos fatores-chave do torneamento e há três modos básicos de alternativas para a quebra de cavacos, conforme Figura 2.8.

A quebra automática, por exemplo, na usinagem dos ferros fundidos, (Figura 2.8 a), contra a ferramenta (Figura 2.8 b) e contra a peça (Figura 2.8 c).

A seleção do quebra-cavaco mais indicado para uma determinada aplicação depende principalmente da geometria da ferramenta, ângulo de posição, material e dos valores de avanço e profundidade de usinagem, uma vez que esses elementos orientam o posicionamento do cavaco durante a usinagem.

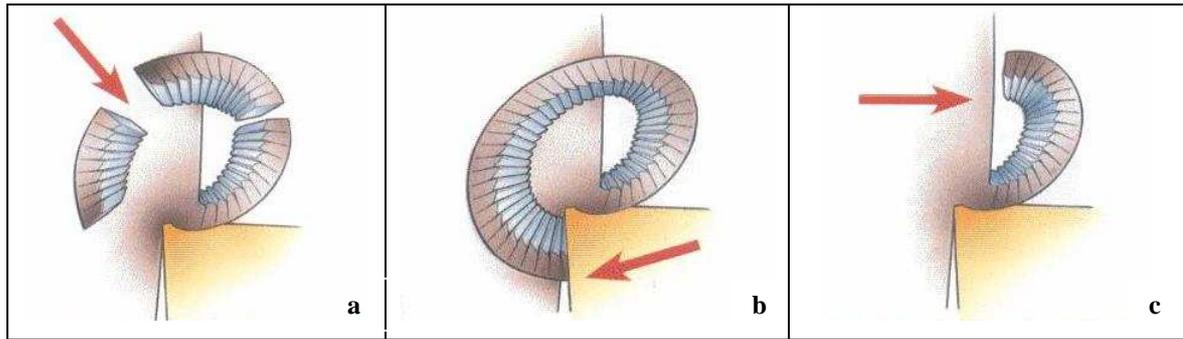


Figura 2.8 - Quebra Cavaco
Adaptado do Catálogo Sandvik (2010)

Assim, quebra cavacos para operações de acabamento situam-se próximos à aresta de corte, enquanto quebra-cavacos para operações de desbaste localizam-se mais afastados da aresta de corte. Pela grande influência que a geometria da ferramenta exerce na usinagem dos materiais, várias são as pesquisas para se encontrar a melhor geometria para cada aplicação dentro da área de usinagem. A correta definição da melhor ferramenta para o processo de usinagem segundo Trent e Wright (2000), é encontrada realizando-se testes práticos somados à experiência acumulada.

2.6. Desgaste e Vida da Ferramenta

Segundo Diniz *et al.* (2008), Machado *et al.* (2009), em um processo de usinagem, existem duas causas fortes para a substituição da ferramenta de corte encerrando sua vida: avarias ou desgaste excessivo. A importância do total entendimento de qualquer forma de interrupção na vida da ferramenta é primordial para o processo de usinagem, visto que o impacto na taxa de produção, no custo e na qualidade está atrelado à vida da ferramenta.

Além disso, o estudo deste fenômeno permite ações coerentes e efetivas para reduzir a taxa desse processo, prolongando a vida da aresta de corte. As falhas na ferramenta de corte, provocadas por desgastes (contínuos) ou avarias (aleatórias), afetam a qualidade do produto direta e significativamente (GODIM, 2008).

Por isso, segundo Melo *et al.* (2005), tornam-se necessários estudos constantes dos mecanismos e processos de desgaste e de avarias nas ferramentas de corte. Avaria em uma ferramenta de corte é um fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte (MACHADO *et al.* 2009). A ocorrência de uma avaria (trinca, lascamento ou quebra) é muito raro de ocorrer no corte contínuo, a não ser que as condições de corte usadas estejam acima das máximas recomendadas para cada tipo

de ferramenta; ou a geometria da ferramenta seja inapropriada; ou, mais raro ainda, quando a ferramenta de corte já possuir defeito de fabricação. As avarias são mais comuns no corte interrompido devido aos choques mecânicos e térmicos inerentes a tais processos de usinagem (SANTOS e SALES, 2007).

Durante o processo de usinagem, ocorre mudança na forma da ferramenta e, portanto, a geometria original altera-se, caracterizando o desgaste progressivo da ferramenta. Segundo Xavier (2009), durante a usinagem, a ferramenta de corte está sujeita a diferentes tipos e intensidades de solicitações térmicas, mecânicas e químicas.

Essas, dependendo das propriedades físicas, mecânicas e químicas do par peça / ferramenta e dos parâmetros de corte utilizados, danificam as propriedades do material da ferramenta e facilitam a alteração da geometria da ferramenta.

No desgaste, ao contrário da avaria, essa perda acontece de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas, às vezes no nível atômico, às vezes no nível dos grãos do material (DINIZ *et al.* 2008). Os principais desgastes e avarias que limitam a vida da ferramenta são listados a seguir:

a) Desgaste Frontal (ou de flanco): Ocorre na superfície de folga da ferramenta causado pelo atrito ou abrasão entre a ferramenta e a peça, conforme Figura 2.9 (a). É o tipo de desgaste mais comum, pois todo processo de usinagem causa o desgaste frontal. Este tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. É incentivado pelo aumento da velocidade de corte (STEMMER, 2005; FERRER, 2006).

b) Desgaste de cratera: É o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco, conforme Figura 2.9 (b). Pode ser causado por difusão, oxidação e adesão. O crescimento do desgaste de cratera pode provocar a quebra da ferramenta (DINIZ *et al.* 2008).

c) Desgaste de entalhe: Pode ocorrer na aresta principal de corte, na extremidade do contato cavaco-ferramenta e na superfície de saída da ferramenta, conforme Figura 2.9 (c). Ocorre juntamente com o desgaste de cratera e flanco e é caracterizado por sulcos profundos que são provocados principalmente pelos mecanismos de desgaste por adesão, oxidação e abrasão (GODINHO, 2007; DINIZ *et al.* 2008; MACHADO *et al.* 2009).

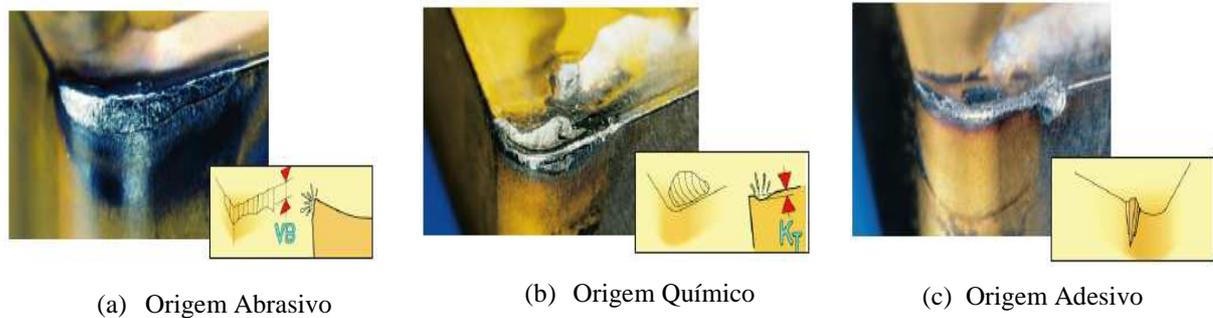


Figura 2.9 - Desgaste da Ferramenta de Corte
Adaptado do Catálogo Sandvik, (2010)

a) Deformação plástica da aresta de corte: É a mudança da geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material, o que pode culminar na destruição total da aresta de corte conforme Figura 2.10 (a). A pressão aplicada à ponta da ferramenta, somada à alta temperatura, gera a deformação plástica da aresta de corte. Provoca deficiência do controle de cavacos e deterioração do acabamento superficial da peça. É evitado pelo emprego de uma ferramenta com maior dureza a quente e maior resistência à deformação plástica, ou pela mudança das condições de usinagem e/ou geometria da ferramenta, visando à diminuição dos esforços e da temperatura de corte (FERRER, 2006; GODINHO, 2007; DINIZ *et al.* 2008).

b) Trincas térmicas: Quando a temperatura na aresta de corte muda rapidamente de quente para frio, várias trincas podem surgir perpendiculares a aresta de corte. Trincas térmicas são relativas a cortes interrompidos, comuns em operações de fresamento e agravadas pelo uso de refrigerante, conforme Figura 2.10 (b) (STEMMER, 2005).

c) Lascamento / quebra da aresta: O lascamento ou a quebra são o resultado de uma sobrecarga das tensões de tração mecânica, conforme Figura 2.10 (c). Estas tensões podem ocorrer por vários motivos, como martelamento de cavacos, uma profundidade de corte ou avanço muito alto, inclusão de areia no material da peça, aresta postiça, vibrações ou desgaste excessivo na pastilha (STEMMER, 2005; DINIZ *et al.* 2008).

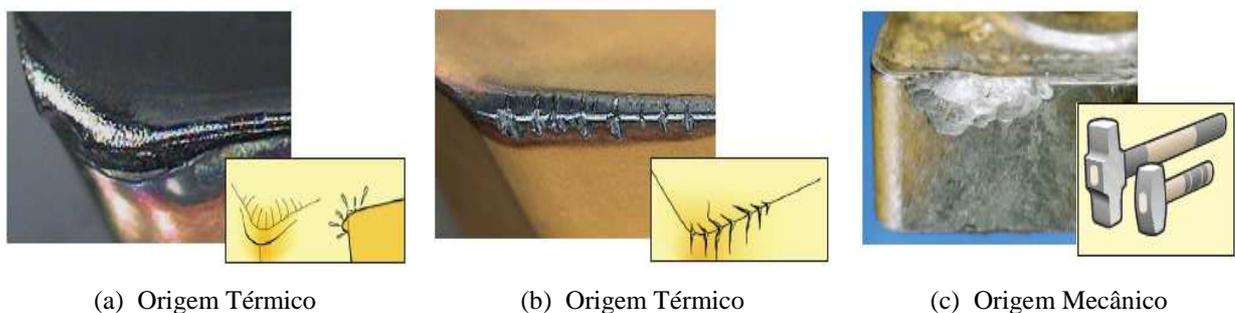
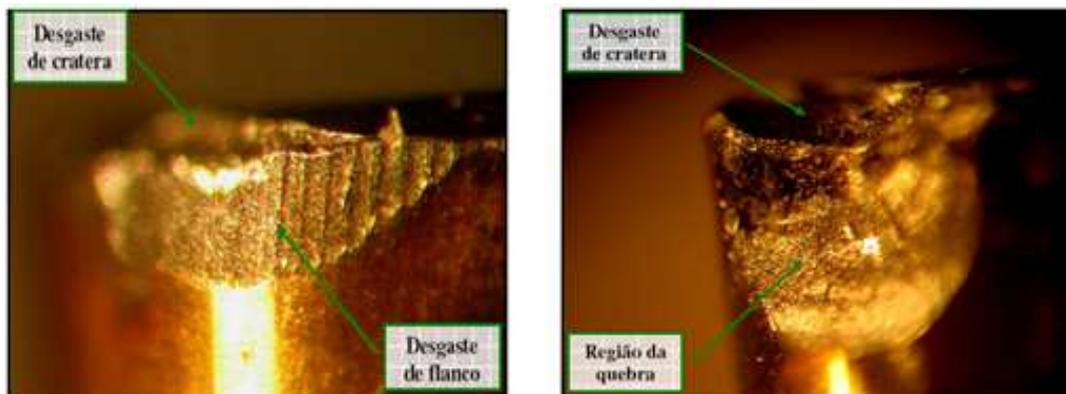


Figura 2.10 - Desgaste e Avaria da Ferramenta de Corte
Adaptado do Catálogo Sandvik (2010)

Segundo Zeilmann *et al.* (2007) os problemas de desgaste em ferramentas de corte sempre foram motivos de preocupação, devido ao controle dimensional e à necessidade de parada no processo para troca das ferramentas. Isso significa custos adicionais e perda de produtividade. Na usinagem do ferro fundido os principais tipos de desgaste são a abrasão, a adesão e a difusão, nesta ordem. A abrasão é causada por carbonetos na microestrutura e por areia na superfície. A adesão pode vir de aresta postiça de corte em baixas velocidades. E a difusão pode ocorrer em altas velocidades na superfície de saída quando não se usam coberturas apropriadas (MACHADO *et al.* 2009). Outros tipos de avarias tais como trincas, lascamentos e quebras, podem surgir durante o torneamento do ferro fundido cinzento martensítico, proveniente das condições da operação, que incluem rigidez da máquina, resistência da ferramenta, interrupção abrupta do corte, irregularidades na peça, dentre outras causas. Segundo Teles (2007) e Machado *et al.* (2009), entre os principais mecanismos causadores do desgaste incluem-se a aresta postiça de corte, a aderência, a abrasão mecânica, a difusão e a oxidação. A Figura 2.11 ilustra uma situação de desgaste e avaria em uma ferramenta de corte utilizada no processo de torneamento do aço ABNT 52100 endurecido.



(a) Desgaste Cratera e Flanco

(b) Desgaste Cratera e Região de Quebra

Figura 2.11 - Desgaste e Avaria
Adaptado de Pereira (2006)

Os parâmetros de corte são de grande importância na determinação dos desgastes sofridos pela ferramenta. Diniz *et al.* (2008), afirmam que a velocidade de corte é o parâmetro mais influente no desgaste, seguido pelo avanço e pela profundidade de usinagem, nessa ordem. Sendo o objetivo desta pesquisa otimizar a vida da ferramenta de corte, consequentemente reduzir a taxa de desgaste durante o processo de usinagem, realizou-se uma pesquisa bibliográfica para analisar quais parâmetros estão sendo estudados na operação de torneamento, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Parâmetros Estudados no Processo de Torneamento

Referências	Fatores Analisados								
	Parâmetros			Geometria da Ferramenta				Refrigeração	
	Vc	f	ap	Raio Ponta	Quebra Cavaco	Ângulo Ataque	Ângulo Folga	Tipo	Taxa
Pérez <i>et al.</i> (2003)	*	*	*						
Noordin <i>et al.</i> (2004)	*	*					*		
Ferreira <i>et al.</i> (2007)	*	*	*						
Isik (2007)	*	*	*						
Camuscu <i>et al.</i> (2007)	*	*	*						
Nalbant <i>et al.</i> (2007)		*	*	*					
Singh <i>et al.</i> (2007)	*	*		*	*				
Paiva <i>et al.</i> (2008)	*	*	*						
Aggarwal <i>et al.</i> (2008)	*	*	*	*					
Lalwani <i>et al.</i> (2008)	*	*	*						
Chiang <i>et al.</i> (2008)	*	*	*	*					
Sharma <i>et al.</i> (2008)	*	*	*						
Xueping <i>et al.</i> (2009)	*	*	*						
Yang <i>et al.</i> (2009)	*	*	*						*
Xavior <i>et al.</i> (2009)	*	*	*					*	
Yaldız <i>et al.</i> (2011)				*		*	*		

A pesquisa realizada demonstra que os parâmetros mais analisados são velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem juntamente com a geometria da ferramenta de corte, com o objetivo de melhorar a vida da ferramenta de corte, a taxa de produção e o custo. Segundo Miranda (1997), a vida da aresta de corte está diretamente relacionada com as características de cada processo, as condições de usinagem empregadas (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e geometria da ferramenta) e as variações das características do material usinado. No processo de torneamento vertical do ferro fundido cinzento martensítico atual a vida útil da ferramenta de corte é de 1351 mm sendo prejudicial ao bom funcionamento do setor produtivo devido sua baixa taxa de produção (1451 peças/hora) e alto custo de fabricação (\$ 0,059). Sendo a vida da ferramenta de corte um fator importante para o desempenho do processo produtivo o conhecimento do valor de desgaste é fundamental. A norma ISO 3685 de 1993 quantifica os desgastes das ferramentas de corte. Os critérios enumerados pela norma ISO 3685 (1993) para o fim de vida de ferramentas de metal duro, aço rápido e cerâmicas são:

- Desgaste de flanco médio, $VBB = 0,3$ mm;
- Desgaste de flanco máximo, $VBMax = 0,6$ mm;
- Profundidade máxima de cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$, onde f é o avanço em mm/rot.;

- Desgaste de entalhe, $VN = 1,0$ mm;
- Falha catastrófica.

A vida da ferramenta é definida, segundo Diniz *et al.* (2008), como o tempo em que a mesma trabalha efetivamente até perder sua capacidade de corte, dentro de algum critério estabelecido. Atingindo este valor a ferramenta deve ser substituída ou reafiada. A vida da ferramenta (T) é geralmente expressa em minutos, porém em certos casos prefere-se defini-la pelo percurso de corte ou percurso de avanço. O percurso de corte (l_c), Equação (2.1) e o percurso de avanço (l_f), Equação (2.2), para uma vida de (T) minutos, são dados por:

$$l_c = (V_c \times t) / 1000 \text{ (Km)} \quad (2.1)$$

$$l_f = f \times n \times t \text{ (mm)} \quad (2.2)$$

A relação entre vida da ferramenta e as variáveis independentes do processo de usinagem pode ser expressa pela fórmula expandida da equação de Taylor, mostrada na Equação (2.3) (Choudury e El-Baradie, 1998).

$$T = C(V_c^l f^m a_p^n) \quad (2.3)$$

Na equação (2.3), T é a vida da ferramenta em minutos, V_c é a velocidade de corte em m/min, f é o avanço, dado em mm/volta, e a_p é a profundidade de usinagem, medida em mm. C , l , m e n são constantes características do trio ferramenta, peça e máquina. Ao observar os três parâmetros principais de usinagem: velocidade, avanço e profundidade de corte, cada um tem um efeito sobre a vida da ferramenta. A profundidade de corte tem o menor efeito, seguido pela faixa de avanço. A velocidade de corte tem o maior efeito na vida útil da ferramenta de corte.

2.7 Anéis de Pistão de Ferro Fundido Cinzento

Anéis de pistão são peças de metal que, quando instaladas nos pistões dentro dos cilindros dos motores, tornam-se circulares e auto-expansivas, proporcionando uma vedação móvel entre a câmara de combustão e o cárter do motor.

Apesar da sua aparente simplicidade, conforme Figura 2.12 um anel de pistão utilizado em motores de combustão interna é uma peça extremamente complexa (PITTORRI, 2005).

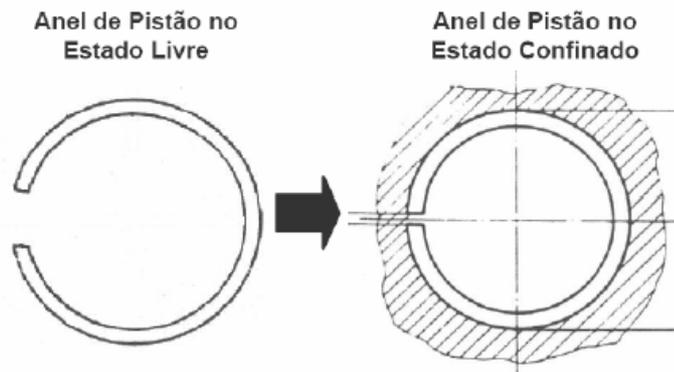


Figura 2.12 - Representação do Anel de Pistão
Fonte: ISO6621-1, 1984, p. 12

Segundo Piccilli (2009), pode-se dizer que o anel de pistão é um elemento circular com elevada força de expansão contra o cilindro. Suas principais funções são (COFAP MANUAL DE MOTORES, 1996):

- Vedar a câmara de combustão; Transmitir o calor da combustão para as paredes do cilindro; Controlar o consumo de óleo e a lubrificação.

Os anéis de pistão normalmente estão dispostos em um conjunto de três anéis em cada pistão. Esses anéis são usualmente denominados pela sua posição em relação ao topo do pistão. Os anéis de primeira e segunda canaleta são usualmente chamados de anéis de compressão, e o anel de terceira canaleta é chamado de anel de óleo (ARAÚJO, 2009).

Na Figura 2.13 podemos ver esquematicamente um cilindro em corte, mostrando o pistão e os anéis de pistão, onde podemos ver os três anéis básicos das três canaletas.

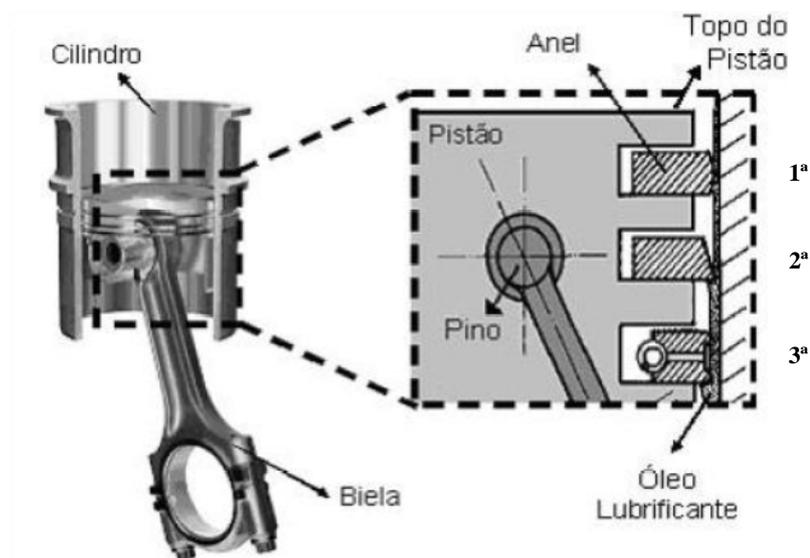


Figura 2.13 - Célula de Potência Típica com os Anéis de Pistão
Adaptado de Ferrarese (2004)

Conforme Ferrarese (2004), o anel superior ou de primeira canaleta é o principal responsável pelo desempenho do conjunto quanto à vedação dos gases da combustão para o cárter. Este componente deve suportar as enormes pressões e temperaturas geradas pela combustão, auxiliando pela vedação adequada dos gases, a transformação desta energia em movimento do pistão. Na segunda canaleta ou intermediária do pistão, temos também um anel de compressão, também chamado de anel raspador, o qual tem como principal função raspar o excesso de óleo deixado na parede do cilindro. O anel inferior, da terceira canaleta, é denominado de anel de óleo e tem como principal função o controle do filme de óleo na parede do cilindro deixado para os outros anéis. Nos anéis de óleo existe um elemento expansível responsável por promover a força de vedação do anel, que exceto no momento da combustão, é o que exerce a maior força de vedação, e por consequência o maior atrito, dentre todo o conjunto (FERRARESE, 2009). De acordo com o Manual de Motores Cofap (1996), os anéis de pistão são produzidos com materiais especiais para cada tipo de aplicação, exigindo-se do material a serem escolhidas as seguintes características: Tenacidade, elasticidade, condutor de calor, resistência a quebra por fadiga e a corrosão, boas condições de trabalho tanto com lubrificação adequada como inadequada e baixo peso. Ele deve permitir um correto funcionamento do motor, nas diversas condições de operação do sistema durante toda a vida do veículo (VOLCI, 2007). Os anéis de pistão são fabricados em diversos tamanhos para diversas aplicações em motores. Os anéis de pistão estão presentes em grandes motores como os marítimos e de geração de energia, até pequenos anéis de motores de equipamentos de uso domésticos (cortadores de grama, moto-serra e pequenos veículos). A grande maioria dos anéis hoje produzidos é para a indústria automobilística (VOLCI, 2007). O metal base comumente utilizado é o ferro fundido cinzento, mas dependendo do caso, em função de exigências específicas de determinadas aplicações, são também utilizadas ferros fundidos nodulares, ferro fundido de alto teor de ligas e aços (Manual Motores Cofap, 1996). Segundo Araújo (2009), existe uma grande variedade de materiais para anéis de pistão, sendo que dentre as especificações, existem diversas variações estruturais e/ou químicas.

2.8. Ferro Fundido Cinzento Martensítico

O ferro fundido cinzento martensítico é um tipo de ferro fundido cinzento modificado através da adição de elementos químicos e tratamentos térmicos o qual é submetido, conferindo-lhe excelentes propriedades mecânicas e propiciando sua utilização em peças que exigem alto grau de resistência mecânica, como a fabricação de anéis de pistão. Suas principais propriedades são a elevada resistência ao desgaste e à ruptura. Por este motivo, sua

aplicabilidade na fabricação de anéis de pistão é intensa. Segundo Borille (2005), os ferros fundidos são materiais utilizados há muito tempo na indústria automobilística para a fabricação dos mais diversos componentes como, por exemplo, discos de freio, blocos e cabeçotes de motores. Incontáveis são as vantagens da utilização dos ferros fundidos na indústria, principalmente na manufatura em larga escala de componentes com geometria complexa. Dentre as ligas de ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de importância fundamental para a indústria, não só devido às características inerentes ao próprio material, como também pelo fato de, mediante a introdução de elementos de liga, a aplicação de tratamentos térmicos adequados e o desenvolvimento do ferro fundido nodular, ter seu emprego viável em aplicações que, de certo modo, eram exclusivas dos aços (CHIAVERINI, 2005). Juntamente com os aços, os ferros fundidos são os materiais mais utilizados pela indústria, sendo aplicado em diversos setores não só devido às suas características inerentes, como também sua imensa versatilidade (TELES, 2007). Segundo Sudo *et al.* (2001) atualmente ainda se utiliza muito o ferro fundido na fabricação de peças, principalmente na indústria automobilística, apesar da existência de uma grande variedade de materiais metálicos e não-metálicos no mercado. Dentre os ferros fundidos, o cinzento é o material mais empregado mundialmente no setor automotivo (TIANFU *et al.* 2007), tendo como principais características o baixo ponto de fusão, boa fluidez, boa usinabilidade e resistência ao desgaste (PRADHAN *et al.* 2007; AVCI *et al.* 2009; HEJAZI *et al.* 2009). Entre os vários ferros fundidos existentes, o cinzento é o mais utilizado, por sua importância vêm recebendo, de maneira contínua importante desenvolvimento, tanto em processos de fabricação como em materiais (BAGETTI, 2009). A fabricação do ferro fundido cinzento martensítico é caracterizada por dois aspectos: a composição química e os tratamentos térmicos. Os ferros fundidos cinzentos outorgam a possibilidade de produzir diferentes classes de resistência a partir de um tratamento térmico e adições de elementos de ligas (BRANCO e SANTOS, 1989; ALARCÓN, 2003). A seguir será apresentado a influência dos elementos de liga e dos tratamentos térmicos do ferro fundido cinzento.

1) Adição dos elementos de liga

A adição de elementos de liga a ferros fundidos, via de regra, possibilita a obtenção de propriedades mecânicas mais elevadas, tanto no estado bruto de fusão como após tratamento térmico (SANTOS e SALES, 2007). Elementos de liga são adicionados para melhorar as propriedades de resistência ao desgaste, abrasão e corrosão (SMITH, 1993). A adição de liga vem se tornando uma prática usual, por permitir não só obter resistências com o carbono equivalente mais elevado, como também porque as estruturas resultantes são menos sensíveis

á variação da espessura das peças. Elementos de liga facilitam a obtenção de ferros fundidos cinzentos de alta qualidade (MACHADO *et al.* 2009). A ação dos elementos de liga pode ser interpretada pelos efeitos microestruturais e as influências nas propriedades. Nestes materiais com a adição dos elementos de liga, em geral, visa-se aumentar as resistências à tração e ao desgaste, além da tenacidade, sem prejudicar a usinabilidade. Como esses fatores tendem a ser antagônicos, há necessidade de um balanceamento correto dos elementos químicos. Os elementos de liga, usualmente utilizados em ferro fundidos podem atuar como grafitizantes, como é o caso do silício, do alumínio, níquel e do cobre, ou podem promover a formação de carbonetos, como o tungstênio, o molibdênio, o nióbio, o vanádio e o cromo. A Tabela 2.3 baixo apresenta o efeito dos elementos de liga na usinagem do ferro fundido cinzento martensítico.

Tabela 2.3 - Efeito dos Elementos Químicos na Usinagem
Adaptado de Machado *et al.* (2009)

Elementos de Liga	Efeitos na Usinagem
C (Carbono)	Facilita o endurecimento das ligas e forma carbonetos com ferro, cromo e vanádio, aumentando a resistência ao desgaste abrasivo e diminuindo o desempenho do material na usinagem.
Si (Silício)	Serve principalmente para permitir a quebra do cavaco e aumentar o desgaste por abrasão nas ligas onde está presente.
Mn (Manganês)	Ligas com alto conteúdo de Mn são não magnéticas nem encruáveis. Afeta a usinagem por induzir o encruamento e o surgimento de APC.
Cr (Cromo)	Sua presença reduz o desempenho do material em usinagem e geralmente é adicionado para aumentar a resistência mecânica, o endurecimento e a resistência ao desgaste abrasivo e à corrosão.
Ni (Níquel)	Aumenta a dureza, a resistência à corrosão e a resistência mecânica, mas reduz o desempenho do material na usinagem. É usado em combinação com o Cr para melhorar o desempenho mecânico a quente. Ligas contendo Ni também tendem a formar APC e desgaste de entalhe.
Ti (Titânio)	Quando ligado a AL, Mn, Sn ou V, produz ligas de baixa densidade com excelente resistência mecânica e à corrosão, o que dificulta a usinagem. Os principais problemas são a APC e o baixo tempo de vida.
V (Vanádio)	Usado em combinação com o Cr, oferece boas propriedades de corte, bem como aumenta a resistência mecânica e a ductilidade. Esses fatores afetam negativamente a usinagem.
W (Tungstênio)	É o primeiro elemento a ser acrescentado para melhorar a dureza e diminuir a condutividade térmica. Quando presente afeta negativamente o desempenho da usinagem.
Nb (Nióbio)	Aumenta a resistência mecânica e à corrosão, permitindo assim a usinagem somente a baixas velocidades de corte.

2) Tratamento térmico

O tratamento térmico consiste em um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que podem ser submetidos os materiais ferrosos, sob condições controladas de (temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento), com o objetivo de alterar as suas propriedades mecânicas ou conferir-lhe determinadas características microestruturais (COLPAERT, 1974).

O comportamento deste material quando submetido a tais processos é, de modo geral, idêntico ao que ocorre nos aços, dos quais se distingue pela presença de carbono livre.

O objetivo tecnológico da maior parte dos tratamentos térmicos realizados em ferro fundido é o atendimento às especificações, tanto no que se refere à microestrutura como às propriedades mecânicas. No exame das características de cada tratamento executado, verifica-se a influência fundamental da composição química base e da presença de elementos de liga, assim como a microestrutura existente, uma vez que esta determina a escolha dos parâmetros de operação, ou seja, o tempo e as temperaturas de cada tratamento.

Os principais tratamentos térmicos aplicados ao ferro fundido cinzento são:

a) Alívio de tensões ou envelhecimento artificial: Segundo Branco e Santos (1989), e Chiaverini (2005), pode-se ainda dizer que esse é o tratamento térmico mais utilizado em ferro fundido cinzento. As peças de ferro fundido, ao resfriar a partir do estado líquido ficam sujeitas a tensões internas devido à diferença nas velocidades de resfriamento em diversas secções e às mudanças estruturais com conseqüente aparecimento de variações de volume não uniformes. As tensões assim originadas podem causar empenamento das peças ou mesmo fissuras e sua ruptura.

A intensidade dessas tensões, por outro lado, depende da forma e das dimensões e da própria composição do material. As conseqüências mais graves dessas tensões podem ser atenuadas por um projeto adequado das peças, técnicas apropriadas de fundição e seleção de composição que represente um equilíbrio apropriado entre as propriedades de resistência e contração.

Entretanto, na maioria dos casos, essas tensões internas devem ser reduzidas ou eliminadas. O processo de alívio de tensão consiste em aquecer as peças a uma temperatura geralmente inferior à faixa de transformação da perlita em austenita, durante um tempo determinado.

Com este tratamento não ocorre modificações na microestrutura do material e nas propriedades mecânicas. Os mais importantes fatores deste tratamento de tensões são, pois, a

temperatura e o tempo de permanência a essa temperatura. Quanto mais elevada a temperatura, maior a quantidade de tensões aliviadas, devendo-se entretanto não ultrapassar a faixa de transformação do material. A medida que se aumenta a temperatura, menor o tempo necessário para se conseguir o alívio de tensões. Na Tabela 2.4 a seguir é descrito a temperatura recomenda para o tratamento de alívio de tensões para o ferro fundido cinzento, sendo o tempo em média de 25 minutos por cm² de secção da peça.

Tabela 2.4 - Faixa de Temperatura para Alívio de Tensões do Ferro Fundido Cinzento
Adaptado de Chiaverini, (2005)

Tipo de Ferro Fundido Cinzento	Temperatura
Sem elemento de Liga	530° - 565°C
De baixo teor em Liga	610° - 620°C
De alto teor em Liga	620° - 650°C

O resfriamento, após aquecimento para alívio de tensões, deve ser conduzido com cuidado, pois um resfriamento rápido pode originar novas tensões internas. Recomenda-se assim, que as peças sejam resfriadas no forno até a temperatura atingir 290°C quando então, podem ser retiradas ao ar. Entretanto, a complexidade das peças é o fator preponderante para a escolha da velocidade de resfriamento mais indicada, sendo recomendado que o resfriamento seja realizado até a temperatura de 90°C.

Ressalta-se, ainda que o alívio de tensões também permite a obtenção de dureza mais uniforme em peças de ferro fundido ligados.

b) Recozimento: O objetivo principal do recozimento é melhorar a usinabilidade do ferro fundido cinzento, conforme Tabela 2.5 O processo é realizado para que ele seja aquecido a temperatura correspondente a zona crítica para propiciar uma alteração na estrutura.

A resistência mecânica e a dureza diminuem ao mesmo tempo em que as tensões internas são totalmente eliminadas. Embora estes materiais se caracterizem pela boa usinabilidade, o recozimento, melhora essa propriedade e às vezes, é até mesmo utilizado para eliminar ou reduzir zonas coquilhadas que prejudicam a usinagem e podem ter surgido durante o processo de solidificação, nas secções mais finas das peças fundidas (CHIAVERINI, 2005; GUESSER, 2009).

Tabela 2.5 - Práticas Recomendadas para Recozimento dos Ferros Fundidos
Adaptado de Chiaverini, (2005)

Processos	Objetivo	Aplicação	Tempo	Velocidade de Resfriamento
Recozimento a baixa temperatura (705 a 760°C)	Decomposição da perlita em ferrita e grafita para obtenção da máxima usinabilidade	Ferros fundidos comuns e de baixo teor de liga	15 a 25 min. por cm de secção transversal	Resfriamento no forno à velocidade de 55°C por hora entre 540 e 290°C
Recozimento médio ou pleno (790 a 900°C)	Decomposição da perlita em ferrita e grafita para obtenção da máxima usinabilidade	Ferros fundidos ligados	15 min. por cm de secção transversal	Resfriamento lento através de zona crítica, de cerca de 790 a cerca de 675°C
Recozimento a alta temperatura (900 a 955°C)	Decomposição dos carbonetos em perlita e grafita para obtenção da máxima usinabilidade	Ferro fundido mesclado ou branco	25 a 75 min. por cm de secção transversal	Resfriamento ao ar até cerca de 535°C

c) Normalização: Esse tratamento é utilizado para melhorar as propriedades mecânicas do ferro fundido, tais como a resistência à tração e dureza ou com objetivo de restaurar as propriedades do estado bruto de fusão, cuja estrutura tenha sido alterada por outros tratamentos térmicos.

A normalização via de regra, produz uma estrutura homogênea de perlita fina, conforme Tabela 2.6, podendo-se todavia, obter estruturas martensíticas em peças de pequena secção transversal. Esse tratamento consiste no aquecimento até a temperatura de austenitização, de maneira a permitir que uma determinada porcentagem de carbono entre em solução, e posteriormente ocorre-se o resfriamento ao ar, até uma temperatura ambiente.

A normalização dos ferros fundidos cinzentos consiste num aquecimento desses materiais a temperaturas entre 885° e 925°C, acima portanto da zona crítica, devendo-se o material ser mantido na temperatura escolhida durante cerca de 25 minutos por cm de secção; seguindo-se do resfriamento ao ar.

Verifica-se, no entanto, que ferros fundidos cinzentos não ligados têm suas propriedades mecânicas de resistência diminuídas com o tratamento de normalização. Acréscimos na resistência mecânica só são observados em ferros fundidos cinzentos que contém elementos de liga (BRANCO e SANTOS, 1989; CHIAVERINI, 2005 e GUESSER, 2009).

Tabela 2.6 - Processo de Normalização
Adaptado de Chiaverini, (2005)

Processo	Objetivo	Aplicação	Tempo	Velocidade de Resfriamento
Normalização	Eliminação de carbonetos maciços com retenção da perlita	Ferros fundidos cinzentos sem e com elementos de liga	25 min. por cm de secção transversal	Resfriamento ao ar ou forçado até 480°C

d) Têmpera e Revenimento: O objetivo da têmpera é aumentar a resistência mecânica e a dureza, e conseqüentemente, a resistência ao desgaste do ferro fundido cinzento. Esta última propriedade pode melhorar cerca de 5 vezes em relação à resistência ao desgaste do ferro fundido cinzento perlítico. Obtém-se com a têmpera, uma sensível elevação da dureza, sendo necessário um revenimento posterior para aliviar as tensões provenientes desse tratamento. Os tratamentos de têmpera e revenimento consistem no aquecimento até temperatura de austenitização, para que o carbono entre em solução.

A temperatura de aquecimento situa-se acima da zona crítica de modo que ocorra formação de austenita e o tempo de permanência à temperatura depende da composição do material, sendo necessário para que haja suficiente solução do carbono de forma uniforme por toda secção das peças, recomendando-se cerca de 10 min. por centímetro de secção. Após esta etapa ocorre o resfriamento rápido, para se obter a estrutura martensítica.

Segundo Branco e Santos (1989), normalmente, não se efetuam operações de usinagem em ferros fundidos temperados porque, neste caso, o desgaste da ferramenta seria muito grande. Para que este material possa ser usinado, efetua-se um revenimento que conduz a uma estrutura martensítica revenida. A estrutura martensítica é extremamente dura e frágil, por essa razão faz-se necessário o tratamento térmico subsequente deste material, para que se possa submetê-lo a usinagem. No estado “como temperado”, a martensita, além de ser muito dura, é tão frágil que não pode ser usada para a maioria das aplicações; além disso, quaisquer tensões internas que possam ter sido introduzidas durante a têmpera possuem um efeito de enfraquecimento. A ductibilidade e a tenacidade da martensita podem ser aprimoradas e essas tensões internas podem ser aliviadas através de um tratamento térmico conhecido como revenido (CALLISTER, 2002).

O revenido tem como função reduzir as tensões internas causadas pela têmpera e obter a dureza desejada (CALLISTER, 2002; VALDIVIA, 2007). O processo de revenimento ocorre a uma temperatura inferior à temperatura crítica reduzindo-se a fragilidade, aliviando tensões, diminuindo a dureza e melhora a resistência mecânica e a tenacidade. A temperatura mais

aconselhável para o processo de revenimento, no sentido de melhorar as propriedades mecânicas, é de 360°C para o ferro fundido cinzento sem elementos de liga e de 600°C para os ligados. O processo de têmpera e revenimento impactam diretamente na dureza do material conforme Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Processo de Têmpera e Revenido
Adaptado de Branco e Santos (1989)

Processo		Dureza Brinell
Estado bruto de fusão		240
Temperado		560
Revenimento	200°C	500
	315°C	470
	430°C	400
	540°C	320
	650°C	240

Lembrando-se que o objetivo destes tratamentos térmicos é conferir ao ferro fundido cinzento martensítico melhores propriedades mecânicas, principalmente em relação à redução no desgaste abrasivo devido sua aplicação em anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico. O incremento no que se refere à resistência ao desgaste abrasivo no ferro fundido pode ser conseguido com uma dispersão de partículas duras na matriz, como, por exemplo, os carbonetos.

A efetividade dessa adição está diretamente ligada à dureza da matriz, que deverá ser capaz de evitar o desprendimento desses carbonetos para que haja um ganho real no que se refere à resistência ao desgaste, sendo, portanto, interessante que esta seja constituída por martensita revenida (VATAVUK *et al.* 2003).

Resumidamente segundo Chiaverini (2005), a introdução de elementos de liga e ou aplicação de tratamentos térmicos modificam a microestrutura da matriz metálica, podendo dar origem a perlita fina ou a uma matriz acicular, típica da martensita, afetando é claro de modo positivo as propriedades mecânicas.

As características dos ferros fundidos cinzentos tornam esses materiais de grande importância para a indústria automobilística. Várias melhorias vêm sendo realizadas no processo de fabricação do ferro fundido expandindo-se o campo de aplicação, dentre elas: o

amplo uso do controle estatístico de processo a fim de reduzir as variações de processo, tem permitido ao fundidor produzir componentes com propriedades anteriormente vistas como conflitantes e impossíveis (GUESSER e GUEDES, 1997).

2.9. Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento Martensítico

A usinabilidade pode ser definida como uma grandeza comparativa e expressa num conjunto de propriedades de usinagem de um material, isto é, o grau de dificuldade de usinar um determinado material (DINIZ *et al.* 2008). Segundo Guesser (2009), o conceito de usinabilidade está ligado ao desgaste da ferramenta de corte, entendendo-se assim que um material de alta usinabilidade resulta em longa vida da ferramenta.

A usinabilidade depende das condições intrínsecas do material, das condições de usinagem, das características da ferramenta, das condições de refrigeração, da rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivo de fixação e dos trabalhos executados pela ferramenta (corte contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída de ferramenta) (STEMMER, 2005; MACHADO *et al.* 2009; NETO, 2009).

O conceito “boa usinabilidade”, geralmente refere-se à ação de corte sem problemas e uma vida apropriada da ferramenta. Genericamente, os ferros fundidos são tidos como materiais que apresentam uma boa usinabilidade, principalmente os cinzentos e nodulares de menor dureza e resistência (BAGETTI, 2009). Segundo Pires (2006) e Godinho (2007), a usinabilidade dos ferros fundidos, assim como de outros materiais metálicos, está vinculada à presença e à quantidade de elementos de ligas e da forma da estrutura metálica. Segundo Teles (2007), o ferro fundido é um material onde a ocorrência e a distribuição de seus constituintes define sua usinabilidade.

Esta não é explicada simplesmente pela composição química, por ensaios de dureza ou de ruptura à tração, destacando-se a microestrutura como sendo um dos principais fatores a influenciar a vida da ferramenta.

Os elementos de liga interferem diretamente na usinabilidade. A determinação da influência dos elementos de liga que compõem os ferros fundidos é difícil, tendo em vista três fatores: a reação entre si desses elementos, seu efeito na microestrutura e a taxa de esfriamento (CHIAVERINI, 2005).

A composição química desses elementos pode atuar de duas maneiras: como formadores de carbonetos (cromo, cobalto, manganês, molibdênio, vanádio, titânio, nióbio e tungstênio) que prejudicam a usinabilidade, pois esses carbonetos são partículas muito duras e

abrasivas, e como grafitizantes (silício, níquel, alumínio e cobre), que devido às baixas tensões de cisalhamento que promovem no material, auxiliam a usinabilidade.

O sulfeto de manganês também é utilizado nos ferros fundidos para melhorar a usinabilidade, pois além de fragilizar ainda mais o cavaco, atua como uma espécie de lubrificante sólido durante o cisalhamento (PEREIRA *et al.* 2006).

Os ferros fundidos possuem microestrutura composta por uma matriz metálica, constituída por quantidades variáveis de ferrita, perlita, martensita, bainita e carbonetos, cujas presenças dependem da composição química e das condições de resfriamento, tanto no estado bruto de fundição como da realização de tratamentos térmicos (CONSALTER *et al.* 1987; MALUF, 2002).

A quantidade e distribuição destes constituintes influem diretamente na usinabilidade do material. Os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento e as adições de elementos de liga específicos possibilitam a obtenção de ferros fundidos com estruturas martensíticas, que apresentam elevada resistência mecânica e dureza.

A usinabilidade destes materiais é, de maneira geral, inferior à dos ferros fundidos ferríticos, ferrítico-perlíticos ou perlíticos.

A seguir é apresentada a influência dos microconstituintes mais comuns na usinabilidade dos ferros fundidos.

a) Grafita: A grafita é o mais importante componente estrutural do ferro fundido, por ser o elemento que determina fundamentalmente as características mecânicas dos ferros fundidos. É um componente de dureza relativamente baixa quando comparada com os constituintes da matriz; isto produz descontinuidades, facilitando a quebra do cavaco na usinagem.

A grafita atua também como agente lubrificante, reduzindo o atrito entre ferramenta e peça e dificultando a ocorrência de microsolda. O efeito global é o aumento da vida da ferramenta.

A quantidade de grafita na estrutura do material é mais importante que sua morfologia e distribuição, sendo que o ferro fundido torna-se mais usinável com o aumento da quantidade de grafita.

A ASTM classifica o aspecto e a forma de apresentação da grafita em cinco tipos, sendo A = irregular desorientada, B = em roseta, C = desigual irregular, D = interdendrítica desorientada e E = interdendrítica orientada, conforme mostra a Figura 2.14. (CHIAVERINI 2005; GUESSER, 2009).

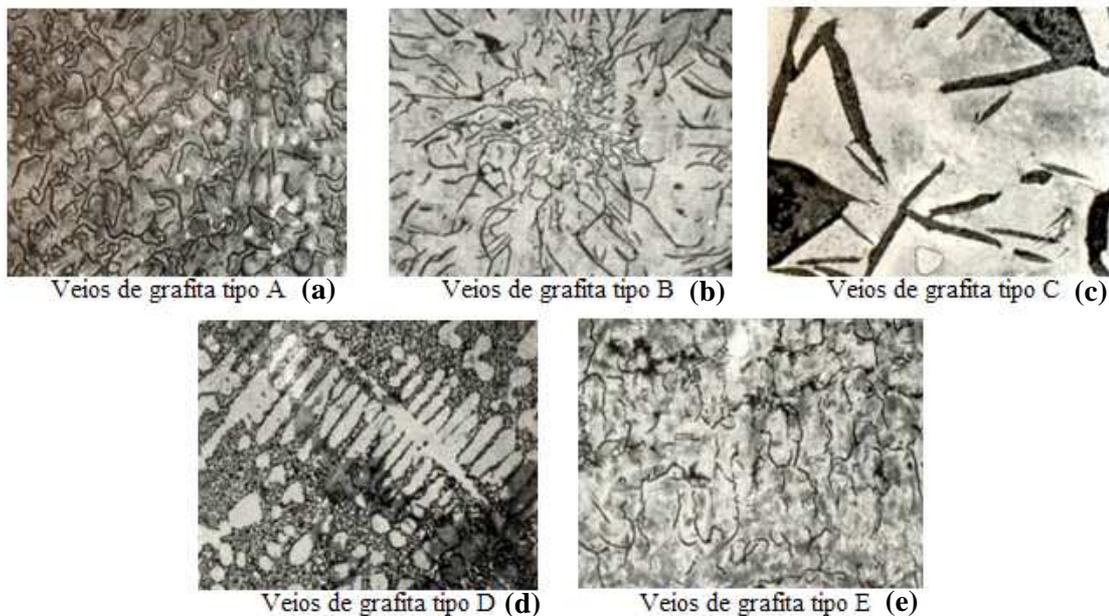


Figura 2.14 - Forma e Distribuição dos Veios de Grafita, segundo as normas da ASTM e da AFS

Adaptado de Chiaverini, (2005)

b) Ferrita: A ferrita dos ferros fundidos é um constituinte de baixa dureza (100-150 HB) cuja presença na estrutura melhora a usinabilidade do material, conforme Figura 2.15. A maior parte da ferrita encontrada nos ferros fundidos contém silício em teores relativamente altos e, com isso, há uma redução da ductilidade correspondendo a uma melhor usinabilidade.

Porém devida à alta ductilidade da ferrita, este material pode ser muito aderente e formar aresta postiça quando se usina em baixa velocidade de corte (CHIAVERINI, 2005; TELES, 2007).

c) Perlita: A perlita é o constituinte predominante na estrutura dos ferros fundidos mais usados em engenharia, combinando boas propriedades mecânicas com razoável usinabilidade, conforme Figura 2.15. É constituída por camadas alternadas de ferrita e cementita e, dependendo do espaçamento destas camadas, a perlita é considerada grosseira ou fina. Os ferros fundidos de perlita mais grossa são mais fáceis de usinar. A estrutura mais fina é mais resistente, mais dura e, por isso, deve ser usinada em menores velocidades (CHIAVERINI, 2005; GUESSER, 2009).

d) Steadita: A steadita é um eutético ternário, composta pela austenita, carboneto de ferro e fosfeto de ferro evidenciado que a steadita pode ser considerada particularmente prejudicial à usinabilidade do material devido ao seu efeito abrasivo, conforme Figura 2.15.

A steadita é um microconstituente de dureza relativamente alta que fica fora da rede cristalina, e com aumento do teor de fósforo, a usinabilidade é afetada negativamente (CHIAVERINI, 2005; GUESSER, 2009).

Os microconstituintes acima citados são apresentados na Figura 15.

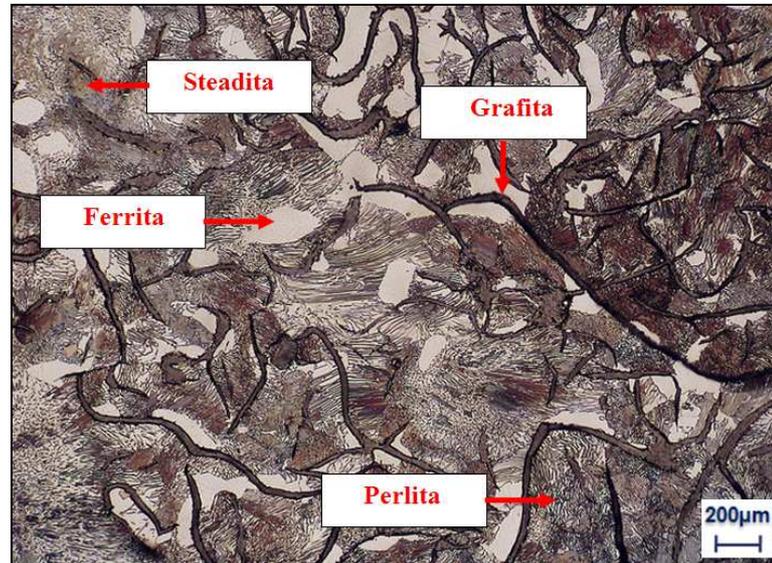


Figura 2.15 - Estrutura do Ferro Fundido Cinzento Perlítico-Ferrítico

e) Carbonetos ou cementitas: Os carbonetos são um constituinte de elevada dureza (750-800 HV) e portanto muito abrasivo, conforme Figura 2.16. Sua presença nos ferros fundidos, mesmo em pequenas quantidades, reduz sensivelmente a usinabilidade. Em placas finas como na perlita, a cementita pode ser usinada, porém a sua usinabilidade se reduz drasticamente no caso de partículas maiores.

Com percentual de aproximadamente 5% de carbonetos livres na estrutura da matriz, já se tem um significativo efeito prejudicial a usinabilidade dos ferros fundidos. Os carbonetos podem estar presentes na periferia das peças de ferro fundido por causa da solidificação muito rápida neste ponto (GUESSER, 2009).

f) Martensita: O tratamento térmico de têmpera e as adições de elementos de liga específicos possibilitam a obtenção de ferros fundidos com estrutura martensíticas, que apresentam elevada resistência mecânica e dureza, conforme Figura 2.16. A usinabilidade destes materiais é, de maneira geral, inferior à dos ferros fundidos ferríticos, ferrítico-perlíticos ou perlíticos. Os microconstituintes anteriormente citados são apresentados na Figura 2.16 (VATAVUK *et al.* 2003; CHIAVERINI, 2005; GUESSER, 2009).

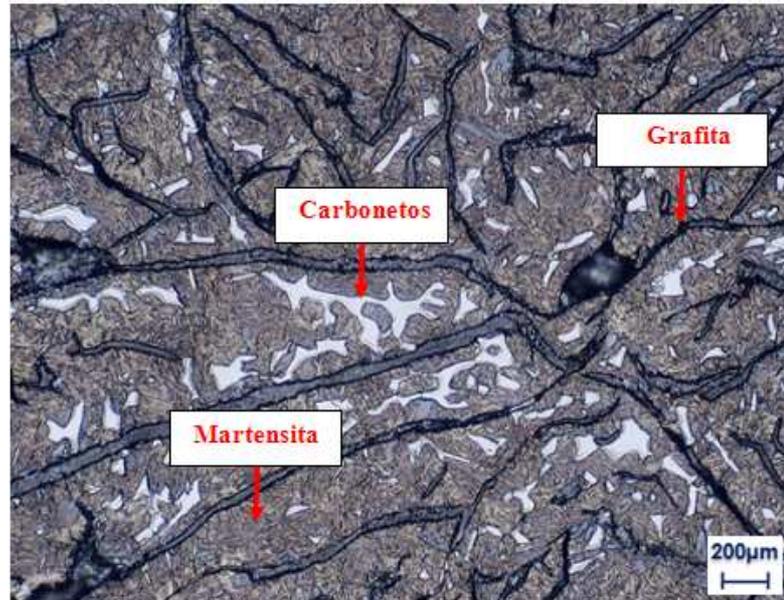


Figura 2.16 - Estrutura do Ferro Fundido Cinzento Martensítico

Com relação à usinabilidade do ferro fundido cinzento martensítico pode-se afirmar que o mesmo possui baixa usinabilidade, pois sua estrutura martensítica dificulta a usinagem.

Segundo Sudo *et al.* (2001) e Rosa (2009), pequenas variações na microestrutura podem fazer uma diferença na usinagem do ferro fundido, que seria muito significativa em alta produção. Na usinagem do ferro fundido cinzento martensítico, a vida da ferramenta e as velocidades de corte são diretamente influenciadas pela microestrutura. Além da estrutura e dos elementos de liga, outros fatores afetam a usinabilidade do ferro fundido, dentre eles a areia oriunda dos moldes, aderida na superfície das peças, tem ação abrasiva sobre as ferramentas de corte, fazendo-se necessário a adequação dos parâmetros de corte para uma efetiva usinagem. Segundo Meurer *et al.* (2007), independente da composição química, microestrutura e elementos de liga, todas as ligas fundidas em areia a verde possuem uma superfície bruta de fundição, conforme Figura 2.17. Esta camada se não processada adequadamente na fundição pode causar grandes perdas na usinagem do ferro fundido.

Normalmente os problemas encontrados na camada superficial originam-se da interação do metal líquido com o molde de areia, resultando partículas de sílica aderidas à peça. Outra danificação da superfície pode ocorrer em tratamentos térmicos, formando-se óxidos de ferro superficiais. A remoção da camada bruta de fundição é uma realidade, ou seja, um problema enfrentado pelas empresas que trabalham com usinagem e fabricantes de ferramentas. Na dinâmica que as fábricas se encontram, não permite que estas façam estudos padronizados e detalhados para entender as dificuldades na remoção desta camada.

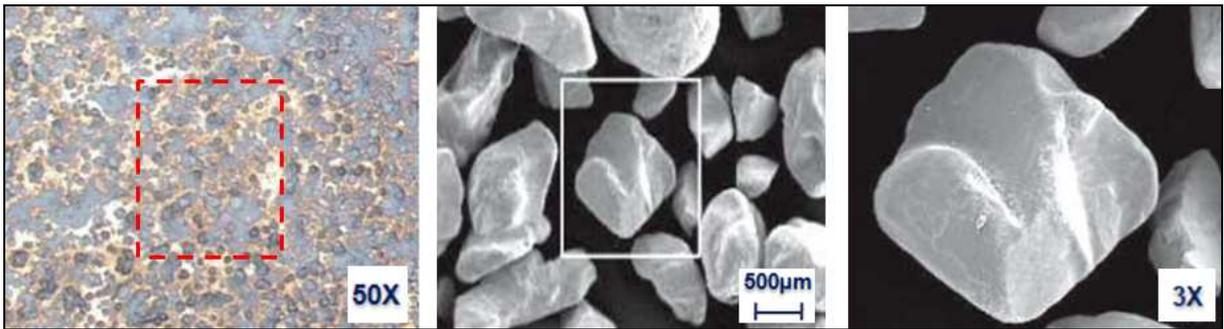


Figura 2.17 - Superfície do Ferro Fundido Cinzento Martensítico

Para amenizar o desgaste da ferramenta de corte na usinagem do ferro fundido, reduz-se a velocidade e corte e aumenta-se o avanço (SANTOS e SALES, 2007; BAGETTI, 2009). Além das condições intrínsecas do material, o processo de usinagem do ferro fundido cinzento martensítico na operação de torneamento vertical, ocorre em um processo de usinagem de corte interrompido, no qual é usado simultaneamente o diâmetro interno e externo, por este motivo a usinagem deste material neste processo requer cuidados. Segundo Souza *et al.* (2009), a usinabilidade do ferro fundido cinzento martensítico é comprometida devido a sua composição química e estrutura metálica. Por este motivo necessita-se de uma melhoria nos parâmetros de corte e na geometria da ferramenta com objetivo de melhorar a usinagem. Os diferentes tipos de ferros fundidos possuem diferentes comportamentos durante o processo de usinagem. Pereira *et al.* (2006), concorda que a usinabilidade pode ser melhorada com a escolha correta dos parâmetros de usinagem (profundidade de corte, avanço, velocidade de corte, fluido de corte, geometria e material da ferramenta) ou através de ajustes no material da peça. Melhoras na manufatura envolvem dois aspectos: técnicos e econômicos.

Entre os aspectos técnicos estão a possibilidade de produzir uma peça de acordo com as especificações, a facilidade da remoção do cavaco, o melhor desempenho do mecanismo de formação do cavaco, etc. As melhorias econômicas podem estar associadas com pequenos desgastes da ferramenta, baixas forças de corte e baixo consumo de energia, que podem combinar com uma redução do tempo de usinagem e menor custo da peça.

3. Metodologia de Projeto Experimentos

3.1. Considerações Iniciais

Projeto de Experimentos é uma metodologia relativamente antiga, desenvolvida entre 1920 e 1930 por Fisher, sendo posteriormente aperfeiçoada por outros importantes pesquisadores como Box, Hunter e Taguchi, dentre outros. Desenvolvendo uma pesquisa no *Rothamsted Agricultural Experiment Station*, em Londres, Sir Ronald A. Fisher, foi o inovador no uso dos métodos estatísticos e da análise de dados. Em 1933, levou seu trabalho para a Universidade de Londres, onde o DOE (do inglês *Design of Experiments*) foi aplicado em experimentos agrícolas e em ciências biológicas, tendo alcançado enorme sucesso.

A primeira aplicação prática do DOE data de 1930, na *British Textile*. Depois da Segunda Guerra mundial, esta metodologia foi introduzida na indústria química e nos processos industriais de empresas do Estados Unidos e Europa. Sua notória eficácia fez dela uma das principais ferramentas de melhoria de processos (PAIVA, 2006). Pensar de maneira sistemática sobre um problema contribui enormemente para sua solução.

De acordo com Montgomery (2001), uma maneira sistemática de avaliar a magnitude de várias fontes de variação que influenciam um processo deve se iniciar com a identificação e seleção dos fatores que possam contribuir para a variação. Geralmente, sessões de gerações de idéias, fluxogramas e diagramas de causa-efeito realizados por especialistas no processo, podem contribuir para a escolha apropriada destes fatores. Em seguida, deve-se selecionar um modelo que inclua os fatores escolhidos e planejar experimentos eficientes para estimar seus efeitos. A viabilidade do estudo deve ser levada em consideração. Experimentos exploratórios ou dados históricos devem ser utilizados para se avaliar o número de níveis adotados para cada fator.

Dentre as características citadas por Montgomery e Runger (2003) como recomendáveis para um experimento planejado incluem-se as réplicas, a aleatorização e a blocagem. Réplicas são repetições de uma determinada corrida experimental. Elas permitem a obtenção de dados que possibilitam estimar a variabilidade da variável de resposta, a qual pode ser utilizada para avaliar a significância estatística do tratamento. A aleatorização é importante e desejável para garantir que a variação incontrolável seja diluída pelo arranjo proposto, reduzindo a chance de má interpretação dos resultados. A blocagem é uma técnica estatística que permite avaliar se a falta de homogeneidade interfere nos resultados. Deve ser empregada quando não for possível garantir a homogeneidade das condições ao longo da condução do experimento (NETO *et al.* 2010).

Um bloco consiste de uma parte do experimento completo, que se presume ser mais uniforme do que o todo (PAIVA, 2006). Realizar os experimentos de acordo com o planejado, detectar, documentar e analisar as anormalidades que ocorrerem na condução experimental é vital para garantir o sucesso do estudo. Uma vez realizados os experimentos, o próximo passo é estimar os efeitos dos fatores incluídos no modelo utilizando métodos estatísticos adequados. No final, interpretar e discutir os resultados e recomendar melhorias.

Segundo Gáldamez (2002), experimentos industriais são realizados pelas empresas no intuito de melhorar as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação. Experimentos são úteis também em projetos de produtos, de maneira que produtos novos sejam desenvolvidos e os já existentes aperfeiçoados. Planejamento de experimentos é realizado com o intuito de encontrar níveis ótimos dos parâmetros que regulam seus processos de fabricação. A utilização de planejamentos experimentais embasados em fundamentos estatísticos proporciona aos pesquisadores a obtenção de um número máximo de informações do sistema em estudo, a partir de um número mínimo de experimentos (CHANDRA, 2001; MONTGOMERY e RUNGER, 2003; MASON *et al.* 2003).

O projeto de experimentos (DOE) consiste em técnicas que objetivam planejar experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma análise estatística que resulte em conclusões válidas e objetivas. Atualmente existem diversas aplicações do projeto e análise de experimentos nos mais diversos segmentos da manufatura com o intuito de otimizar produtos e processos, podendo ser utilizado nas mais diversas áreas da manufatura como indústrias plásticas, químicas, alimentícias, automotivas, metalúrgicas, de processos, eletrônicos e semicondutores e indústria de serviços. Nota-se então a diversidade do potencial de utilização desta ferramenta na otimização de processos produtivos em todas as áreas industriais.

Depois de identificadas as condições do processo e os componentes do produto que influenciam na qualidade do produto, podem então direcionar esforços de melhoria para aumentar a manufaturabilidade, a confiabilidade, a qualidade, e o desempenho de campo (MEYERS e MONTGOMERY, 2002).

3.2. Aplicação da Metodologia de Projeto de Experimentos na Usinagem

A abordagem de cunho estatístico consiste em planejar experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma eficaz análise, o que resulta em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2000). Ainda segundo Montgomery (2001) e Neto *et al.* (2010), as técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas basicamente para melhorar

as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa, tais como, material, tempo de funcionários, disponibilidade de máquinas etc. A análise estatística é importante porque uma pequena diferença entre as especificações técnicas de um produto ou nos níveis de ajustagem dos fatores de controle de um processo de fabricação pode significar o ganho ou perda de tempo de produção, ferramentas de usinagem e qualidade do produto, o que conseqüentemente, se converte em grandes ganhos ou perdas econômicas para a empresa. Segundo Özel e Karpuz (2005), toda a literatura relevante envolvendo a quantificação de impactos de parâmetros de usinagem na qualidade final da peça abarcam algum tipo de projeto de experimentos que leve a um modo sistemático de quantificação dos efeitos de um número finito de parâmetros.

Neste contexto, nos últimos anos, diversos pesquisadores têm empregado a metodologia de Planejamento e Análise de Experimentos (DOE) no estudo da otimização dos mais variados tipos de processos de usinagem e materiais, considerando os mais diferentes cenários de manufatura. Geralmente, um arranjo experimental clássico é utilizado para se descobrir as relações entre as variáveis de processo e as características de saída dos produtos usinados.

Para se determinar a condição ótima de operação, aplica-se algum algoritmo de otimização não linear utilizando como funções objetivo ou restrições as equações obtidas experimentalmente. Noordin *et al.* (2004), por exemplo, aplicaram a metodologia de superfície de resposta (MSR) no processo de torneamento do aço AISI 1045, avaliando-se o desempenho de uma ferramenta de metal duro com múltiplas camadas. Os fatores pesquisados foram velocidade de corte, avanço e geometria da ferramenta. Reddy e Rao (2005) utilizaram o arranjo experimental de Taguchi juntamente com o algoritmo genético no processo de otimização do fresamento do aço AISI 1045. Neste trabalho, os autores apresentam uma investigação experimental sobre a influência da geometria da ferramenta, da velocidade de corte e do avanço no acabamento superficial das peças usinadas a seco. Paiva *et al.* (2007) aplicaram a MSR juntamente com a análise de componentes principais (PCA) e o gradiente reduzido generalizado (GRG) para otimizar múltiplas respostas correlacionadas, no processo de torneamento do aço AISI 52100, adotando como parâmetros a velocidade de corte (V_c), o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p). As respostas analisadas foram: a vida da ferramenta (T), o custo por peça fabricada (K_p), o tempo de corte (C_t), o tempo total de usinagem (T_t), rugosidade (R_a) e taxa de remoção do material (MRR). Dixit *et al.* (2007) aplicaram um fatorial completo para otimizar os parâmetros de corte do processo torneamento do ferro fundido cinzento. Os pesquisadores estudaram o desempenho de uma ferramenta de cerâmica

mista na usinagem do ferro fundido cinzento, utilizando-se a metodologia de superfície de resposta juntamente com Redes Neurais, para analisar a vida da ferramenta e a rugosidade superficial das peças. Kurt *et al.* (2009) utilizaram arranjos de Taguchi na otimização o processo de furação da liga Al 2024. Os parâmetros de qualidade do furo foram analisados sob diferentes velocidades de corte, avanço, profundidade da furação e tipo de revestimento da broca. Os resultados demonstraram a validade da abordagem de Taguchi para a otimização do processo.

Todos estes trabalhos objetivam a otimização do processo de usinagem, obtidas a partir de uma pequena, porém, eficiente quantidade de experimentos. Considerando a concomitante utilização de arranjos experimentais eficientes, funções objetivo e restrições não-lineares e algoritmos de solução por métodos gradientes, neste trabalho, propõe-se a otimização o processo de torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico, através da combinação ideal dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta, a fim de se determinar uma condição de usinagem que conduza a uma máxima vida da ferramenta de corte (T), alta taxa de produção (T_{xp}) e mínimo custo de usinagem por peça (K_p). A otimização dos parâmetros de corte e a geometria da ferramenta utilizadas em processos de torneamento com o objetivo de maximizar a vida da ferramenta, aumentar a taxa de produção, reduzir os custos de usinagem e a melhoria da qualidade de componentes, pode ser observada em muitos trabalhos: Choudhury e Bartarya (2003) afirmam que a melhoria da vida da ferramenta é de extrema importância, visto que o desgaste da ferramenta de corte é um limitante para a automação do processo de usinagem. Nalbant *et al.* (2007), ressaltam que na moderna indústria o objetivo é a fabricação de baixo custo, produtos de alta qualidade em curto espaço de tempo. Lalwani *et al.* (2008) explicam que indústrias de todo o mundo lutam constantemente para reduzir custos e tempo de fabricação e melhorar a qualidade na usinagem, mantendo-se a competitividade.

Na usinagem é necessário selecionar as configurações adequadas a fim de melhorar a eficiência do processo, por esta razão a otimização dos processos de usinagem pode resultar em um importante diferencial competitivo. Chiang *et al.* (2008) afirmam que as técnicas de otimização dos parâmetros de usinagem através de métodos experimentais e estatísticos tem crescido substancialmente ao longo do tempo para atingir um objetivo comum, melhorar a eficiência do processo de usinagem. Al-Ahmari (2007) relata que os modelos de predição de usinabilidade e determinação dos valores ótimos dos parâmetros de corte têm sido áreas de interesse para pesquisadores e engenheiros.

A otimização do processo de torneamento vertical do ferro fundido cinzento martensítico, será realizado através da aplicação da Metodologia de Planejamento de Experimentos a fim de determinar uma condição que conduza a uma máxima vida da ferramenta de corte, alta taxa de produção e mínimo custo por peça fabricada. Segundo Leitnaker *et al.* (2005) o poder dos métodos estatísticos, nomeadamente experimentos planejados (DOE) para a melhoria dos processos industriais tem reconhecimento há muito tempo.

3.3. Técnicas de Planejamento de Experimentos

Técnicas de planejamento de experimentos vêm sendo utilizadas como uma ferramenta para verificar o funcionamento de sistemas ou processos produtivos, permitindo a melhorias destes, como a redução na variabilidade e conformidade próximas do resultado desejado, além de diminuição no tempo de processo e, conseqüentemente, nos custos operacionais. As técnicas de Projeto de Experimentos são ferramentas com uma grande aplicação nas etapas de projeto preliminar, projeto do produto, projeto do processo de fabricação, e na etapa de avaliação e melhoria. Principalmente porque nessas fases é necessário analisar a influência de um ou mais fatores. No entanto, quando o que se quer é investigar o efeito provocado nas respostas dos experimentos por mais de um fator de controle, onde cada um desses fatores de controle possui mais de um nível de regulagem, se recomenda o uso de técnicas de planejamento, tais como: Taguchi, fatorial, superfície de resposta e mistura (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Esta abordagem de cunho estatístico consiste em planejar experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma eficaz análise, o que resulta em conclusões válidas e objetivas. O experimento projetado ou planejado é um teste ou uma série de testes, nos quais se induzem mudanças deliberadas ou estímulos nas variáveis de entrada do processo, de tal forma que seja possível observar e identificar os efeitos nas respostas ou nas variáveis de saída.

O processo de transformação é representado pela combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam uma entrada em produtos acabados ou semi-acabados, com características ou parâmetros específicos (MONTGOMERY, 2001; GALDAMEZ, 2002; COLOMBARI, 2004). Gomes (2010), lembra que o emprego da abordagem estatística no Projeto e Análise de Experimentos necessita que as pessoas envolvidas nos experimentos tenham uma idéia clara a respeito do fenômeno que se pretende estudar, de como os dados serão coletados e de um entendimento básico das ferramentas de

análise utilizadas. Montgomery (2001), também ressalta a importância do domínio do problema por todas as pessoas envolvidas e recomendam que durante os experimentos, o processo seja cuidadosamente monitorado, para garantir que tudo seja realizado de acordo com os planos, pois erros no procedimento experimental muito provavelmente invalidarão os resultados. Montgomery (2005) propõe que o emprego do Projeto e Análise de Experimentos deve considerar as seguintes etapas, conforme Figura 3.1.

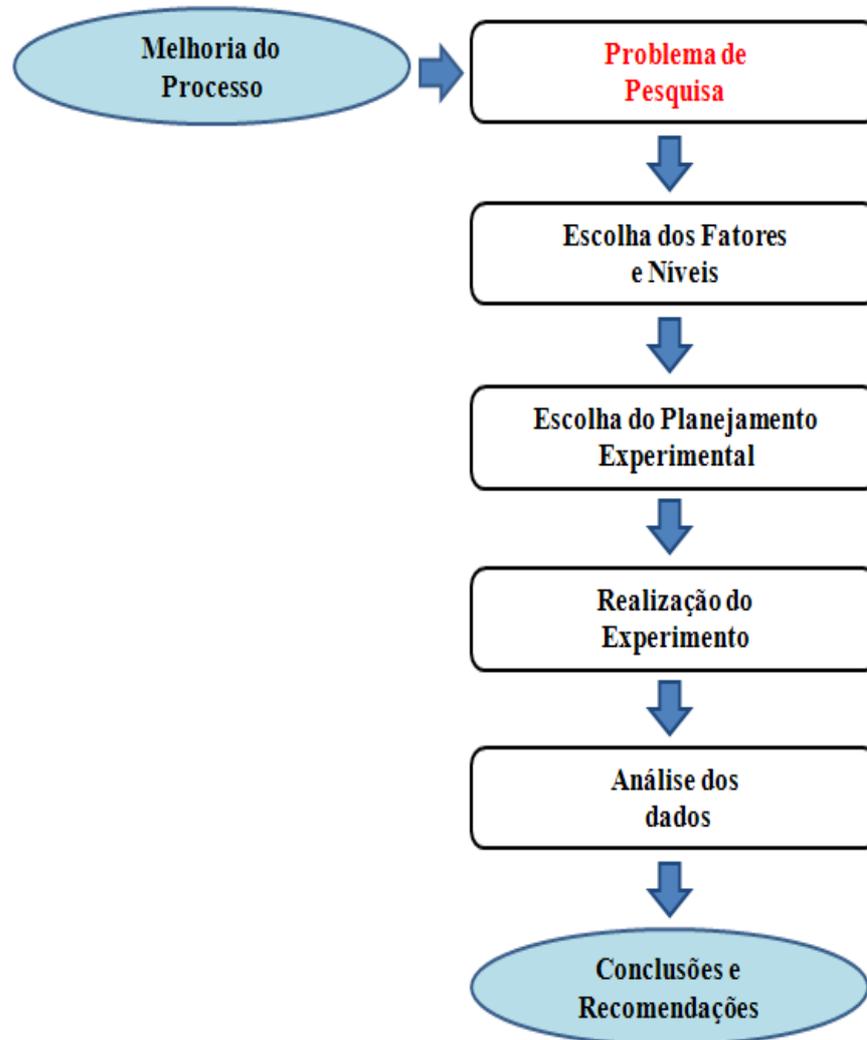


Figura 3.1 - Fluxograma de Procedimento de Condução de Experimentos

Com relação aos projetos experimentais, tem-se que técnicas mais utilizadas compreendem o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta (GOMES, 2010). Dessa forma, a Tabela 3.1, apresentada por Nilo Júnior (2003) e também citada por Gomes (2010), resume as principais características relacionadas a cada uma dessas técnicas experimentais.

Tabela 3.1 - Características Fundamentais das Principais Técnicas de DOE
Adaptado de Nilo Júnior, (2003); Gomes, (2010)

Projeto experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis. Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis.	Processos onde já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demanda maior tempo ou custo.
Fatorial Fracionado	Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas.	Não promove a varredura completa da região experimental.	Processos onde se deseja um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada. Corridas que demandam maior tempo ou custo.
Taguchi	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos.	Fornecer uma idéia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo
Metodologia de Superfície de Resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo.	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nestes níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

Dentre as técnicas mais utilizadas para a realização do projeto de experimentos, destacam-se para esse trabalho o Planejamento Fatorial Completo 2^k e a Metodologia de Superfície de Resposta. Sendo assim, os principais conceitos que fundamentam o Planejamento Fatorial Completo 2^k e a Metodologia de Superfície de Resposta são discutidos com maiores detalhes no item seguinte.

3.4. Planejamento Fatorial Completo 2^k

Um experimento fatorial com k fatores, cada um deles com dois níveis, é denominado de experimento fatorial 2^k . Considera-se um Planejamento Fatorial como completo quando

todas as combinações possíveis entre os fatores são experimentadas (COX e REID, 2000). O arranjo experimental mais comum é o fatorial completo, para o qual o número de experimentos é igual ao número de níveis experimentais elevado ao número de fatores.

No caso típico de fatoriais em dois níveis, o número de experimentos (N) para se avaliar os k fatores é dado por $N = 2^k$. Os arranjos fatoriais completos podem ser gerados para qualquer quantidade de fatores e os níveis de cada fator se alternam nas colunas segundo uma mesma ordem tal que para a primeira coluna, os níveis se alteram a cada experimento (2^0); para a segunda coluna, os níveis se alteram a cada (2^1); para a terceira coluna, os níveis se alteram a cada (2^2) e assim por diante. O procedimento se repete para tantas colunas quantas forem os k fatores, até a k -ésima coluna. Fatoriais Completos cobrem todo o espaço experimental e correspondem ao arranjo experimental mais comum (PAIVA, 2006). Porém, enquanto o número de fatores cresce linearmente, o número de experimentos cresce exponencialmente. Uma quantidade muito grande de fatores pode tornar um processo de experimentação inviável. O processo experimental dessa técnica consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental. Após esses testes, são determinados e interpretados os efeitos principais e de interações dos fatores investigados e dessa forma pode-se identificar as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação. Esta técnica pode ser ilustrada considerando-se um experimento com três fatores X_1 , X_2 e X_3 cada um desses com dois níveis (-1; +1). Esse exemplo é apresentado por vários que estudam as técnicas de planejamento e análise de experimentos (DEVOR *et al.*, 1992; MONTGOMERY, 1991). Assim a matriz experimental para o experimento fatorial 2^3 é representada pela Tabela 3.2. A resposta de cada ensaio é descrita pela coluna y_i .

Tabela 3.2 - Matriz de Planejamento 2^3

Número de Experimentos	Fatores			Ordem do Experimento	Resposta (y_i)
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	-1	6	y_1
2	+1	-1	-1	8	y_2
3	-1	+1	-1	1	y_3
4	+1	+1	-1	2	y_4
5	-1	-1	+1	5	y_5
6	+1	-1	+1	3	y_6
7	-1	+1	+1	4	y_7
8	+1	+1	+1	7	y_8

Devor *et al.* (1992) descreve o procedimento que pode ser utilizado para construir a matriz genérica do experimento fatorial 2^k . Na matriz de planejamento, as colunas representam o conjunto de fatores investigados ($X_1, X_2, X_3 \dots X_k$), e as linhas representam os experimentos que devem ser realizados, variando-se os níveis dos fatores nos valores máximo (+1) e mínimo (-1). Esta forma de organizar o experimento é chamada de ordem padrão, conforme definido por Devor *et al.* (1992). Ainda, garante-se que com esse arranjo todas as colunas da matriz sejam ortogonais entre si. Com esse tipo de planejamento, é possível determinar os efeitos principais e de interação que as variáveis independentes produzem nas respostas. Segundo Montgomery (2005), o modelo estatístico do experimento fatorial 2^3 é dado pela Equação 3.1.

$$y = \beta + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1 x_2 + \beta_5 x_2 x_3 + \beta_6 x_1 x_3 + \beta_7 x_1 x_2 x_3 \quad (3.1)$$

Onde:

β = constante

β_i = coeficiente de controle para X_i

X_i = fator de controle

O método generalizado que pode ser utilizado para estimar os efeitos principais e de interação dos fatores é apresentado a seguir, conforme descrito por Devor *et al.* (1992) e Montgomery (1991). Quando o nível de um determinado fator é alterado de (-1) para (+1) e os demais fatores são mantidos constantes, a mudança da resposta média observada correspondem aos efeitos principais. Isso é feito multiplicando os resultados da coluna y_i pelos valores +1 e -1 associados a coluna X_i da matriz experimental correspondente ao efeito principal que se deseja estimar. Em seguida, os valores obtidos devem ser somados e divididos pela metade do número de ensaios realizados, conforme demonstra a Equação 3.2.

$$E_i = \sum y_i * x_i / \left(\frac{N}{2} \right) \quad (3.2)$$

Sendo que:

E_i é o efeito estimado

N é o número total de observações

$\sum y_i * x_i$ é a soma dos resultados (y_i) do experimento multiplicados pela coluna x_i

Para determinar o efeito de interação, o primeiro passo é construir as colunas das interações da matriz de planejamento. Essas colunas são formadas por meio da multiplicação das colunas dos efeitos principais. Por exemplo, para estimar o efeito de interação E12, serão multiplicadas as colunas dos fatores X_1 e X_2 da matriz experimental são utilizados para estimar o efeito de interação.

Conforme descrito por Devor *et al.* (1992) e Montgomery (1991), outros métodos para calcular os efeitos podem ser utilizados. Nesta etapa dos experimentos alguns autores comentam que embora seja simples estimar esses efeitos, muitas vezes é difícil estimar qual é realmente o fator de controle que produz uma diferença significativa nas repostas. Na maioria das vezes necessita-se usa os gráficos lineares e de probabilidade normal. Nesta fase do desenvolvimento do experimento podem ser utilizados diversos softwares para construir os gráficos. Para representar e interpretar graficamente os efeitos principais e de interação é necessário:

O sinal (+ -) indica a direção do efeito, isto é, se a resposta aumenta ou diminui com a variação do nível. A magnitude indica a intensidade do efeito.

A Figura 3.2 a seguir representa a forma gráfica do efeito principal. Esse gráfico linear ilustra a variação média das repostas em função da mudança do nível (-1, +1) de um fator (X_1), mantendo os outros fatores constantes.

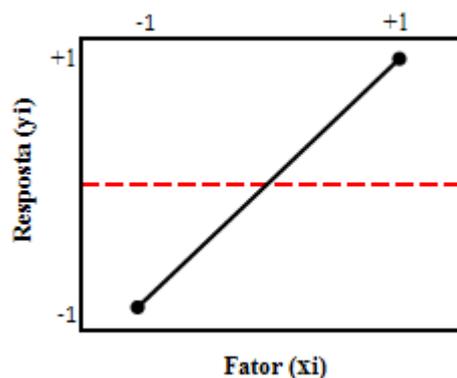


Figura 3.2 - Gráfico do Efeito Principal X_i com Relação à Resposta y_i

A Figura 3.3 apresenta os gráficos dos efeitos de interação. Esses gráficos descrevem a variação média de um fator em função dos níveis de outros fatores. A Figura 3.3 demonstra que o efeito provocado pela mudança no nível do fator X_1 na resposta é independente do nível do fator X_2 , portanto, existe interação entre os fatores X_1 e X_2 .

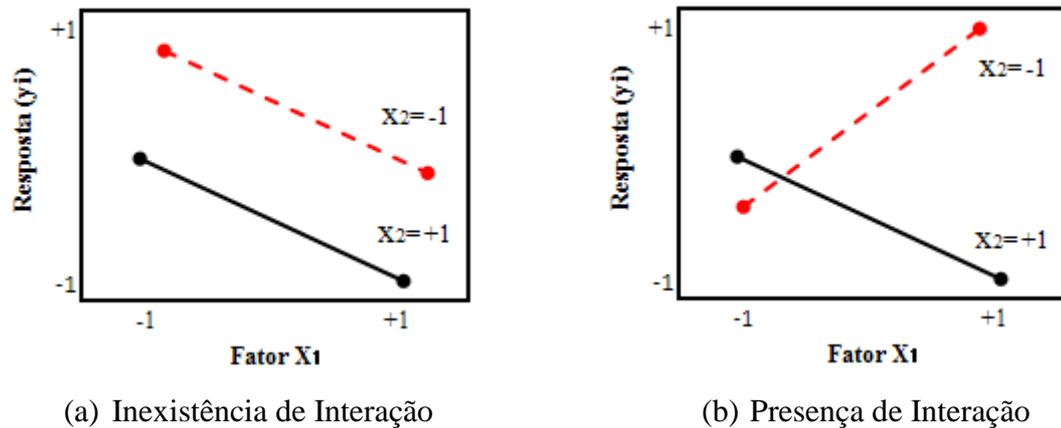


Figura 3.3 - Gráfico de Interação

O gráfico de probabilidade normal, conforme Figura 3.4, é outro tipo de gráfico que pode ser utilizado na análise experimentos. O uso dos gráficos de probabilidade normal é baseado no fato de que os efeitos principais ou de interação que são desprezíveis se distribuem segundo uma distribuição normal centrada em zero e com variância. Ou seja, esses efeitos tendem a se concentrar ao longo de uma reta normal no gráfico. No entanto, se os pontos marcados no gráfico parecem desviar-se de algum modo dessa linha imaginária, existem motivos para acreditar que esses dados obtidos não estão distribuídos de maneira normal, portanto, são efeitos significativos que devem ser analisados com mais detalhes pela equipe que realiza os experimentos industriais.

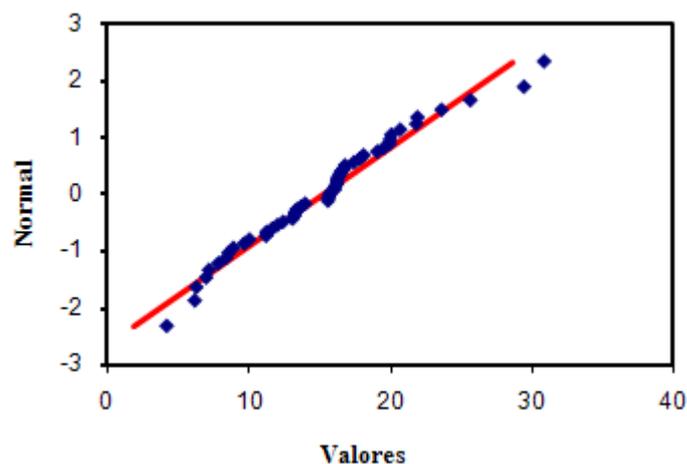


Figura 3.4 - Gráfico de Teste de Normalidade

Segundo Devor *et al.* (1992) esses gráficos são utilizados nas situações onde é importante obter uma estimativa independente do erro experimental para julgar a importância

dos efeitos principais e de interação, mas não é possível repetir um experimento fatorial 2^k . Esse tipo de erro é proveniente de fatores incontroláveis que produzem uma variação nas respostas ao realizar os ensaios sob condições preestabelecidas. Esses erros podem ser classificados em dois grupos, conforme segue (GALDÁMEZ, 2002):

Erros sistemáticos: são causados por fontes identificáveis. Esse tipo de erro faz com que os resultados experimentais estejam acima ou abaixo do valor real, influenciado a exatidão da medida. Essa flutuação pode ser causada pelo instrumento utilizado para controlar o experimento, método de observação, efeitos ambientais ou pelas simplificações do modelo teórico.

Erros aleatórios: são as flutuações que ocorrem de uma repetição para outra, porém, todos os possíveis resultados estão dentro de um intervalo de valores. Esse tipo de erro afeta a precisão das medidas. Segundo os autores nem sempre podem ser identificadas as fontes que causam o erro aleatório. Entretanto, esse tipo de erro no experimento pode ser tratado quantitativamente através de métodos estatísticos, de modo que seus efeitos na grandeza física medida podem ser, em geral, determinados. Esses erros podem aparecer na forma de variações em diversos momentos durante a execução de um processo, e/ou estar relacionados com diferentes etapas do processo. Dessa forma, as variações podem também ser identificadas como sendo do processo de produção, do instrumento de medição, do operador, da peça, etc. Todas essas variações devem ser absorvidas pela tolerância especificada para a característica em estudo. As principais vantagens da técnica fatorial 2^k é que através da análise dos experimentos pode-se indicar as principais tendências e determinar uma direção promissora para as experimentações subsequentes. Ainda, os autores ressaltam que com esse tipo de experimento é possível quantificar o erro experimental (MONTGOMERY, 1991; NETO *et al.* 2010).

3.5. Análise de Variância

A Análise de Variância é uma técnica utilizada para se testar a igualdade entre médias de vários grupos (MONTGOMERY e RUNGER, 2003). Respostas médias estatisticamente iguais, geradas por dois níveis de um fator, significa que o fator não influencia a resposta. Quando, ao contrário, a resposta média em um nível específico é estatisticamente diferente daquela obtida nos outros níveis, o fator é significativo. Para

um Planejamento Fatorial de 2 fatores A e B, em dois níveis (+1, -1) pode-se escrever a seguinte Equação 3.3 como modelo estatístico do experimento:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (3.3)$$

onde:

i = número de níveis do fator A ($i = 1, 2, 3, \dots, a$);

j = número de níveis do fator B ($j = 1, 2, 3, \dots, b$);

k = número de replicações de cada combinação de fatores ($k = 1, 2, 3, \dots, n$).

O termo Y_{ijk} é a (ijk)-ésima observação obtida no experimento; μ é um parâmetro comum a todos os tratamentos, denominado de média geral; A_i é efeito do i -ésimo tratamento do Fator A; B_j o efeito do j -ésimo tratamento do Fator B; $(AB)_{ij}$, o efeito da ij -ésima interação AB entre os fatores e ε_{ijk} , um componente do erro aleatório. O parâmetro de teste utilizado pela ANOVA para verificar a igualdade entre as médias baseia-se na relação existente entre a variação dentro de um tratamento (Within) e a variação entre tratamentos (Between) (MONTGOMERY e RUNGER, 2003). A variação dentro origina-se das replicações. Calculando-se a média das replicações, obtém-se a média do tratamento. Quanto mais as replicações diferirem desta média, maior será a variação dentro deste tratamento. A variação dentro também é chamada de Erro. Paiva (2006), mostra que se dividindo a variação entre pela variação dentro obtém-se a Estatística de Teste F, que, quando comparada com um valor de F crítico, definido segundo o nível de significância e o número de graus de liberdade, possibilita a aceitação ou rejeição da hipótese nula, acerca da igualdade entre as médias dos níveis dos fatores. Sempre que se toma uma decisão ou se faz uma inferência sobre uma população a partir de dados amostrais corre-se o risco de se cometer algum tipo de erro. Hipótese é tão somente uma afirmação que se deseja testar, tendo como fonte de provas os dados provenientes da análise da amostra.

São dois os tipos de erro (mutuamente exclusivos) que podem ser cometidos em um teste de hipótese. O primeiro é o Erro Tipo I, que consiste em se rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira. Sua probabilidade de ocorrência é α , denominado nível de significância do teste. O segundo é o Erro Tipo II, que consiste em se aceitar a hipótese nula quando ela for falsa. A probabilidade de se cometer este tipo de erro é β .

A probabilidade de se aceitar a hipótese nula quando ela é verdadeira é $1-\alpha$, e é denominado nível de confiança do teste. A probabilidade de se rejeitar a hipótese nula quando ela for falsa é $1-\beta$, e é chamada de Poder do Teste (MONTGOMERY e RUNGER, 2003; NETO *et al.* 2010). A amostra fornece a Estatística de Teste, parâmetro que quando comparado ao Valor Crítico determinado por α , conduz à aceitação ou rejeição da hipótese nula. Ao conjunto de todos os valores da estatística de teste que levam à rejeição da hipótese nula dá-se o nome de Região Crítica. Cada estatística de teste está associada a uma distribuição de probabilidade (t-student, F-Fisher, Qui-Quadrado, Normal Padronizada, etc.) (GALDÁMEZ, 2002). No caso da ANOVA, a distribuição utilizada para o teste de hipótese é a Distribuição F de Snedecor.

3.6. Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), segundo Montgomery (2005), é uma coleção de ferramentas matemáticas e estatísticas utilizada para a modelagem e análise de problemas em que a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e o objetivo é a otimização desta resposta. Para a maioria dos problemas, verifica-se que as relações entre a resposta e as variáveis independentes são desconhecidas. Assim, o primeiro passo consiste em encontrar uma aproximação adequada para representar a resposta de interesse em função das variáveis do processo. Geralmente, funções polinomiais são empregadas para a descrição de tais relações. Dessa forma, se a resposta for bem modelada por uma função linear, a relação aproximada pode ser representada pelo seguinte modelo de primeira ordem, conforme Equação 3.4:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3.4)$$

onde: y - Resposta de interesse

X_i - Variáveis independentes

β_i - Coeficientes a serem estimados

k - Número de variáveis independentes

ε - Erro experimental

Se o sistema apresentar curvatura, então um polinômio de maior grau deve ser usado, como o modelo de segunda ordem descrito pela Equação 3.5:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.5)$$

Quase todos os problemas de superfície de resposta utilizam um ou ambos os modelos acima. Além disso, é improvável que o modelo polinomial se comporte como uma aproximação adequada para todo o espaço experimental coberto pelas variáveis independentes. Entretanto, para uma região específica, tais modelos tem se mostrado eficientes. Para a estimação dos coeficientes definidos pelos modelos das Equações (3.4) e (3.5), o algoritmo tipicamente usado é o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least Squares* – OLS). Com isso, fica construída a função aproximada que relaciona a resposta de interesse com as variáveis do processo. Após a construção do modelo, a significância do mesmo é verificada através de um procedimento ANOVA (Análise de Variância). Este teste de significância é importante para avaliar se o modelo é estatisticamente significativo. Além disso, o ANOVA também permite verificar quais entre os termos do modelo são significativos e quais podem ser removidos.

O ajuste dos modelos é representado através do coeficiente de determinação (R-Sq), que representa o percentual de variação na resposta que é explicada pelo modelo construído. Associado a este coeficiente, encontra-se o (R-Sq), ajustado (R-Sq (adj.)), que considera o fato de que (R-Sq), tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população. Uma visão mais detalhada envolvendo o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, Análise de Variância e ajuste dos modelos pode ser observada em Paiva (2006), juntamente com outras análises importantes como a análise de resíduos e o teste de falta de ajuste (*Lack-of-fit*).

3.7. Arranjo Composto Central

O arranjo composto central (Box-Wilson Central Composite Design - CCD), para ajustar um modelo de superfície de resposta de segunda ordem, é um arranjo largamente utilizado na prática, devido à sua relativa eficiência com respeito ao número de corridas requeridas.

O CCD é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo ou fracionado; um conjunto de pontos centrais e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados Pontos Axiais. Se a distância entre o centro do arranjo e o ponto fatorial (+1; -1) for aproximadamente 1 (em módulo), a distância do centro ao ponto axial será maior que a unidade. Esta distância, comumente representada por α ,

depende de certas propriedades desejadas para o experimento e do número de fatores envolvidos (MONTGOMERY, 2001), tal como ilustra a Figura 3.5. O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam seus valores extremos. Em função de sua localização, podem ser circunscritos, inscritos ou de face centrada. O Arranjo Circunscrito (CCC) é o CCD original. Nele, os pontos axiais estão a uma distância α do centro, baseado nas propriedades desejadas do projeto. Este arranjo requer 5 (cinco) níveis para cada fator.

O Arranjo Inscrito (CCI) é adequado às situações nas quais os limites especificados não podem ser extrapolados, quer por medida de segurança, quer por incapacidade física de realização. Neste caso, o CCI utiliza os níveis dos fatores como pontos axiais e cria um fatorial completo ou fracionado dentro desses limites. Um CCI requer cinco níveis. O Arranjo de Face Centrada (CCF) caracteriza-se por dispor os pontos axiais sobre o centro de cada face do espaço fatorial, ou seja, $\alpha = +1$ ou -1 . Requer três níveis para cada fator.

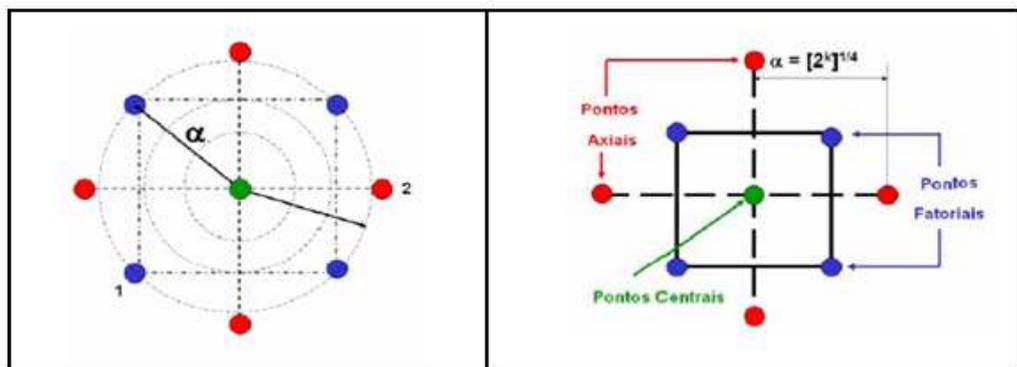


Figura 3.5 - Arranjo Composto Central para Três Fatores
Adaptado de Paiva, (2006)

Os tipos de CCD são conseguidos basicamente, pela alteração de alfa, conforme Figura 3.6.

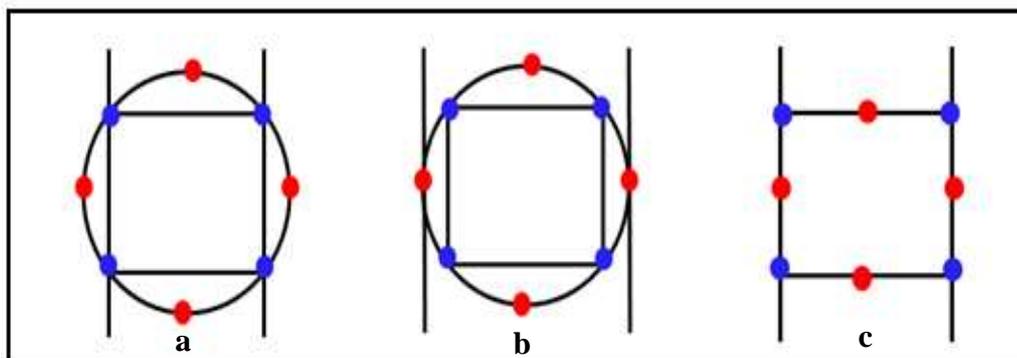


Figura 3.6 - Tipos de Planejamento CCD

a) Circunscrito (CCC): É o CCD original. Os pontos axiais estão a uma distância α do centro, baseado nas propriedades desejadas do design. Os pontos axiais estabelecem novos extremos para os fatores. Requerem 5 níveis para cada fator.

b) Inscrito (CCI): Para as situações nos quais os limites especificados para o conjunto de fatores são os limites reais, ou seja, não podem ser extrapolados porque é inócuo, desaconselhável ou perigoso.

O CCI utiliza os níveis dos fatores como pontos axiais e cria um fatorial completo ou fracionário dentro desses limites (o CCI é na verdade em CCC no qual os níveis dos fatores são divididos por α). Também requer 5 níveis para cada fator.

c) Face Centrada (CCF): Os pontos axiais estão sobre o centro de cada face do espaço fatorial, ou seja, $\alpha = +1$ ou -1 . Requer 3 níveis para cada fator.

Um CCC explora o maior espaço fatorial possível, enquanto que um CCI explora o menor. Ambos, CCC e CCI, são rotacionáveis. O mesmo não se aplica ao CCF.

Para manter a rotacionalidade de um arranjo, o valor de α depende do número de experimentos (k) da porção fatorial do CCD, conforme Equação 3.6. Segundo Box e Drapper (1987):

$$\alpha = (\text{número de experimentos})^{1/4} = (2^k)^{1/4} \quad (3.6)$$

O CCD ajusta-se, quando necessário, em um modelo polinomial de segunda ordem (MONTGOMERY, 2001). Geralmente, um CCD com k fatores requer 2^k corridas fatoriais, $2k$ corridas axiais e, no mínimo, um ponto central, utilizando de três a cinco pontos centrais.

Este modelo é adequado, uma vez que muitos processos podem ser aproximados por uma expansão em série de Taylor, truncada em um termo quadrático.

3.8. Otimização de Processo

O objetivo principal da otimização de um processo é encontrar condições de operação que maximizem (ou minimizem) a resposta de interesse. Segundo Montgomery (2001), em um experimento de caracterização, usualmente estamos interessados em determinar quais

variáveis do processo afetam a resposta. Um passo lógico é otimizar isto é, determinar as regiões, nos fatores importantes, que levam à melhor resposta possível.

3.9. Otimização de uma Única Resposta

De acordo com Box e Wilson (1951), a otimização experimental de sistemas com uma única variável de resposta deve ser conduzida em duas fases, conforme Figura 3.7. A primeira consiste numa sequência de procura linear na direção da máxima otimização. Esta procura é realizada até que haja evidência de que a direção escolhida não resulta em melhorias adicionais para o modelo, ou, enquanto não houver evidências de falta de ajuste para o modelo de primeira ordem.

De acordo com Lin e Chou (2002), a segunda fase só é realizada se for detectada falta de ajuste no modelo de primeira ordem. Evidentemente, nem todas as respostas requererão ajustes dessa natureza, e, em tais casos, o modelo da primeira fase será suficiente quando não houver melhorias adicionais.

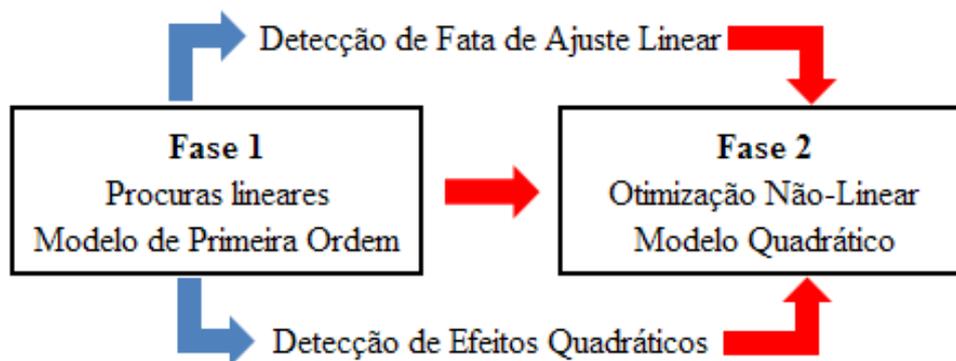


Figura 3.7 - Estratégia de Otimização Experimental

Se a resposta for bem modelada por uma função linear, então, a função de aproximação é um modelo de primeira ordem. Caso contrário, adota-se um modelo de segunda ordem, como pode ser observado na Figura 3.7. Quando uma experimentação é planejada para um processo sobre o qual se conhece pouco, existe uma chance de que as condições iniciais estejam muito distantes da real região de ótimo.

Conforme comentado anteriormente, o objetivo é manter o experimento ao longo da direção de máxima ascensão até que a resposta do experimento não experimente melhorias adicionais. Neste ponto, um novo experimento fatorial com pontos centrais deve ser aplicado para se determinar a nova direção. Este processo deve ser repetido até que alguma curvatura seja detectada. A curvatura ou falta de ajuste considerável do modelo linear indica que os

parâmetros do experimento estão próximos da região de máximo (PAIVA, 2006). Segundo Lin e Chou (2002); há duas coisas importantes a se observar na Fase 1: (a) determinar a direção de busca e (b) o comprimento do passo utilizado para conduzir o experimento para região de ótimo.

O Método do Vetor Gradiente, segundo Forster e Barthe (1990) indica a direção na qual a resposta aumenta mais rapidamente, Figura 3.8. Esta direção é paralela a uma reta normal traçada sobre as superfícies de respostas ajustadas, passando pelo centro da região de interesse, a partir do modelo ajustado de primeira ordem. Consequentemente, o comprimento dos passos ao longo desse caminho de melhoria é proporcional aos coeficientes de regressão.

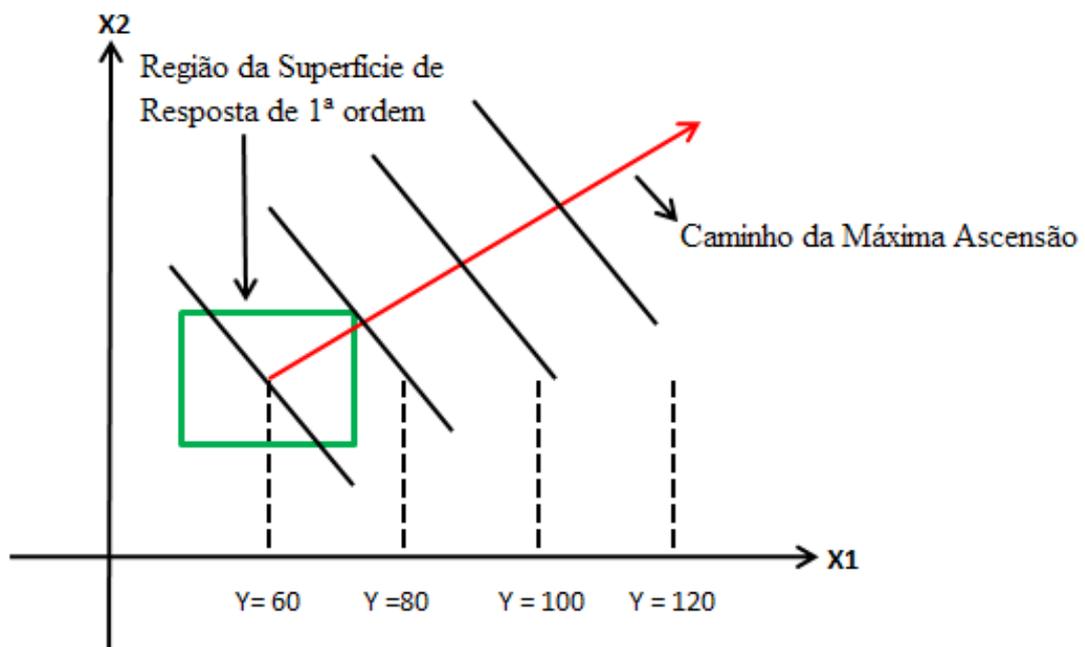


Figura 3.8 - Método do Vetor Gradiente

De acordo com Box e Draper (1987), o tamanho do passo pode ser dado pela Equação 3.7, baseando-se no coeficiente de o maior valor absoluto.

$$\Delta x_i = \frac{\hat{\beta}_i}{\hat{\beta}_j / x_j} \Delta x_j \quad (3.7)$$

Sendo:

$$i=1,2,\dots \quad \neq$$

Posteriormente, deve ser feita a conversão de variáveis codificadas para variáveis naturais. Para facilitar os cálculos, adota-se x_i igual a 1. Uma vez determinado o

comprimento do passo para cada variável (codificada e natural), os experimentos devem ser realizados enquanto houver melhorias na resposta y . Uma vez alcançado o ponto a partir do qual a resposta não sofre melhorias adicionais, um novo experimento deve ser realizado utilizando-se pontos centrais para que a falta de ajuste do modelo seja avaliada. Contudo, se não for detectada falta de ajuste, o novo modelo de primeira ordem deverá fornecer uma nova direção para a investigação. De outro modo, o projeto experimental deve ser aumentado com pontos axiais para que um modelo de segunda ordem seja avaliado (PAIVA, 2006).

3.10. Ponto Estacionário

Otimizar uma resposta significa encontrar o melhor conjunto de soluções para as variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_k que atendam uma determinada condição de Y . Se uma função possui ponto de máximo ou de mínimo, a derivada primeira dessa função é igual a zero. No caso da função ser composta por um conjunto de variáveis independentes, as derivadas parciais da função em relação a cada uma das variáveis independentes também devem ser zero, para que haja um ponto de máximo ou de mínimo. Este é o Ponto Estacionário. Em notação matemática, pode-se escrever, conforme Equação (3.8).

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} = \dots = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_k} = 0 \quad (3.8)$$

Segundo Box e Draper (1987), escrevendo-se um modelo de segunda ordem em notação matricial (Forma Canônica), conforme Equação (3.9) tem-se:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + x' b + x' B x \quad (3.9)$$

Onde:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_k \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 & \dots & \hat{\beta}_{1k}/2 \\ & \hat{\beta}_{22} & \dots & \hat{\beta}_{2k}/2 \\ & & \dots & \hat{\beta}_{kk} \\ \text{Simétrico} & & & \end{bmatrix}$$

Na Equação (3.10), b representa o vetor dos coeficientes de regressão de primeira ordem e B é uma matriz simétrica, com a diagonal principal formada pelos coeficientes dos termos Quadráticos puros. Os demais coeficientes de B são representados pela metade do valor dos coeficientes mistos (interações). Como a matriz é simétrica, os mesmos coeficientes estarão presentes na parte de baixo da diagonal principal. Igualando-se a zero a derivada de y em relação aos elementos do vetor x tem-se que:

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_i} = b + 2Bx = 0 \quad (3.10)$$

Logo tem se que o ponto estacionário x_s é:

$$x_s = -\frac{1}{2}B^{-1}b \quad (3.11)$$

Para se conhecer a natureza da superfície de resposta, deve-se examinar o sinal e a magnitude dos autovalores da matriz característica $[B]$. Segundo Montgomery (1997), se todos os autovalores de $[B]$ forem positivos, então, x_s é ponto de mínimo; se todos forem negativos, x_s é ponto de máximo; se os autovalores tiverem sinais opostos, x_s é um ponto de inflexão (*saddle point*).

3.11. Gradiente Reduzido Generalizado

Para resolver problemas de otimização Não-Lineares (*Nonlinear Problem – NLP*), diversos métodos são conhecidos. De acordo com Köskoy e Doganaksoy (2003), o algoritmo denominado Gradiente Reduzido Generalizado (*Generalized Reduced Gradient – GRG*) é o que apresenta maior robustez, visto que é apropriado para resolução de uma vasta variedade de problemas, e com maior eficiência entre os métodos de otimização de restrições não-lineares disponíveis. Este será o método adotado no presente trabalho. O algoritmo (GRG) é uma escolha muito popular porque o método é amplamente aplicável a muitos tipos de problemas de otimização Não-Lineares e porque está extensamente disponível no software comercial Excel (CARLYLE *et al.* 2000).

O Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) é um método para a resolução de problemas de programação não-linear com restrições. Basicamente, o método prevê apenas a utilização de restrições lineares ou não-lineares de igualdade. Entretanto, para casos onde a

restrição for de desigualdade, contorna-se o problema introduzindo-se variáveis de folga (se a restrição for do tipo \leq), ou variáveis de excesso (no caso de restrições do tipo \geq).

O método GRG é conhecido como um método primal (KÖKSOY, 2007), e frequentemente chamado de método da direção viável, apresentando, segundo Luenberger (1989), três significantes vantagens: (i) se o processo termina antes da confirmação do ótimo, o último ponto encontrado é viável devido ao fato de que cada ponto gerado no processo de pesquisa é viável e provavelmente próximo do ótimo; (ii) se o método gera uma sequência convergente, o ponto limite garante, pelo menos, um mínimo local; (iii) a maioria dos métodos primais são geralmente absolutos, não dependendo de uma estrutura especial, tais como a convexidade. Segundo Lasdon *et al.* (1978), Nash *et al.* (1996) e Koksoy e Doganaksoy (2003) o GRG é um algoritmo aplicado a problemas de otimização do tipo:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} && f(X) \\
 & \text{Sujeito a:} && g_i(X) = 0, \dots, i = 1, neq, \\
 & && 0 \leq h_i(X) \leq ub(n+1), \dots, i = neq+1, m, \\
 & && lb(i) \leq X_i \leq ub(i), \dots, i = 1, n,
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Onde X é um vetor de n variáveis. O número de restrições de igualdade (neq) pode ser zero. As funções g_i são consideradas diferenciáveis. As equações escritas na forma Equação (3.12), são convertidas em restrições de igualdade adicionando-se variáveis de folga X_{n+1}, \dots, X_{n+m}

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} && f(X) \\
 & \text{Sujeito a:} && h \\
 & && g_i(X) - X_{n+i} = 0, \dots, i = 1, m \\
 & && lb(i) \leq X_i \leq ub(i), \dots, i = 1, n+m, \\
 & && lb(i) = ub(1) = 0, \dots, i = n+1, n+neq, \\
 & && lb(i) = 0, \dots, i = n+neq+1, n+m.
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Estas duas últimas Equações de (3.13) são os limites para as variáveis de folga. A expressão “gradiente reduzido” significa que o algoritmo GRG é inicializado com a substituição das restrições na função objetivo, reduzindo assim o número de variáveis e, conseqüentemente, de gradientes presentes. Dado um vetor viável x , fazendo-se a partição das variáveis em básicas (ou dependentes) e não-básicas (independentes), pode-se escrever que:

Com Z representando as variáveis independentes ou não básicas (gradiente reduzido na configuração irrestrita), e Y , representando as variáveis dependentes ou básicas (aquelas

escritas usando os resultados de Z). Reescrevendo-se a função objetivo e as restrições em termos das variáveis básicas e não-básicas, vem que:

$$\begin{aligned} F(X) &= F(Z, Y) \\ h(X) &= h(Z, Y) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Usando a expansão em série de Taylor, e derivando-se a função objetivo e as restrições, obtém-se:

$$\begin{aligned} dF(X) &= \nabla_Z F(X)^T dZ + \nabla_Y F(X)^T dY \\ dF_j(X) &= \nabla_Z h_j(X)^T dZ + \nabla_Y h_j(X)^T dY \end{aligned} \quad (3.15)$$

Para atender à condição de otimalidade é necessário que $dh_j(X) = 0$, ou seja, as restrições ativas e viáveis permanecem neste estado. Então, definindo-se:

$$\begin{aligned} A &= \nabla_Z h_j(X)^T \\ B &= \nabla_Y h_j(X)^T \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$dh_j(X) = AdZ + BdY$$

Assim pode-se escrever a Equação (3.17):

$$dY = B^{-1} [dh_j(X) - AdZ] = -B^{-1} AdZ \quad (3.17)$$

Esta é a relação entre as mudanças nas variáveis básicas e não-básicas. Substituindo esta expressão nas Equações (3.15 e 3.16) tem-se que:

$$\begin{aligned} dF(X) &= \nabla_Z F(X)^T dZ + \nabla_Y F(X)^T - [B^{-1} A] dz \\ dF(X) &= \left\{ \nabla_Z F(X) + \nabla_Y F(X) - [B^{-1} A]^T \right\} dZ \end{aligned} \quad (3.18)$$

Nota-se claramente, que o problema restrito original se transformou em um problema irrestrito, escrito apenas em função de Z. Utilizando-se estes resultados, pode-se definir o gradiente como:

$$G_R = \frac{d}{dZ} F(X) = \nabla_Z F(X) - [B^{-1} A]^T \nabla_Y F(X)^T \quad (3.19)$$

A Equação (3.20) é a formulação para o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) baseado em uma aproximação linear. Com este equacionamento, a direção de busca pode ser escrita como:

$$S_X = \left\{ \begin{array}{c} S_Z \\ S_Y \end{array} \right\} \quad (3.20)$$

Sendo:

$$S_X = -G_R$$

$$S_Y = dY$$

Para as iterações, deve se utilizar a Equação (3.21):

$$X^{k+1} = X^k + \alpha S^{k+1} \quad (3.21)$$

verificando-se em cada passo se X^{k+1} é viável e se $h(X^{k+1}) = 0$. Em seguida, basta resolver $F(X)$ escrito em termos do multiplicador de Lagrange α . Para tanto, deve-se utilizar algum algoritmo unidimensional de busca, tal como o método de Newton.

3.12. Otimização de Múltiplas Respostas

Encontrar uma condição ótima para operação de um processo que o viabilize ou produza resultados com consideráveis melhorias, é o objetivo fundamental da metodologia de superfície de resposta. Inevitavelmente, em algumas situações, os processos deverão atender a mais de uma resposta. É muito comum desejar se que, várias características sejam satisfeitas num mesmo processo. E para alcançar tais resultados, diversos algoritmos de modelagem são utilizados para estabelecer funções de transferência entre os dados e as variáveis de controle experimentais, viabilizando a determinação do ponto de ótimo (PAIVA, 2008). A seguir, será apresentado o algoritmo *Desirability* utilizado para otimizar simultaneamente múltiplas respostas..

3.13. O Método *Desirability*

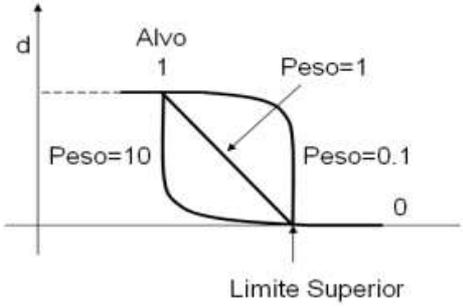
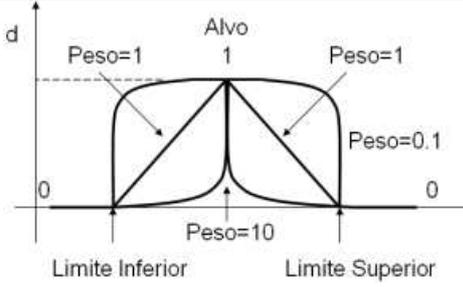
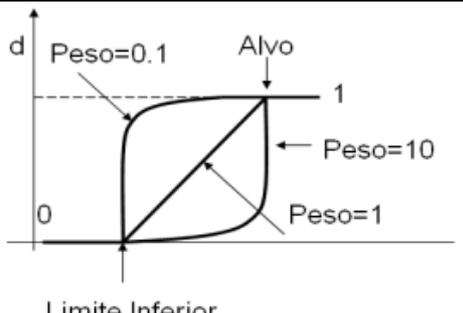
O Método *Desirability* – expressão não traduzida por entender-se não ser apropriado – é um algoritmo criado originalmente por Harrington (1965) e, posteriormente aprimorado por Derringer e Suich (1980), para tratar da otimização simultânea dos modelos de múltiplas

respostas. Segundo Van Gyseghem *et al.* (2004), o *Desirability* é um método multicritério capaz de avaliar um conjunto de respostas simultaneamente, e que permite a determinação do conjunto de condições mais desejável para as propriedades estudadas. Utilizando-se MSR e OLS, estabelece-se um relacionamento entre as respostas e as variáveis independentes e, utilizando-se a formulação unilateral ou bilateral de Harrington (1965) e Derringer e Suich (1980), cada uma das respostas do conjunto original é transformada, tal que d_i pertença ao intervalo $0 \leq d_i \leq 1$. O valor de d_i aumenta quando a i ésima resposta se aproxima dos limites impostos. A Equação (3.22), abaixo é utilizada para se encontrar o índice global D , a partir da combinação de cada uma das respostas transformadas através de uma média geométrica.

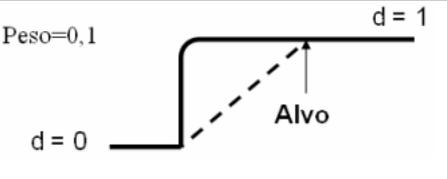
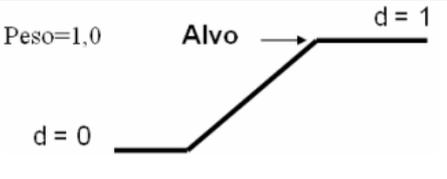
$$D = ((d_1(Y_1) * d_2(Y_2) * \dots * d_k(Y_k)))^{\frac{1}{k}} \quad (3.22)$$

Como resultante da média geométrica representada pela Equação (3.22), o valor de D avalia de maneira geral os níveis do conjunto combinado de respostas. É um índice também pertencente ao intervalo $[0, 1]$ e será maximizado quando todas as respostas se aproximarem o máximo possível de suas especificações. Osborne *et al.* (1997) afirma que, quanto mais próximo de 1 estiver D , mais próximas as respostas originais estarão dos seus respectivos limites de especificação. O ponto de ótimo geral do sistema é o ponto de ótimo alcançado pela maximização da média geométrica, Equação (3.22), calculada a partir das funções *Desirability* individuais. A utilização da média geométrica tem a vantagem de fazer com que a solução global seja alcançada de maneira balanceada, permitindo que todas as respostas atinjam os valores esperados e forçando o algoritmo a se aproximar das especificações impostas. Caso isto não seja possível, o algoritmo retorna uma solução inviável (e indesejável) para o problema. Na essência, este método condensa um problema de otimização multivariada em um problema univariado.

A desvantagem, segundo Khuri e Conlon (1981), é que nesta transformação, a estrutura de variância-covariância das respostas é totalmente ignorada. Outra desvantagem do método segundo Ortiz *et al.* (2004), é o aumento da não linearidade de D à medida que se considera um número maior de variáveis de respostas, caso em que o método poderá conduzir à localização de ótimos apenas locais. O algoritmo de Derringer e Suich (1980) depende do tipo de otimização desejada para a resposta (maximização, normalização ou minimização), dos limites (valores desejados) e das respectivas importâncias de cada resposta tal como os Quadros 3.1 e 3.2 a seguir:

Objetivo	Características	Representação Esquemática
Minimizar	O valor da função desirability aumenta enquanto que o valor da resposta original se aproxima de um valor alvo mínimo. Abaixo do alvo, $d=1$; acima do limite superior, $d=0$.	
Normalizar	Quando a resposta se move em direção ao alvo, o valor da função desirability aumenta. Acima ou abaixo dos limites, $d=0$; no alvo $d=1$.	
Maximizar	O valor da função desirability aumenta quando o valor da resposta aumenta. Abaixo do limite inferior, $d=0$; acima do alvo, $d=1$.	

Quadro 3.1 - Objetivos de Otimização no Método de Derringer
Adaptado de Paiva (2006)

	Se o peso é menor que 1 (valor mínimo é 0,1), então, menos ênfase se dá ao alvo.
	Quando o peso é igual a 1, a importância dada ao alvo é igual à importância dada aos limites.
	Se o peso dado à resposta é maior do que 1 (o valor máximo é 10), então, mais ênfase é dada ao alvo.

Quadro 3.2 - Relações de Importância entre o Alvo e os Limites no *Desirability*
Adaptado de Paiva (2006)

De acordo com Wu (2005) e Murphy *et al.* (2005), quando se deseja a maximização de uma resposta, a fórmula de transformação empregada é:

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{Y}_i < LSL \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - Li}{Ti - Li} \right]^R & Li \leq \hat{Y}_i \leq Ti \\ 1 & \hat{Y}_i > Ti \end{cases} \quad (3.23)$$

Onde: Li e Ti são, respectivamente, o maior e o menor valor aceitáveis para a i -ésima resposta. O valor de R na Equação (3.23) indica a preponderância dos limites. Valores maiores que a unidade devem ser usados quando a resposta cresce rapidamente acima de Li . Portanto, d_i aumenta vagarosamente, enquanto o valor da resposta vai sendo maximizado. Logo, para se maximizar D , a i -ésima resposta deve ser bem maior que Li .

Pode-se escolher $R < 1$, quando não for crítico se encontrar valores para a resposta abaixo dos limites fixados. A Minimização de \hat{Y}_i é equivalente a Maximização de $-\hat{Y}_i$ (DERRINGER e SUICH, 1980). Em casos em que o objetivo é atingir um valor alvo, a formulação de transformação deixa de ser unilateral e passa a ser bilateral. A formulação bilateral, representada pela Equação (3.24), ocorre quando a resposta de interesse possui duas restrições: uma de máximo e outra de mínimo.

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{Y}_i < Li \text{ ou } \hat{Y}_i > Hi \\ \left[\frac{Hi - \hat{Y}_i}{Hi - Ti} \right]^R & Ti \leq \hat{Y}_i \leq Hi \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - Li}{Ti - Li} \right]^R & Li \leq \hat{Y}_i \leq Ti \end{cases} \quad (3.24)$$

Deve-se considerar, entretanto, que, apesar de bastante difundida, o método *Desirability* tal como proposto por Derringer e Suich (1980), possui algumas limitações e inconsistências, quando implementado para otimização de processos com múltiplas respostas, podendo-se destacar:

(i) a dependência do método por uma escolha subjetiva das funções d_i individuais;

(ii) assim como destacam Ko *et al.* (2005) e Wu (2005), o método não leva em consideração a variância das respostas, bem como a estrutura de correlação entre elas.

4. Métodos e Procedimentos Experimentais

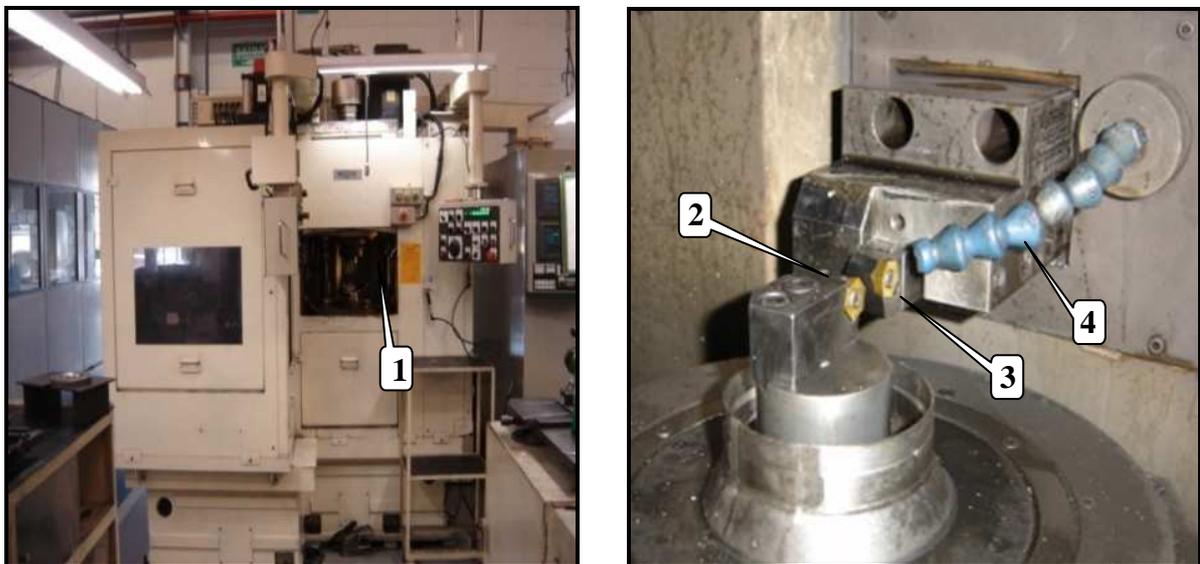
4.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento experimental deste trabalho. O estudo foi realizado na Mahle Metal Leve S.A., unidade de Itajubá, Minas Gerais.

Esta pesquisa tem como principal objetivo encontrar a melhor condição de usinagem para o processo de torneamento vertical duplo dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico, utilizando-se da metodologia de projeto de experimentos. Este capítulo descreve as condições em que os ensaios foram realizados, o planejamento experimental, a máquina-ferramenta, as características do material usinado, as especificações das ferramentas de corte e dos parâmetros de usinagem, visando facilitar a compreensão da metodologia utilizada e possibilitar a reprodução deste processo, e garantir a confiabilidade dos resultados obtidos.

4.2. Processo de Torneamento Vertical Duplo de Anéis de Pistão

Os experimentos foram realizados no Torno CNC adaptado para usinagem de anéis de pistão. Os principais dados da máquina são: potência de 15 kW e rotação de 500 rpm no eixo árvore. A Figura 4.1 mostra uma vista da máquina-ferramenta.



1. Estação de torneamento vertical;
2. Ferramenta e porta-ferramenta interno;
3. Ferramenta e porta-ferramenta externo;
4. Bico de refrigeração

Figura 4.1 - Torneamento Vertical

4.3. Ferro Fundido Cinzento Martensítico

Os ensaios foram realizados com uma liga de ferro fundido cinzento martensítico, fundido. A Tabela 4.1, mostra a composição química do material e a Figura 4.2 demonstra a matriz martensítica revenida:

Tabela 4.1 - Composição Química do Material

%	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Ti	V	W	Nb
Teor Médio	3,40	4,30	0,85	0,18	0,08	1,15	0,40	1,05	1,50	0,15	0,75	0,80	0,65

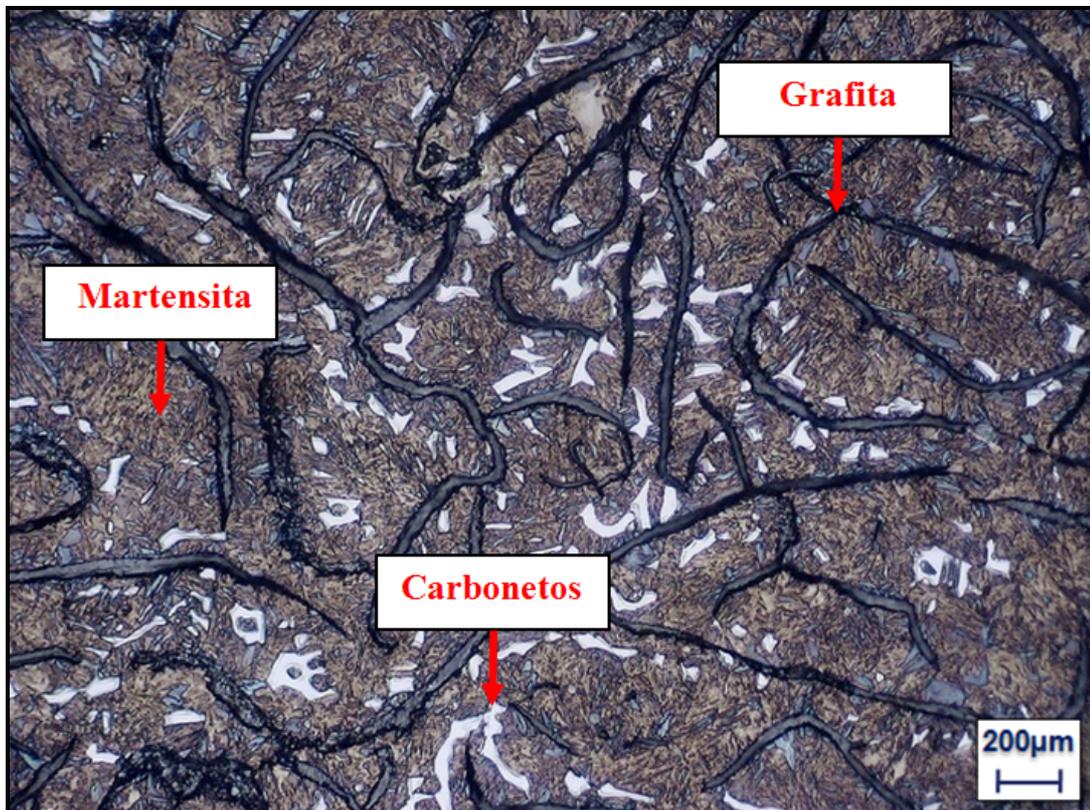


Figura 4.2 - Matriz Martensítica Revenida

Quanto às propriedades mecânicas do material, a dureza é uma das mais importantes e todas as medições apresentaram valor de 40 HRC, ou seja, as amostras estavam de acordo com a tolerância estabelecida pelo fabricante.

A Figura 4.3 apresenta a peça bruta (4.3a), a peça acabada (4.3b), enquanto que a (4.3c) mostra as irregularidades do diâmetro interno e externo que serão usinadas pelo processo de torneamento vertical.

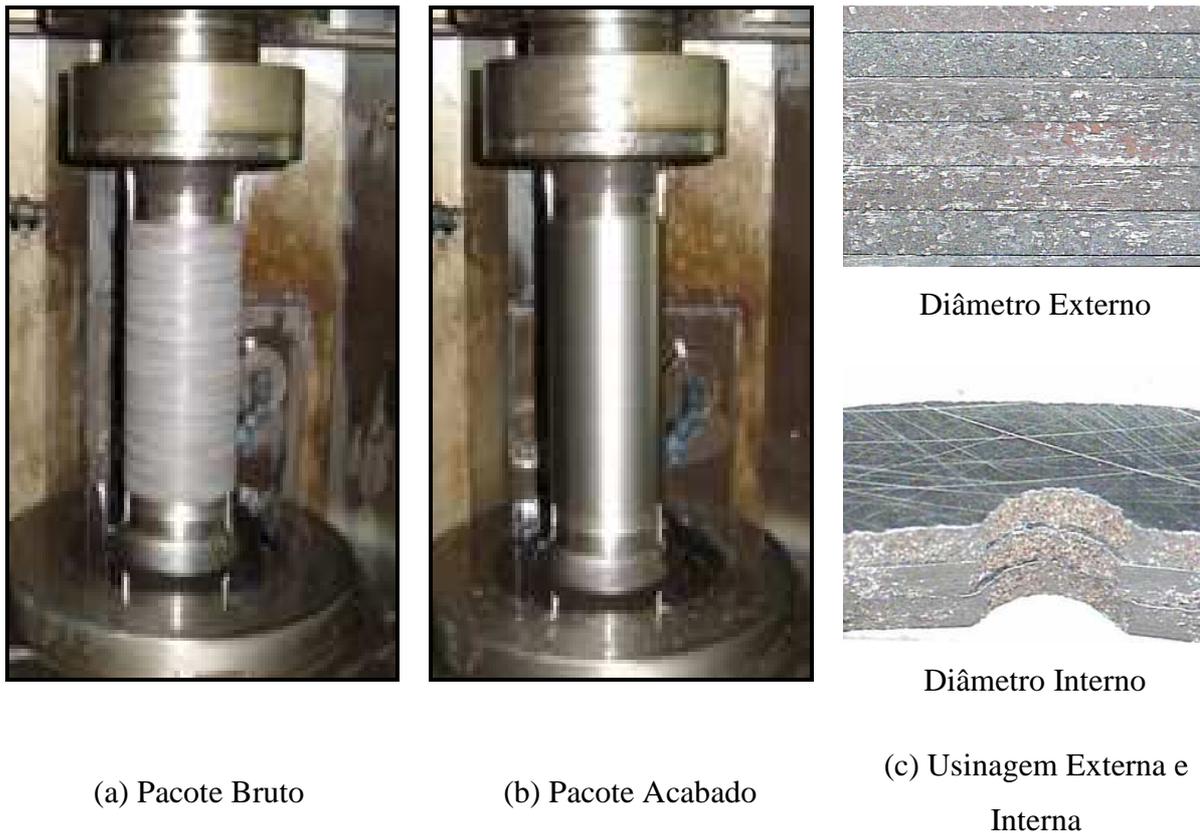


Figura 4.3 - Torneamento Vertical dos Anéis de Pistão de Ferro Fundido Cinzento Martensítico

Como já citado anteriormente o ferro fundido cinzento martensítico possui superfície extremamente abrasiva, conforme demonstrado na Figura (4.3c), prejudicando a vida da ferramenta durante sua usinagem. É importante salientar que o diâmetro interno bruto possui um rebaixo que geralmente é muito irregular, proveniente do processo de fundição.

Este rebaixo influencia muito o processo de usinagem e diminui drasticamente a vida da aresta de corte, devido ao impacto sofrido pela ferramenta no processo de usinagem.

4.4. Ferramentas de Corte

Para este trabalho, duas geometrias diferentes foram analisadas: a primeira, com geometria especial quadrada com duas pontas de corte, Figura (4.4a) e, a segunda, com geometria de corte hexagonal, Figura (4.4b). As ferramentas de corte gêmeas são formadas por um substrato de metal duro classe ISO K10, com propriedades mecânicas descritas como na Tabela 4.2 e são alojadas na barra interna e externa do torno de forma vertical. As ferramentas são fabricadas pela empresa Fecial Indústria e Comércio Ltda.

Tabela 4.2 - Propriedades Mecânicas do Substrato das Ferramentas de Metal Duro

Dureza (HV30)	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Compressão (N/mm ²)	Resistência à Flexão (N/mm ²)	Resistência a Oxidação (°C)	Módulo de Elasticidade (KN/mm ²)	Tamanho do Grão (μm)
1.600	14,45	6250	4300	900	580	0,8

Os insertos de metal duro são revestidos com nitreto de titânio (TiN) através de um processo de PVD, o que garante às ferramentas as propriedades mecânicas descritas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Propriedades Mecânicas do Revestimento das Ferramentas

Processo de Revestimento	Microdureza (HV 0.05)	Coefficiente de Atrito no Aço (seco)	Tensão Interna (GPa)	Temperatura Máxima de Aplicação (°C)	Estrutura do Revestimento	Cor do Revestimento
PVD Evaporação por Arco Voltaico	2.300	0,4	-2,5	600	Monocamada	Ouro-amarelo

Para este processo de usinagem, utiliza-se um Torno CNC Vertical adaptado para a usinagem de pacotes de anéis de 150 mm de comprimento, em um único ciclo de usinagem.

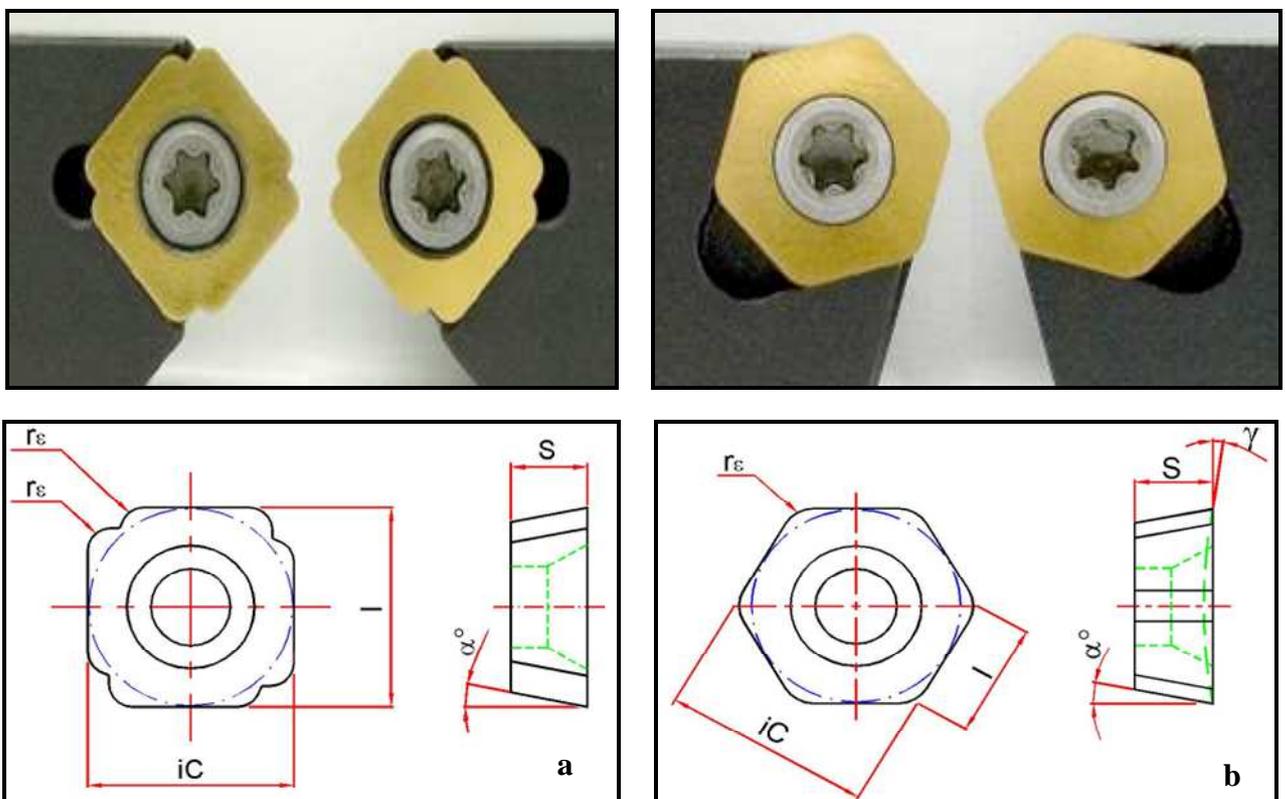


Figura 4.4 - Ferramenta Quadrada (a) e Hexagonal (b)

Para as ferramentas interna e externa utiliza-se o mesmo ângulo de posição (χ_f) de 45° e são caracterizadas conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Detalhe da Geometria das Ferramentas

Descrição	Círculo inscrito (i.C)	Comprimento da aresta (l)	Espessura da ferramenta (s)	Raio da ponta (r ϵ)	Ângulo de folga (α)	Ângulo do quebra cavaco (γ)
Hexagonal	12 mm	7 mm	4,5 mm	1,8 mm	10°	3°
Quadrada	12 mm	12 mm	4,5 mm	1,3 mm	10°	0°

A diferença básica entre as duas ferramentas está no sistema de remoção de material, tal como descrito no Quadro 4.1.

Tipo de Ferramenta	Profundidade de Corte (mm)	Representação da Usinagem interna e externa
Hexagonal	apt = 1,25 (100%)	
Quadrada	apt = 1,25 (100 %) ap1 = 0,76 (60 %) ap2 = 0,49 (40 %)	

Quadro 4.1 - Relação entre a Geometria das Ferramentas e a Profundidade de Corte

Enquanto a ferramenta hexagonal foi projetada com um único raio de ponta para remover 100% do valor determinado para a profundidade de corte (ap) em um único passe, a ferramenta quadrada especial possui duas arestas escalonadas, com dois raios de ponta

idênticos sucessivos que removem, respectivamente, 60% e 40% do material a ser usinado. O reflexo desta modificação de geometria pode ser o aumento da vida da ferramenta, uma vez que os esforços de corte e o calor gerado serão distribuídos nas duas arestas. Com o escalonamento tem-se o reforço da ponta da ferramenta que passou a ter dois raios de ponta. Com o objetivo de favorecer a vida da ferramenta de corte e a expulsão do cavaco originado durante o processo de usinagem utiliza-se do fluido de corte solúvel em água, isento de óleo mineral ECOCOOL MH 6000 durante todo o processo de usinagem. A concentração utilizada é de 5 - 8% em água. As características físico-químicas são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Características Físico-Química do ECOCOOL MH 6000

Ensaio	Métodos	ECOCOOL MH 6000
Densidade a 20°C, g/cm ³	ASTM D 1298	1,06
pH da emulsão a 2% em água	MR 125	9,2
Aspecto da emulsão a 2% em água	MR 079	Límpido, incolor
Teste Bosch, GG 25, emulsão a 2% em água	DIN 51 360-2	0
Estabilidade da emulsão 2% em água (mín. 15 h)	MR 015	Estável
Estabilidade do produto a 40/4°C (mm. 15 h)	MR 017	Estável
Fator de refração	MR 044	1,33

O ECOCOOL MH 6000 é uma geração de solúveis, isento de óleo mineral e com aditivos especiais que lhe conferem ação de lubricidade, extrema pressão (EP) além de excelente ação anticorrosiva.

4.5. Metodologia e Condições de Usinagem

De acordo com as necessidades do fabricante de anéis de pistão, o objetivo precípua do desenvolvimento das novas ferramentas de metal duro recobertas com TiN é o aumento da vida da ferramenta de corte e a taxa de produção com a concomitante redução de custos associados ao processo. Deste modo, para se conduzir os testes de usinabilidade e vida das ferramentas de modo planejado e eficiente, adotou-se, como método de pesquisa, a experimentação. Assim, entre as técnicas de experimentação, foi empregado o Projeto e Análise de Experimentos, definido no Capítulo 3 como o processo de planejamento dos experimentos para que dados apropriados sejam coletados e depois analisados por métodos estatísticos, o que resulta em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2005). Considerando os projetos experimentais do DOE, foi utilizada a Metodologia de

Superfície de Resposta, que se caracteriza como um conjunto de ferramentas indicado para a otimização de processos, além de permitir um amplo conhecimento a respeito do fenômeno estudado. Por fim, para a otimização propriamente dita, foi empregado a MSR e o GRG, conforme Figura 4.5.

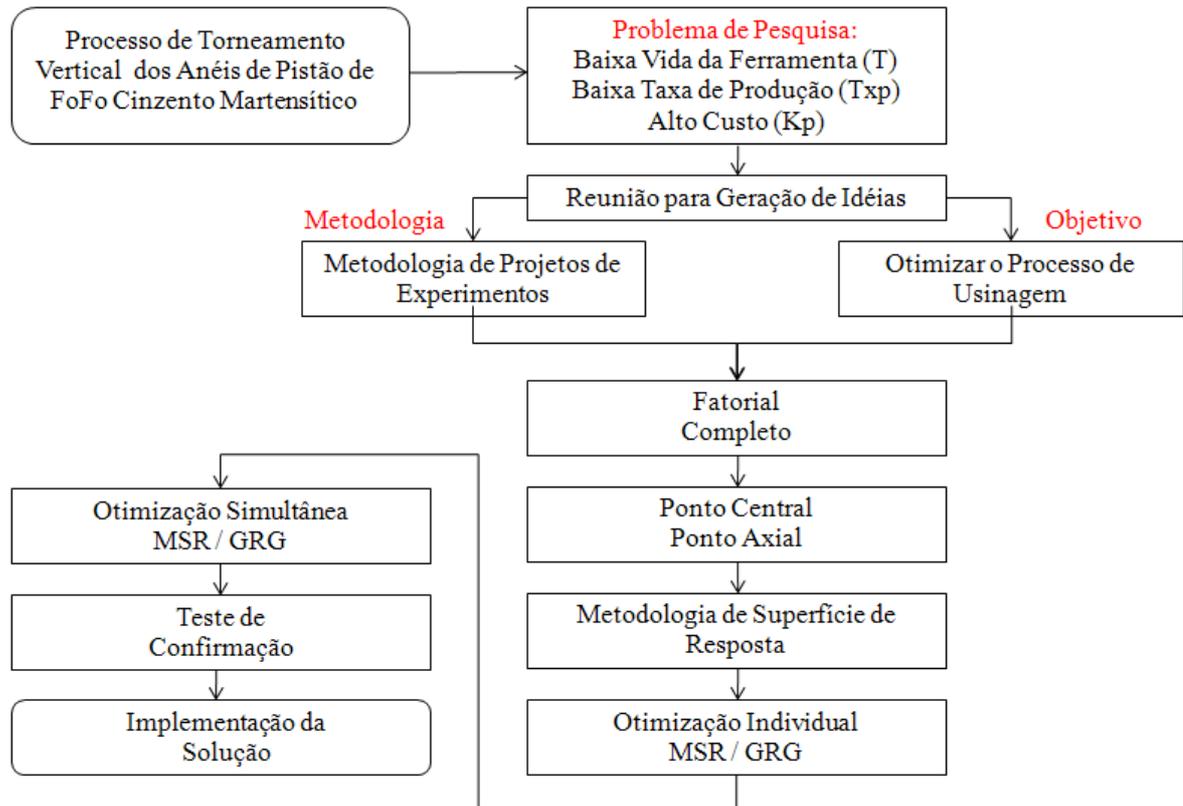


Figura 4.5 - Fluxograma do Método Experimental

Primeiramente, utilizou-se um planejamento fatorial completo 2^3 , adotando-se como fatores o avanço (f), a rotação (n) e a geometria da ferramenta (Gt). Como resposta do experimento, adotou-se a vida da ferramenta (T) medida em comprimento total usinado (mm). Para os três parâmetros de corte, adotaram-se níveis experimentais definidos conforme mostrado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Fatores e Níveis do Fatorial Completo 2^3

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Níveis (decodificados)	
			-1	1
Avanço	f	mm rot. $^{-1}$	0,32	0,38
Rotação	n	rpm	235	275
Geometria da ferramenta	Gt		Hexagonal	Quadrada

Um arranjo fatorial é aquele no qual todas as combinações de k fatores em L níveis são experimentados, de modo que o número total de experimentos seja igual a $N=L^k$ (DEL CASTILLO, 2007). Nesta fase inicial, realizou-se um experimento com três réplicas. A análise estatística do arranjo fatorial pode apontar a existência de aspectos importantes da adequação das ferramentas desenvolvidas ao processo, tais como: (a) a determinação da geometria que proporciona a maior vida; (b) a significância dos parâmetros de corte e seus níveis mais adequados para o processo e, (c), as interações entre geometrias e parâmetros de corte. Após a definição da melhor geometria da ferramenta, propõe-se a utilização de um arranjo experimental de superfície de resposta, construído incrementando-se o arranjo fatorial com pontos centrais e axiais, os quais permitirão a construção de modelos quadráticos para as respostas de interesse. Geralmente, os pontos de ótimo dos processos estão localizados em regiões próximas aos pontos estacionários das funções.

Um arranjo de superfície de resposta permite a modelagem e a análise de problemas nos quais a resposta de interesse é influenciada por um conjunto de variáveis e nos quais a resposta deva alcançar um valor ótimo (Montgomery e Runger, 2002) e que, geralmente, tenham o relacionamento entre as variáveis dependentes e independentes desconhecido. Faz-se uma razoável aproximação do relacionamento real entre as respostas (Y) e o conjunto de variáveis independentes (x) para um número geralmente reduzido de fatores (MONTGOMERY, 2000; CHANDRA, 2001; MONTGOMERY e RUNGER, 2002; MASON *et al.* 2003). Geralmente, experimentos exploratórios já devem ter sido executados anteriormente. Assim, o relacionamento entre as variáveis pode ser estabelecido através de um modelo polinomial tal como a Equação (4.1).

$$\hat{Y}(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^K \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_\mu = b_0 + [\nabla f(\mathbf{x})^T] + \left\{ \frac{1}{2} \mathbf{x}^T [\nabla^2 f(\mathbf{x})] \mathbf{x} \right\} \quad (4.1)$$

Na Equação (4.1), os parâmetros (β) do polinômio são estimados por $\hat{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{Y})$. O modelo quadrático completo mostrado na forma algébrica da Equação (4.1), também pode ser escrito na forma matricial, onde x é o vetor de pontos experimentais, $[\nabla f(\mathbf{x})^T]$ é o gradiente da função avaliada em x e $[\nabla^2 f(\mathbf{x})]$ é a matriz Hessiana, formada pelas derivadas parciais de segunda ordem do modelo quadrático completo.

O arranjo de superfície de resposta mais utilizado para a matriz X é o arranjo composto central (CCD), um arranjo formado por um Fatorial Completo ou Fracionado, um conjunto de Pontos Centrais e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados

Pontos Axiais (DEL CASTILLO, 2007). A principal vantagem deste tipo de arranjo é possibilidade de se ajustar um modelo quadrático com o conjunto de parâmetros de processo, mantendo-se a rotacionalidade do arranjo. A rotacionalidade é uma propriedade que é caracterizada pela variância constante observada pela resposta prevista para todos os pontos experimentais localizados a uma mesma distância axial ρ (Montgomery, 2000; Del Castillo, 2007). No âmbito da otimização e do controle de processos, esta propriedade é extremamente útil. Quanto mais externo for a solução adotada para o processo, menos precisa será a previsão de novos valores ou da média. Conforme descrito inicialmente, o objetivo dos testes de usinabilidade é definir um ponto ótimo de operação para o processo de torneamento vertical interno e externo, que considere a vida da ferramenta (T), a taxa de produção (T_{xp}) e o custo de usinagem por peça (K_p). Tomando-se um arranjo composto central (CCD) para analisar a influência do avanço da ferramenta e da rotação do pacote de anéis, foram considerados os níveis dispostos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Níveis dos Fatores da Metodologia de Superfície de Resposta

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Níveis (decodificados)				
			-1,41	-1	0	1	1,41
Avanço	<i>f</i>	mm rot. ⁻¹	0,31	0,32	0,35	0,38	0,39
Rotação	<i>n</i>	rpm	227	235	255	275	283

Na última etapa da otimização utilizou-se a MSR combinada com o GRG para encontrar o ponto de ótimo individual e posteriormente através da priorização da função objetiva da vida da ferramenta de corte a otimização simultânea das respostas (T, T_{xp} e K_p).

Na priorização da função objetiva, o que ocorre é a eleição de uma resposta mais importante em relação às demais. Desse modo, essa característica é escolhida como função objetivo, enquanto que as demais são alocadas como restrições. Desde que todas as restrições sejam atendidas, a resposta ótima conduz às soluções que atendam a todos os objetivos (OZEL e KARPAT, 2005). Para a avaliação das condições de corte utilizou-se das fórmulas convencionais de usinagem sugeridas por Diniz *et al.* (2008) e Machado *et al.* (2009).

Para obtenção do tempo total de usinagem, da taxa de produção e do custo de usinagem por peça necessários ao cálculo das respostas de interesse nas diversas condições de corte sugeridas pelo arranjo CCD, foram utilizados os dados do processo de torneamento vertical de anéis de pistão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Condições Técnicas e Econômicas do Processo por Peça

Parâmetros	Símbolos	Valores
Lote de peças (unidades)	Z	15000
Tempo secundário (min)	Ts	0,003
Tempo aprox. e afastamento ferramenta (min)	Ta	0,008
Tempo de preparação da máquina (min)	Tp	25
Tempo de troca da ferramenta (min)	Tft	2
Tempo improdutivo (min)	t1	0,0125
Custo maquinário + operador (R\$/h)	(Sm+Sh)	80
Custo do porta ferramenta (externa+ interna) (R\$)	Vsi	250
Vida média porta ferramentas (externa e interna), arestas	Nfp	2400
Custo da pastilha Quadrada (externa + interna) (R\$)	Kpi qd.	64
Número de arestas Quadrada	Ns qd.	4
Custo da pastilha Hexagonal (externa + interna) (R\$)	Kpi hx.	40
Número de arestas Hexagonal	Ns hx.	6
Percurso de Avanço (mm)	Lf	1,95
Diâmetro Inicial da peça (mm)	D	81,35
Diâmetro Final da peça (mm)	D	78,98
Diâmetro Médio Final da peça (mm)	Dm	80,165

A vida da ferramenta (T) é uma característica de saída que foi observada durante os ensaios, enquanto que a taxa de produção (Txp) e o custo de usinagem por peça (Kp) foram obtidos através das Equações (4.2 - 4.4) a seguir, conforme Paiva *et al.* (2007).

$$T_{xp} = 60 \times T^{-1} \quad (4.2)$$

$$T_t = t_c + \left(t_a + t_s \frac{t_p}{Z} \right) + \left(\frac{tc}{T} - \frac{1}{Z} \right) t_{ft} \quad (4.3)$$

$$K_p = \left(\frac{T_t}{60} - \frac{1}{Z} \right) (S_h + S_m) + \frac{C_t}{60} (S_h + S_m) + \frac{C_t}{T} \left[\left(\frac{V_{si}}{N_{fp}} + \frac{K_{pi}}{N_s} \right) + t_{ft} (S_h + S_m) \right] \quad (4.4)$$

Os critérios de fim de vida da ferramenta foram orientados pelo desgaste de flanco máximo $VB_{Max} = 0,3$ mm para a ferramenta externa devido a mesma ser a mais afetada pelo processo de usinagem conforme Figura 4.6 (a), ou pela quebra da ferramenta, Figura 4.6 (b),

ou ainda, pela lasca do anel de pistão, conforme Figura 4.6 (c). Dos três critérios adotados o predominante é a lasca no último anel do pacote para definir o final de vida da ferramenta.



(a) Desgaste de flanco



(b) Quebra da ferramenta



(c) Lasca do último anel do pacote usinado

Figura 4.6 - Critérios de Fim Vida da Ferramenta de Corte

Para as ferramentas de corte as trocas são simultâneas, mas a ferramenta externa se desgasta primeiro devido à mesma percorrer o maior perímetro de corte.

5. Análise dos Resultados

Através do projeto de experimento discutido anteriormente e dos valores medidos e calculados para as variáveis de resposta escolhidas, inicia-se a análise dos resultados em busca da otimização do processo de torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico.

A análise dos resultados foi dividida em três etapas consecutivas e independentes.

1ª Etapa: Trata-se do processo de modelagem da vida da ferramenta em função da escolha da melhor geometria da ferramenta de corte, para tanto foi utilizado o planejamento fatorial completo 2^3 avaliando-se o comportamento dos fatores avanço, rotação e geometria da ferramenta de corte sobre a vida da ferramenta.

2ª Etapa: Refere-se ao processo de otimização das variáveis de resposta visando a maximização da vida da ferramenta e da taxa de produção e minimização do custo de fabricação de cada peça. Nesta etapa o método utilizado foi a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) juntamente com o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG).

3ª Etapa: Trata-se do experimento de confirmação que foi executado para verificar se o ponto ótimo indicado pelo método de otimização realmente obtém os valores esperados para as variáveis de resposta conforme previsto pelos modelos adotados.

5.1.1. Modelagem Matemática da Vida da Ferramenta de Corte

Através da elaboração de um arranjo fatorial completo 2^3 realizou-se à análise dos dados obtidos experimentalmente.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados da vida (T) em milímetros, para as oito condições ensaiadas necessárias à obtenção dos pontos fatoriais, seguidos de suas respectivas três réplicas, totalizando-se 24 experimentos.

Nestes ensaios foram variados os parâmetros de usinagem, adotando-se avanço de usinagem (f) entre os níveis 0,32 mm/rot. e 0,38 mm/rot., rotação (n) entre os níveis 235 rpm e 275 rpm e tipo de geometria da ferramenta hexagonal e quadrada.

Nesta etapa o objetivo é evidenciar qual das duas geometrias da ferramenta de corte será a mais adequada para a usinagem dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico, obtendo-se um modelo para a vida da ferramenta.

Tabela 5.1 - Planejamento Fatorial para Vida da Ferramenta (T)

N	f (mm/rot.)	n (rpm)	Gt	T (mm)		
				Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
1	0,32	275	hexagonal	450	300	450
2	0,32	235	quadrada	2102	2252	2252
3	0,38	275	hexagonal	901	1051	1051
4	0,32	235	hexagonal	1351	1201	1502
5	0,32	275	quadrada	1802	1802	2102
6	0,38	235	hexagonal	751	751	601
7	0,38	275	quadrada	1802	1652	1952
8	0,38	235	quadrada	3153	3003	3003

A Figura 5.1 ilustra os resultados da vida da ferramenta (T) para as condições experimentais adotadas na Tabela 5.1 para cada uma das condições ensaiadas e suas respectivas réplicas.

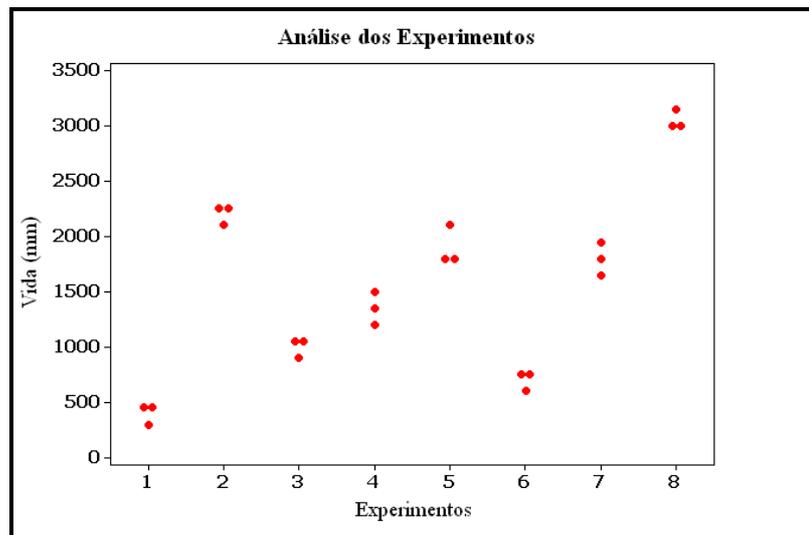


Figura 5.1 – Experimentos

Em função dos resultados obtidos para T com o arranjo fatorial 2^3 , uma análise estatística foi realizada com auxílio do Minitab® 15, obtendo-se um modelo para a vida da ferramenta.

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos e suas interações no comportamento da vida da ferramenta, pode ser obtida avaliando-se os resultados dispostos nas Tabela 5.2 e 5.3, ilustrados na Figura 5.2.

Tabela 5.2 - Efeitos Estimados e Coeficientes da Vida da Ferramenta

Ajuste do Fatorial: T versus f; n; Gt					
Termos	Efeito	Coef.	SE Coef	T	P-Value
Constante		1551,60	24,23	64,03	0,000
F	175,20	87,60	24,23	3,61	0,002
N	-550,60	-275,30	24,23	-11,36	0,000
Gt	1376,40	688,20	24,23	28,40	0,000
$f * n$	75,10	37,50	24,23	1,55	0,141
$f * Gt$	200,20	100,10	24,23	4,13	0,001
$n * Gt$	-225,20	-112,60	24,23	-4,65	0,000
$f * n * Gt$	-550,60	-275,30	24,23	-11,36	0,000

S = 118,704 R-Sq = 98,59% R - Sq (adj) = 97,97%

Valores em negrito representam os termos significativos do modelo fatorial (P-Value <5%)

A Tabela 5.2 demonstra que todos os termos com exceção da interação entre avanço e rotação são significativos para a vida da ferramenta, pois o valor de P-Value é menor do que o nível de significância adotado de 5%. Apesar do bom ajuste (R-Sq (adj) = 97,97%) apresentado pelo modelo a interação entre avanço e rotação será excluída do estudo e uma nova análise estatística será realizada. A Tabela 5.3 demonstra que os fatores investigados apresentam interação de segunda e terceira ordem, isto significa que a combinação entre os fatores impacta na vida da ferramenta de corte.

Tabela 5.3 - Análise de Variância

ANOVA – T						
Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-Value
Efeitos Principais	3	13339198	13339198	4456399	316,27	0,000
Interações de Segunda Ordem	3	578656	578656	192885	13,690	0,000
Interações de Terceira Ordem	1	1818632	1818632	1818632	129,07	0,000
Erro Residual	16	225450	225450	14091		
Erro Puro	16	225450	225450	14091		
Total	23	15991936				

Valores em negrito representam os termos significativos do modelo fatorial (P-Value <5%)

Observando-se na Figura 5.2 a geometria da ferramenta de corte é o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na vida da ferramenta, seguido da rotação, além das interações. Conforme pode ser observado na Tabela 5.3 e ilustrado na

Figura 5.2, a interação dupla, entre avanço e rotação não possuem influência significativa para a vida da ferramenta.

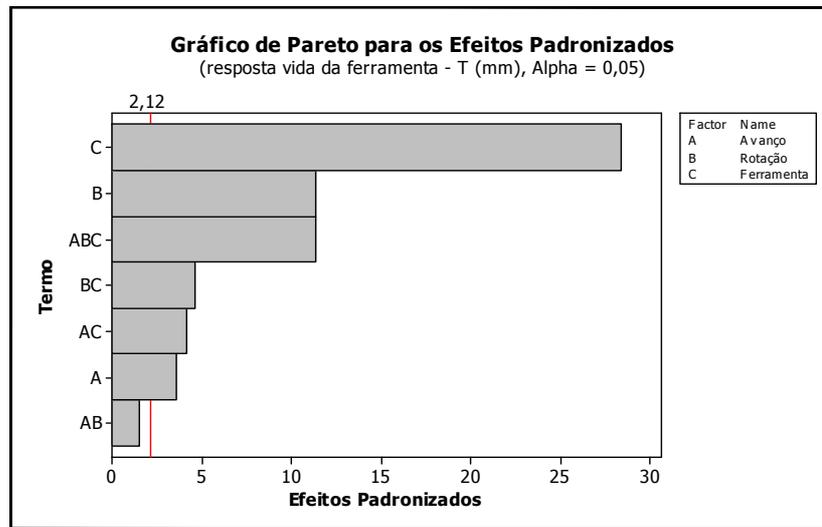


Figura 5.2 - Gráfico de Pareto dos Efeitos

Uma nova análise estatística foi realizada após a remoção dos fatores não significativos, conforme Tabelas 5.4 e 5.5.

Tabela 5.4 - Efeitos Estimados e Coeficientes da Vida da Ferramenta

Ajuste do Fatorial: T versus f; n; Gt					
Termos	Efeito	Coef.	SE Coef	T	P-Value
Constante		1551,60	25,21	61,55	0,000
F	175,20	87,60	25,21	3,47	0,003
N	-550,60	-275,30	25,21	-10,92	0,000
Gt	1376,40	688,20	25,21	27,30	0,000
$f * Gt$	200,20	100,10	25,21	3,97	0,001
$n * Gt$	-225,20	-112,60	25,21	-4,47	0,000
$f * n * Gt$	-550,60	-275,30	25,21	-10,92	0,000

$S = 113,495$ $R-Sq = 98,60\%$ $R - Sq (adj) = 98,01\%$

Valores em negrito representam os termos significativos do modelo fatorial (P-Value <5%)

Conforme análise realizada na Tabela 5.4 todos os fatores são significativos para realizar uma alteração na vida da ferramenta. A decisão de remover do estudo a interação entre avanço e rotação foi correta. Esta conclusão é realizada analisando-se a Tabela 5.5. A presença de réplicas em um experimento permite que a soma de quadrados do erro seja dividida em duas partes: o erro puro e a falta de ajuste. Quando o P-value do teste de falta de

ajuste, conforme Tabela 5.5 é superior ao nível de significância (5%), então, não há evidência de que o modelo não explique adequadamente a variação da resposta. Além deste fato o ajuste do modelo apresentou aumento após a remoção do fator não significativo, sendo assim, a ação de remoção do fator não significativo da primeira análise realizada foi adequada. A análise da Tabela 5.5 evidencia que os efeitos principais e as interações entre os fatores é significativa para a vida da ferramenta.

Tabela 5.5 - Análise de Variância

ANOVA – T						
Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-Value
Efeitos Principais	3	13339198	13339198	4456399	292,20	0,000
Interações de Segunda Ordem	2	544838	544838	272419	17,86	0,000
Interações de Terceira Ordem	1	1818632	1818632	1818632	119,25	0,000
Erro Residual	17	259268	259268	15251		
Falte de Ajuste	1	33818	33818	33818	2,40	0,141
Erro Puro	16	225450	225450	14091		
Total	23	15991936				

Valores em negrito representam os termos significativos do modelo fatorial (P-Value <5%)

A Figura 5.3, demonstra que todos os fatores são significativos para a realizar alteração na vida da ferramenta, sendo a geometria da ferramenta o principal fator.

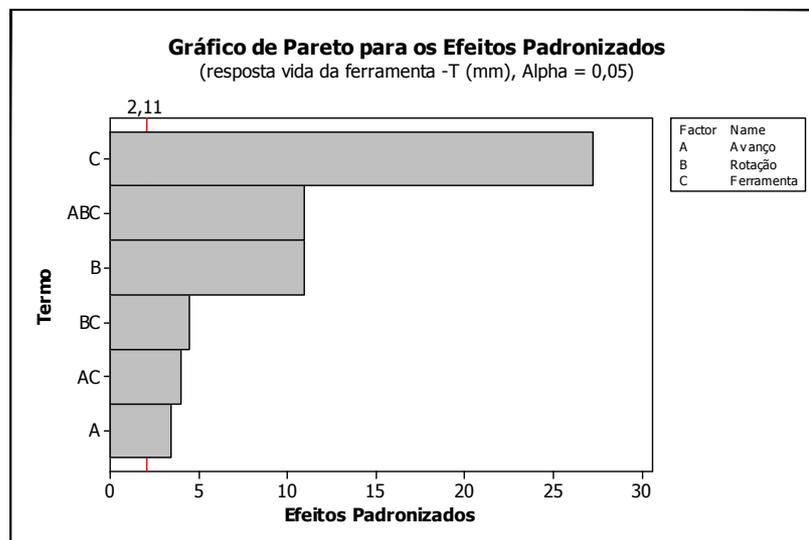


Figura 5.3 - Gráfico de Pareto dos Efeitos

Após esta etapa é realizado a análise dos resíduos, que se caracteriza como um procedimento importante para garantir que os modelos matemáticos desenvolvidos representem bem as respostas de interesse.

Dado que os resíduos são definidos como a diferença entre o valor previsto do modelo e o valor experimental observado para uma certa condição. Dessa forma, os resíduos relacionados aos modelos reduzidos foram analisados utilizando novamente o MINITAB®15. Os resultados desta análise são apresentados pela Figura 5.4.

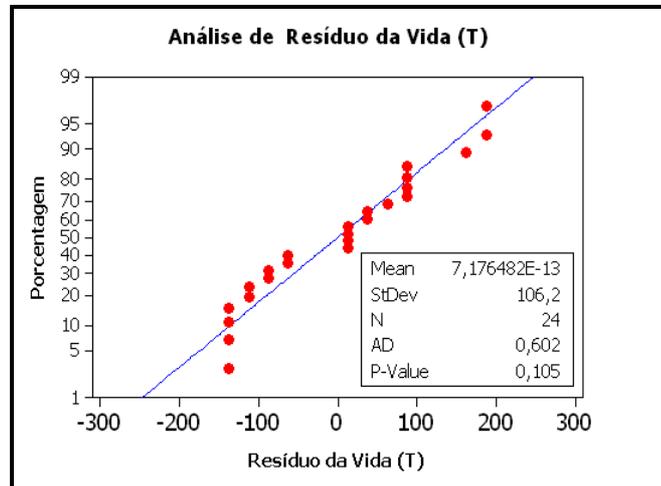


Figura 5.4 - Análise de Resíduo

A Figura 5.4 indica que os resíduos são normais para a vida da ferramenta, já que apresentaram coeficientes de Anderson-Darling (AD) menor que um e P-Value maior que 5% de significância. Após toda esta etapa é realizado a análise dos efeitos principais sobre a vida da ferramenta de corte, conforme Figura 5.5.

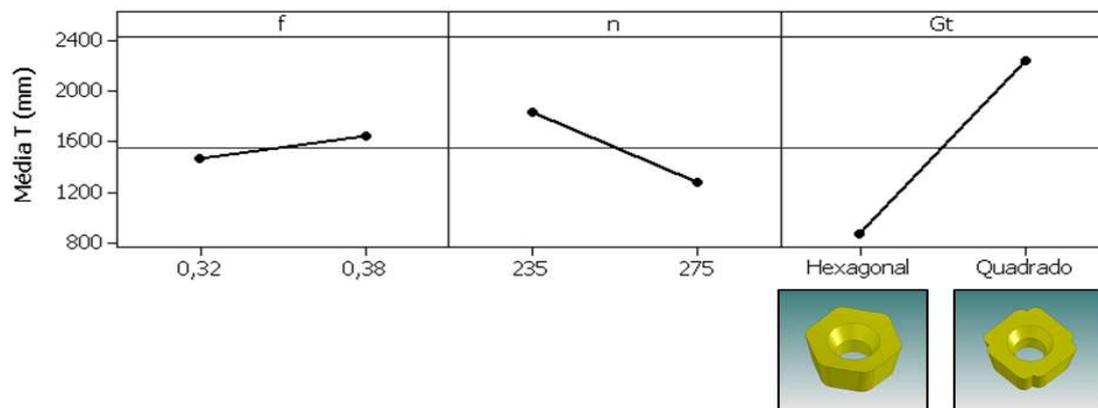


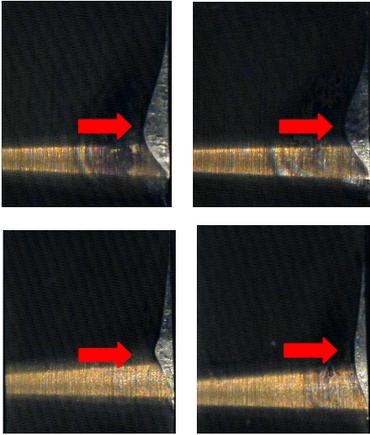
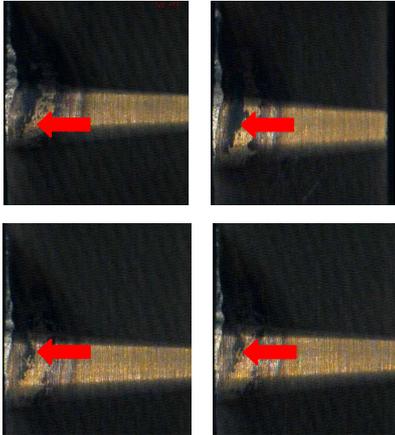
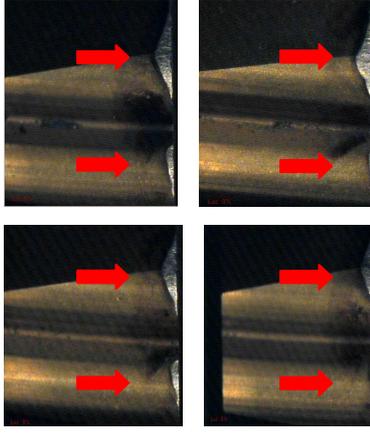
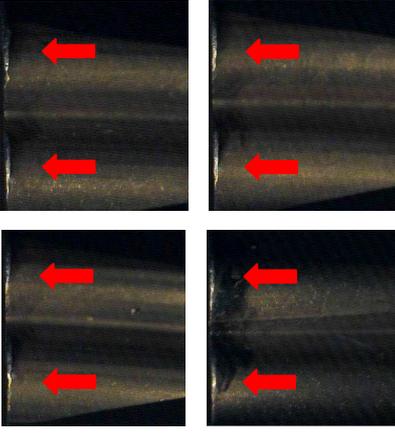
Figura 5.5 - Efeitos Principais para Vida da Ferramenta

Analisando-se a Figura 5.5 conclui-se que o fator mais significativo para o aumento da vida da ferramenta é a sua geometria, seguido da rotação e, por fim, o avanço. A ferramenta especial quadrada apresenta o melhor desempenho no torneamento vertical duplo dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico em função da aresta de corte escalonada, o que

fraciona a remoção de material durante a operação de corte e fortalece a ponta de corte com dois raios de 1,3 mm cada, o que leva o aumento da vida da ferramenta.

Neste escalonamento, 60% do total de material é removido pela primeira parte da aresta, e o restante, com a segunda parte da aresta de corte. Além disso, o ferro fundido cinzento martensítico apresenta particularmente uma superfície extremamente abrasiva e irregular, cuja ação deteriorante pode ser amenizada com a geometria escalonada e os dois raios de ponta de 1,3 mm cada.

O Quadro 5.1 apresenta o desgaste de flanco da ferramenta hexagonal e quadrada, onde é evidenciado o escalonamento da remoção de material da ferramenta quadrada.

Ferramenta	Externa	Interna
Hexagonal		
Quadrada		

Quadro 5.1 - Desgaste de Flanco das Ferramentas Hexagonal e Quadrada

Importante observar no Quadro 5.1 que a ferramenta que apresenta o maior desgaste é a ferramenta externa devido ao maior diâmetro usinado (maior perímetro percorrido). Outra

observação importante é a diferença entre a forma do desgaste da ferramenta hexagonal em comparação a ferramenta quadrada.

O corte escalonado da ferramenta quadrada distribui seu desgaste entre as duas arestas de corte, sendo que a maior parte do desgaste afeta a primeira aresta de corte, devido sua maior remoção de material (60% da profundidade de corte).

Por esses motivos a ferramenta quadrada apresenta maior vida útil quando comparada a ferramenta hexagonal. Além da geometria da ferramenta de corte outro fator importante para o aumento da vida útil foi os parâmetros de corte rotação e avanço. A progressão do desgaste é influenciada principalmente pela velocidade de corte, depois pelo avanço e, por último, pela profundidade de usinagem.

A velocidade de corte é o parâmetro que mais influência no desgaste, pois quanto maior, mais aumenta a energia (calor) que é imputada ao processo, sem acrescer a área da ferramenta que recebe este calor. Por este motivo a explicação do menor valor de rotação (235 rpm) para uma maior vida da ferramenta de corte, pois como resultante encontra-se uma velocidade de corte de 59,19 m/min., 14,5% menor do que a segunda opção (Rotação = 275 rpm ; $V_c = 69,26$ m/min.).

Quanto ao avanço, também maior a quantidade de calor imputada ao processo, porém simultaneamente aumenta a área da ferramenta que recebe este calor por este motivo a escolha de um avanço maior. Porém, a análise da Figura 5.5 de efeitos principais sobre a vida da ferramenta não pode ser utilizada para concluir o estudo, uma vez que o modelo apresenta interações entre os fatores principais.

Utilizando-se do método de otimização *Desirability* realizou-se a otimização da vida da ferramenta de corte, onde os objetivos desta otimização são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Objetivos da Otimização

Objetivo	Baixo	Alvo	Alto	Peso	Importância
Maximização	2000	3000	3000	1	1

Os parâmetros ideais encontrados para tal, conforme Figura 5.6 foram avanço de 0,38 (mm/rot.), rotação de 235 (rpm) e a geometria quadrada para uma previsão de vida da ferramenta de 3053 mm.

Lembrando-se que o objetivo principal nesta primeira etapa da otimização do processo de torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico é a

maximização da vida da ferramenta de corte com a definição da melhor geometria da ferramenta.

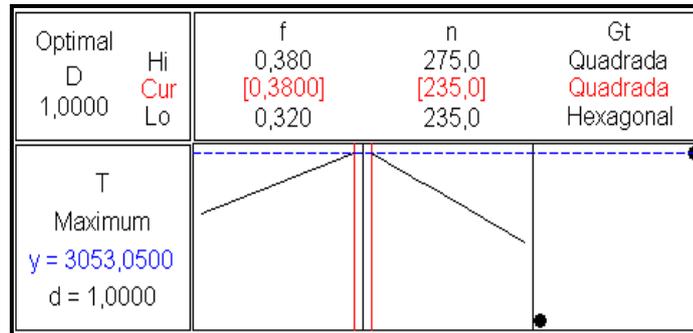


Figura 5.6 - Ponto de ótimo

Identificados os parâmetros significativos nesta fase, se propõe a analisar a região experimental para verificar se esta se localiza em uma região de curvatura, ou seja, em uma região que apresente um ponto de otimização, por esta razão foi incluído ao modelo pontos centrais a fim de analisar há existência de curvatura, caracterizando-se uma função de segunda ordem. Outro objetivo é analisar os efeitos principais e os efeitos das interações do modelo. Devido ao desempenho da ferramenta de corte quadrada nesta etapa, optou-se em bloquear a ferramenta, devido seu excelente resultado e analisar mais profundamente os parâmetros de corte, tendo como respostas para esta segunda etapa a vida da ferramenta (T), o custo por peça fabricada (Kp) e a Taxa de produção (Txp).

5.2. Análise de Curvatura

Com a construção de um arranjo fatorial 2^2 realizou-se à análise dos dados obtidos experimentalmente. A Tabela 5.7 apresenta os resultados da T, Txp e Kp para as quatro condições ensaiadas necessárias à obtenção dos pontos fatoriais, seguidos de suas respectivas três réplicas e cinco pontos centrais, totalizando-se 17 experimentos. Nestes ensaios foram variados os parâmetros de usinagem, adotando-se avanço de usinagem (f) entre os níveis 0,32 mm./rot., 0,35 mm./rot. e 0,38 mm./rot., rotação (n) entre os níveis 235, 255 e 275 rpm.

Todos os experimentos serão realizados com a geometria especial quadrada escalonada selecionada na etapa anterior. Nesta etapa o objetivo é analisar a região experimental para verificar se esta se localiza em uma região de curvatura, ou seja, em uma região que apresente um ponto de otimização, por esta razão foi incluído ao modelo pontos centrais a fim de analisar se há existência de curvatura, caracterizando-se uma função de segunda ordem. A matriz experimental com o resultados para T, Txp e Kp é apresentada pela Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Matriz Experimental

N	<i>f</i> (mm/rot)	<i>n</i> (rpm)	T (mm)	T _{xp} (Pç/h)	K _p (\$/pç)
1	0,32	235	2102	1523	0,04686
2	0,38	235	3153	1715	0,03560
3	0,32	275	1802	1677	0,04474
4	0,38	275	1952	1864	0,03851
5	0,32	235	2252	1526	0,04570
6	0,38	235	3003	1713	0,03618
7	0,32	275	1952	1681	0,04317
8	0,38	275	1502	1847	0,04413
9	0,32	235	2402	1528	0,04469
10	0,38	235	2853	1712	0,03682
11	0,32	275	2102	1684	0,04183
12	0,38	275	1802	1859	0,04007
13	0,35	255	3153	1714	0,03562
14	0,35	255	3003	1713	0,03620
15	0,35	255	3303	1716	0,03509
16	0,35	255	2703	1709	0,03755
17	0,35	255	2853	1711	0,03684

As análises dos dados da Tabela 5.8 permitem concluir que os níveis adotados para os fatores no arranjo encontram-se nas proximidades da região de ótimo, uma vez que o P-value da curvatura apresenta um valor inferior ao nível de significância de 5%, o que sinaliza a existência de curvatura. Desta forma, pode-se utilizar um arranjo composto central (CCD) na próxima etapa do estudo.

Tabela 5.8 - Análise de Significância dos Termos Individuais dos Modelos e ANOVA

Termos	T (mm)		T _{xp} (Pç/h)		K _p (\$/pç)	
	Coefficiente	P-Value	Coefficiente	P-Value	Coefficiente	P-Value
Constante	2239,70	0,000	1694,00	0,000	0,04153	0,000
<i>F</i>	137,60	0,032	90,92	0,000	-0,00297	0,000
<i>N</i>	-387,90	0,000	74,58	0,000	0,00055	0,236
<i>f * n</i>	-237,70	0,001	-2,92	0,037	0,00180	0,002
Ponto Central	763,30	0,000	18,52	0,000	-0,00527	0,000
Fonte	P-Value		P-Value		P-Value	
Efeitos Principais	0,000		0,000		0,000	
Interações de Segunda Ordem	0,001		0,037		0,002	
Análise de Curvatura	0,000		0,000		0,000	
R-Sq	91,10%		99,87%		89,81%	
R - Sq (adj)	88,13%		99,82%		86,42%	

Valores em negrito representam os termos significativos do modelo fatorial (P-Value <5%)

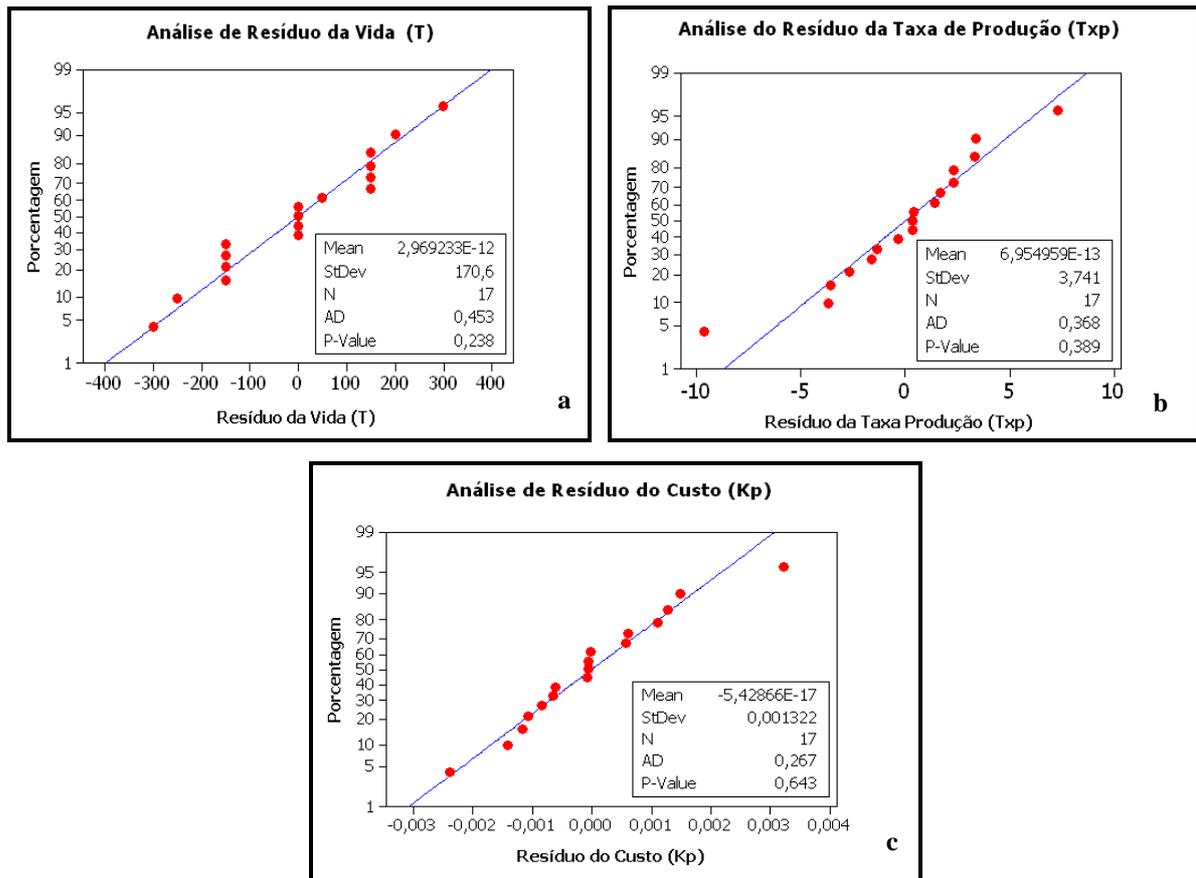


Figura 5.7 - Análise de Resíduo: (a) Vida; (b) Taxa Produção; (c) Custo

Avaliando-se a Tabela 5.8 nota-se que o fator rotação não apresentou P-value menor do que 5% sendo assim o mesmo não é significativo de forma isolada para influenciar o Kp, porém o mesmo será conservado no estudo uma vez que a interação entre os fatores avanço e rotação serem significativos para alterar o Kp. Outra conclusão acerca da Tabela 5.8 é que a adequação dos modelos foi verificada e são adequados pois apresentaram bons ajustes, já que os valores de R-Sq (adj.) foram superiores a 80%. Finalizando-se a análise desta fase realizou-se a avaliação dos resíduos. A Figura 5.7 indica que os resíduos são normais para a vida da ferramenta, taxa de produção e custo já que apresentaram coeficientes de Anderson-Darling (AD) menor que um e P-value maior que 5% de significância. De acordo com as análises estatísticas realizadas até o presente momento verificou-se que a região experimental pertence a uma região de curvatura para todas as respostas avaliadas, sendo indicado para a próxima etapa do estudo a inclusão dos pontos axiais obtendo-se um arranjo composto central.

5.3. Arranjo Composto Central (CCD)

Com a definição da melhor geometria da ferramenta de corte e a confirmação da existência do ponto de curvatura, optou-se em utilizar um CCD nesta nova etapa do estudo.

A Tabela 5.9 apresenta os resultados da T, Txp e Kp para as quatro condições ensaiadas necessárias à obtenção dos pontos fatoriais, seguidos de seus respectivos quatro pontos axiais e cinco pontos centrais, totalizando-se 13 experimentos. A Tabela 5.9 apresenta a matriz experimental com os resultados de T, Txp e Kp.

Tabela 5.9 - CCD para Vida, Taxa Produção e Custo Usinagem

N	Arranjo	f (mm/rot.)	n (rpm)	T (mm)	Txp (Pç/h)	Kp (\$/pç)
1	Fatorial Completo	0,32	235	2102	1523	0,04686
2		0,38	235	2853	1712	0,03682
3		0,32	275	1802	1677	0,04474
4		0,38	275	1502	1847	0,04413
5	Pontos Axiais	0,31	255	1652	1555	0,05019
6		0,39	255	1802	1813	0,04117
7		0,35	227	2853	1588	0,04047
8		0,35	283	1952	1807	0,03985
9	Pontos Centrais	0,35	255	3153	1714	0,03562
10		0,35	255	3003	1713	0,03620
11		0,35	255	3303	1716	0,03509
12		0,35	255	2703	1709	0,03755
13		0,35	255	2853	1711	0,03684

Nesta fase do trabalho, a vida da ferramenta é analisada considerando-se também a taxa de produção e o custo de usinagem por peça. Todas estas propriedades são obtidas utilizando-se a geometria especial quadrada escalonada. Os resultados da análise estatística são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Análise de Significância dos Termos Individuais dos Modelos e ANOVA

Termos	T (mm)		Txp (Pç/h)		Kp (\$/pç)	
	Coefficiente	P-Value	Coefficiente	P-Value	Coefficiente	P-Value
Constante	3003,00	0,000	1712,59	0,000	0,03626	0,000
F	82,85	0,255	90,21	0,000	-0,00293	0,000
n	-365,71	0,001	74,93	0,000	0,00054	0,221
$f * f$	-638,14	0,000	-14,58	0,000	0,00476	0,000
$n * n$	-300,3	0,004	-7,83	0,001	0,00200	0,002
$f * n$	-262,76	0,027	-4,77	0,033	0,00236	0,004
Fonte	P-Value		P-Value		P-Value	
Regressão	0,000		0,000		0,000	
Linear	0,003		0,000		0,000	
Quadratica	0,000		0,000		0,000	
Interação	0,027		0,033		0,004	
Falta de ajuste	0,926		0,136		0,279	
R-Sq	94,80%		99,90%		96,70%	
R - Sq (adj)	91,10%		99,90%		94,30%	

Valores em negrito representam os termos significativos do modelo fatorial (P-Value <5%)

As análises dos dados da Tabela 5.10 permitem concluir que os fatores analisados são significativos para impactar na T, Txp e no Kp. Na avaliação dos valores de P-value para a vida e custo demonstram que o avanço e a rotação não são significativos para realizar alterações no comportamento das respostas, porém os fatores se interagem entre si não justificando-se a remoção dos mesmos do estudo. A Figura 5.8 apresenta a análise de resíduo para as respostas vida, taxa de produção e custo.

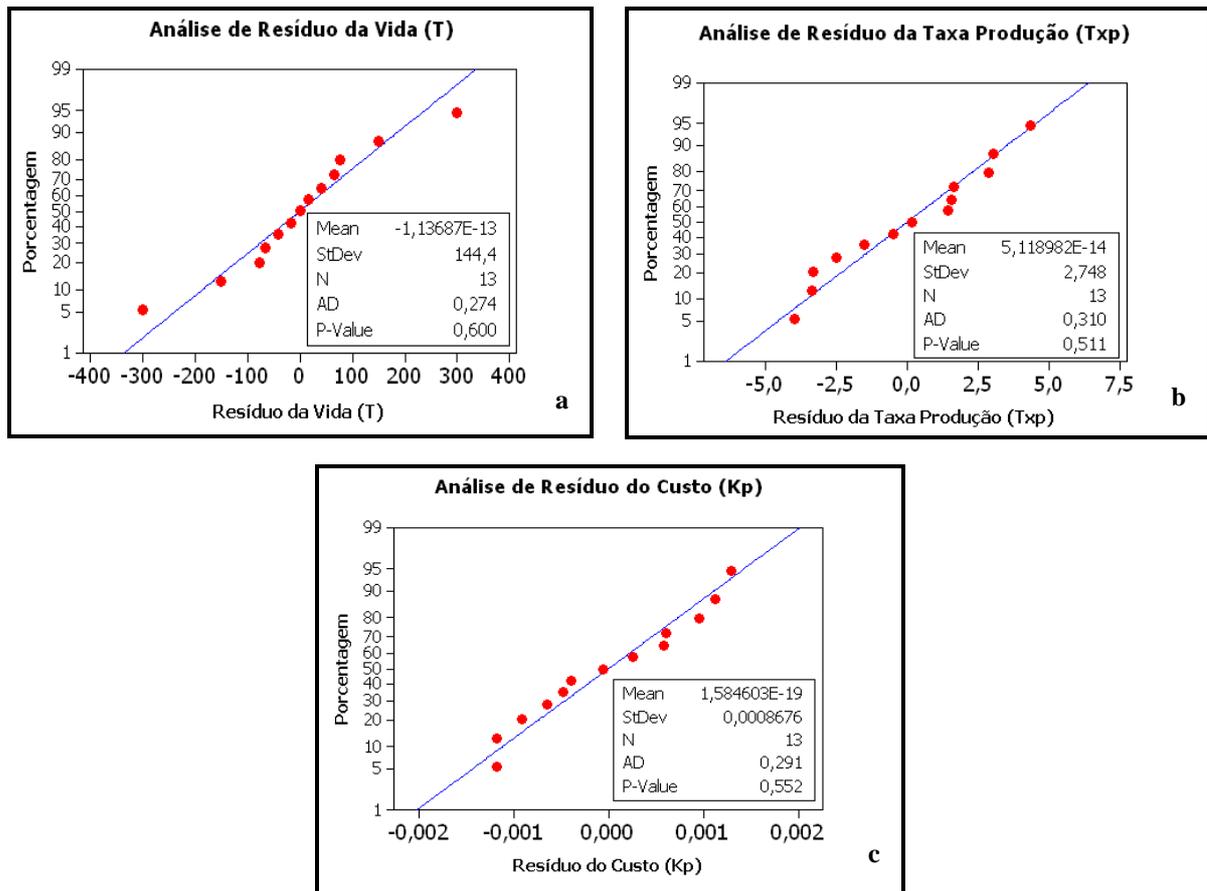


Figura 5.8 - Análise de resíduo: (a) Vida; (b) Taxa Produção; (c) Custo

Assim como nas análises anteriores todas os resíduos são normais visto que apresentaram coeficientes de Anderson-Darling (AD) menor que um e P-value maior que 5% de significância. Após todas estas análises é realizado na próxima etapa a construção das superfícies de resposta para a vida da ferramenta, taxa de produção e custo por peça.

5.4. Obtenção da Superfície de Resposta

O Minitab® 15 foi empregado para a construção das superfícies de resposta relacionando os parâmetros estudados com as respostas do avanço e rotação sobre a vida

da ferramenta de corte, custo por peça fabricada e taxa de produção. As análises anteriores revelaram que diversas interações entre os parâmetros se comportaram como fatores significativos. Isto significa que o efeito conjunto desses parâmetros influencia de forma significativa os resultados do processo. Sendo assim, a análise sobre tais interações foi realizada através das superfícies de resposta. As Figuras 5.9 - 5.11 mostram as superfícies de resposta para a vida da ferramenta, custo por peça fabricada e a taxa de produção, bem como descreve o comportamento das interações entre os parâmetros de corte para cada resposta de interesse. Observa-se que a maior vida da ferramenta, Figura 5.9 ocorre com taxas de avanço e rotação em níveis intermediários (ponto estacionário), ou seja, em níveis intermediários de velocidade de avanço e tempos de corte. Devido à superfície extremamente abrasiva e o corte interrompido do ferro fundido cinzento martensítico, o tempo de corte intermediário favorece o aumento da vida da ferramenta.

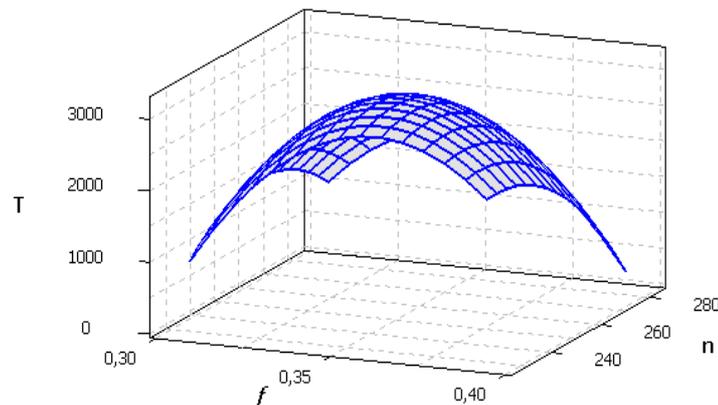


Figura 5.9 - Efeito da Interação entre Avanço e Rotação sobre a Vida da Ferramenta

Na Figura 5.10, observa-se que o menor custo de usinagem por peça usinada é obtida com taxa de avanço alta, mas com rotações mais baixas.

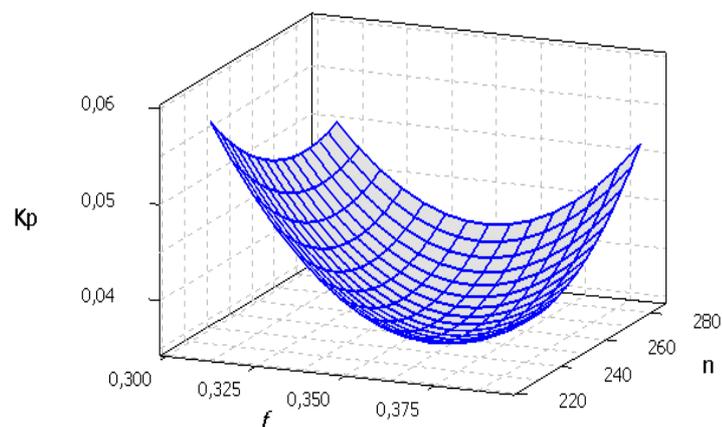


Figura 5.10 - Efeito da Interação entre Avanço e Rotação sobre o Custo por peça Fabricada

Ao contrário de T e K_p , a T_{xp} do processo (Fig. 5.11) só é alcançada com avanços e rotações mais altos.

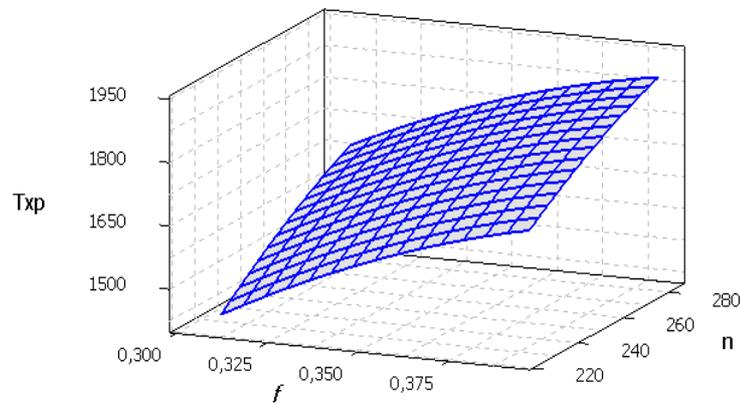


Figura 5. 11 - Efeito da interação entre avanço e rotação sobre a Taxa de Produção

Conforme o fluxo de otimização da Figura 4.5 do capítulo anterior a fase seguinte do estudo é a utilização combinada da Metodologia de Projetos de Experimentos com o Gradiente Reduzido Generalizado.

5.5. Otimização

Após a definição dos modelos matemáticos que representam as variáveis de resposta do processo, inicia-se a etapa de otimização. Esta etapa tem como objetivo determinar quais são os valores que as variáveis de controle devem assumir de modo que os valores alvos das variáveis de resposta sejam atingidos, com mínima variação, independente da condição de ruído a que o processo é submetido. A primeira atividade da etapa de otimização foi denominada otimização individual das variáveis de resposta. Nesta atividade, buscou-se para cada modelo matemático seu respectivo ponto ótimo, dentro dos limites de espaço experimental, porém, sem influência das demais variáveis de resposta. Os valores obtidos como pontos ótimos para cada modelo matemático foram utilizados como alvos das variáveis de resposta durante a atividade seguinte, na qual se executa a otimização simultânea.

5.6. Otimização Individual

A otimização individual dos modelos matemáticos visa determinar o ponto ótimo de cada variável, dentro do espaço experimental e sem a influência das demais variáveis de resposta. Todas as variáveis apresentam respostas do tipo “Maior é Melhor” (LTB –

Larger-the-Better). A exceção fica por conta da variável K_p que apresenta resposta do tipo “Menor é Melhor” (*STB – Smaller-the-Better*). Utilizando-se os modelos adotados para as variáveis na Tabela 5.10, estrutura-se o problema de otimização individual utilizando-se das Equações (5.1 – 5.3) e da restrição implementada ao modelo. Todas as equações a seguir são originadas da metodologia de projetos de experimentos, conforme pode ser observado na Tabela 5.10.

T ; Txp ; Kp

$$\text{Max } f(x) = 3003 + 82,85x_1 - 365,71x_2 - 638,14x_1^2 - 300,30x_2^2 - 262,76x_1x_2 \quad (5.1)$$

$$\text{Max } f(x) = 1712,59 + 90,21x_1 + 74,93x_2 - 14,58x_1^2 - 7,83x_2^2 - 4,77x_1x_2 \quad (5.2)$$

$$\text{Min } f(x) = 0,0363 - 0,0029x_1 + 0,0005x_2 + 0,0048x_1^2 - 0,0020x_2^2 - 0,0024x_1x_2 \quad (5.3)$$

$$\text{Sujeito : } x^T x \leq \rho^2$$

A restrição tem como objetivo evitar que os modelos indiquem valores fora do espaço experimental. Através de uma planilha elaborada no *software* Microsoft Excel®, e tendo como ponto de partida [0; 0], executou-se a ferramenta Solver® para se obter os pontos ótimos individuais dos modelos matemáticos adotados. O resultado da otimização individual para todas as respostas está representado na Figura 5.12.

<u>Modelos</u>					<u>Variáveis</u>				
		T (mm)	Txp (Pç/h)	Kp (\$)			T (mm)	Txp (Pç/h)	Kp (\$)
β_0	Constante	3003,00	1712,59	0,03626	Codificado	f	0,21	1,00	0,40
β_1	f	82,85	90,21	-0,00293		n	-0,70	0,98	-0,37
β_2	n	-365,71	74,93	0,00054	Decodificado	f (mm/rot.)	0,36	0,38	0,38
β_{11}	f^2	-638,14	-14,58	0,00476		n (rpm)	241	275	248
β_{22}	n^2	-300,30	-7,83	0,00200					
β_{12}	$f * n$	-262,76	-4,77	0,00236					
<u>Resultados</u>									
		T (mm)	Txp (Pç/h)	Kp (\$)					
Valor previsto		3140	1850	0,03858					
R ² (adj)		91,10%	99,90%	94,30%					

Figura 5.12 - Planilha Desenvolvida para Encontrar Pontos de Ótimo Individuais (T, Txp e Kp)

Uma demonstração gráfica dos pontos de ótimo individuais é apresentada na Figura 5.13 a seguir.

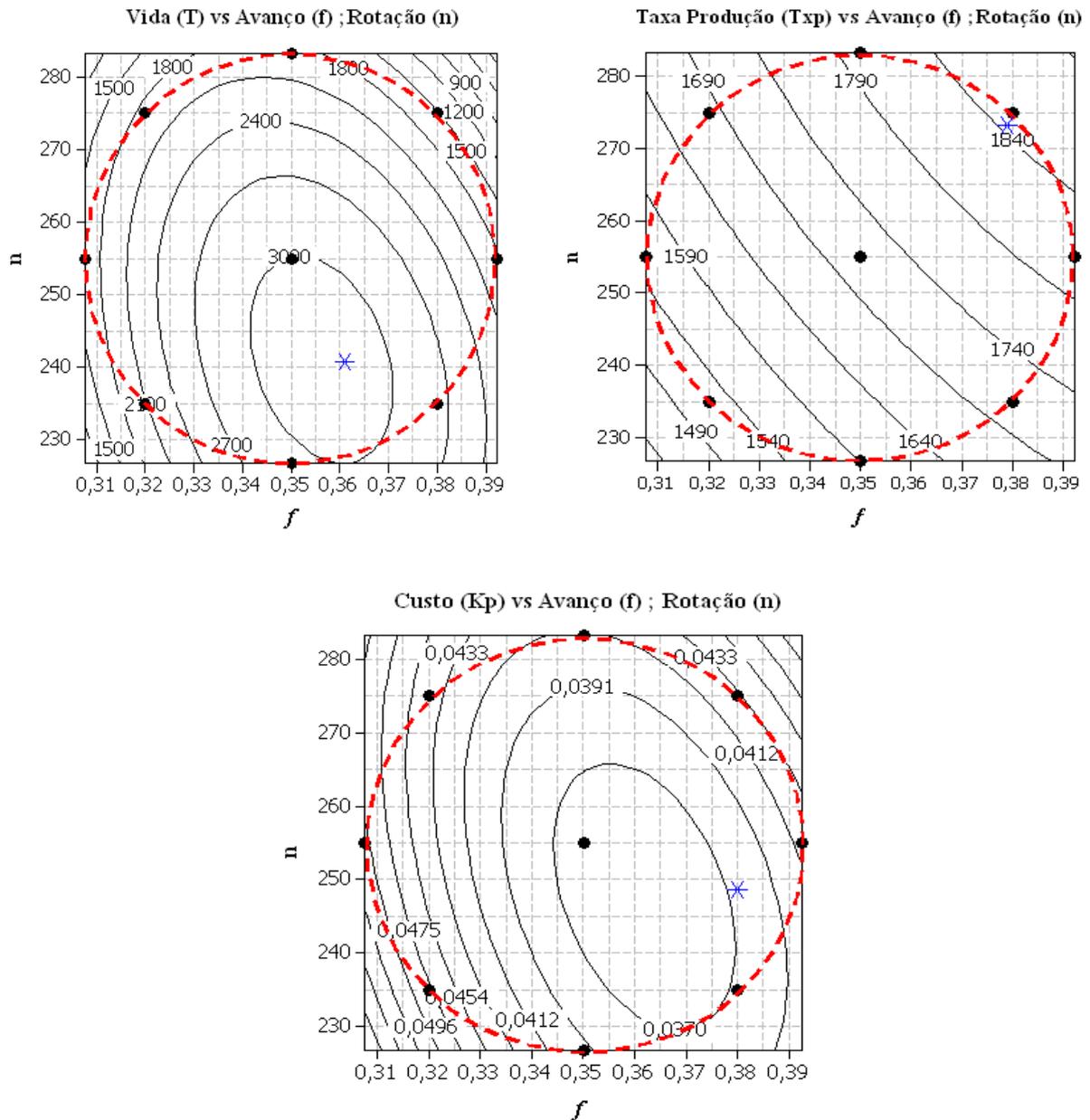


Figura 5.13 - Pontos de Ótimo Individuais para as Respostas (T, Txp e Kp)

O conflito existente entre as diferentes variáveis de resposta na determinação do ponto ótimo comum fica evidenciado nas Figuras 5.12 e 5.13. Cada variável de resposta possui um ponto ótimo específico.

Determinar um ponto ótimo comum é uma tarefa árdua e frequentemente uma variável (ou um conjunto de variáveis) é penalizada em detrimento das demais. Porém vale

ressaltar que esta etapa do estudo é fundamental para se obter os valores alvos da otimização simultânea que será apresentado na etapa seguinte.

5.7. Otimização Simultânea

Dada a natureza conflitante das respostas de interesse, conclui-se que a otimização individual pode não atender a todos os requisitos necessários para um bom funcionamento de um processo, porém, foi possível identificar quais valores poderiam ser utilizados como alvos das variáveis de resposta para a otimização múltipla por priorização. A priorização é realizada em função da vida da ferramenta de corte incluindo ao modelo a restrição de taxa de produção e custo por peça fabricada além da restrição esférica que garante que o ponto de ótimo pertença ao espaço experimental. Assim, de acordo com o equacionamento proposto no sistema de Equações (5.4) e, considerando-se os resultados obtidos na otimização individual das três respostas de interesse, pode-se propor o seguinte sistema de otimização simultânea:

$$\text{Max} \quad f(x) = 3003 + 82,85x_1 - 365,71x_2 - 638,14x_1^2 - 300,30x_2^2 - 262,76x_1x_2 \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeito: } \hat{T}_{xp}(x) &\geq 1850 \\ \hat{K}_p(x) &\leq 0,03858 \\ x^T x &\leq \rho^2 \end{aligned}$$

Modelos

		T (mm)	Txp (Pç/h)	Kp (\$)
β_0	Constante	3003,00	1712,59	0,03626
β_1	f	82,85	90,21	-0,00293
β_2	n	-365,71	74,93	0,00054
β_{11}	f^2	-638,14	-14,58	0,00476
β_{22}	n^2	-300,30	-7,83	0,00200
β_{12}	$f * n$	-262,76	-4,77	0,00236

Variáveis

		T (mm) ; Txp (Pç/h) ; Kp (\$)
Codificado	f	0,65
	n	0,52
Decodificado	f (mm/rot.)	0,37
	n (rpm)	265

Resultados

	T (mm)	Txp (Pç/h)	Kp (\$)
Valor previsto	2431	1850	0,03797
$R^2(\text{adj})$	91,10%	99,90%	94,30%

Figura 5.14 - Planilha Desenvolvida para Encontrar Ponto de Ótimo Múltiplo (T, Txp e Kp)

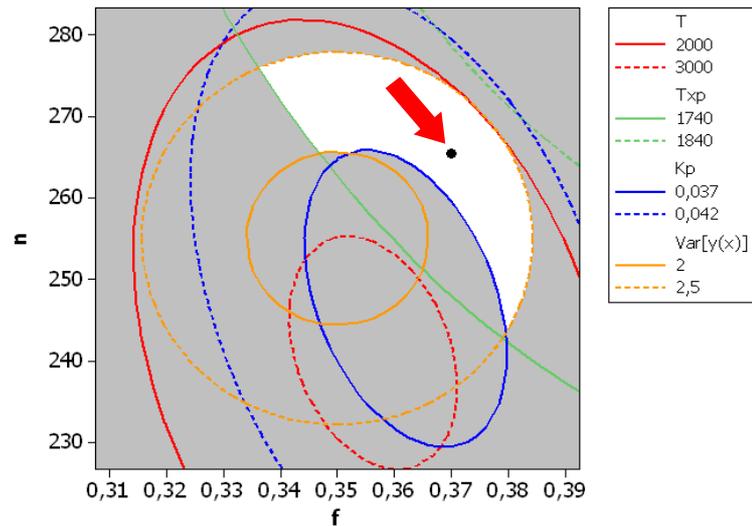


Figura 5.15 - Ponto de Otimização Comum para as Respostas (T, Txp e Kp)

O ponto de ótimo que atende todas as restrições impostas ao modelo é, conforme Figura 5.14, avanço de 0,37 mm/rot. e rotação de 265 rpm, obtendo-se como valor previsto para a vida da ferramenta de corte de 2431 mm, taxa de produção de 1850 peças por hora e um custo de fabricação por peça de \$ 0,03797. Com o auxílio da superfície de resposta é construído a Figura 5.15 que mostra a sobreposição das diversas funções objetivo e restrições e a região viável para o problema que atende as restrições adotadas. Com a ajuda do algoritmo GRG é possível visualizar o caminho percorrido pelo algoritmo na busca do ponto de ótimo. Para que o GRG possa ser aplicado na resolução do sistema de otimização, um ponto inicial viável deve ser fornecido. Partindo-se, portanto, do ponto $f = 0,38$ mm/rot. e $n = 255$ rpm, após 8 iterações (Figura 5.16), obtém-se um ótimo localizado em $f = 0,37$ mm/rot. e $n = 265$ rpm.

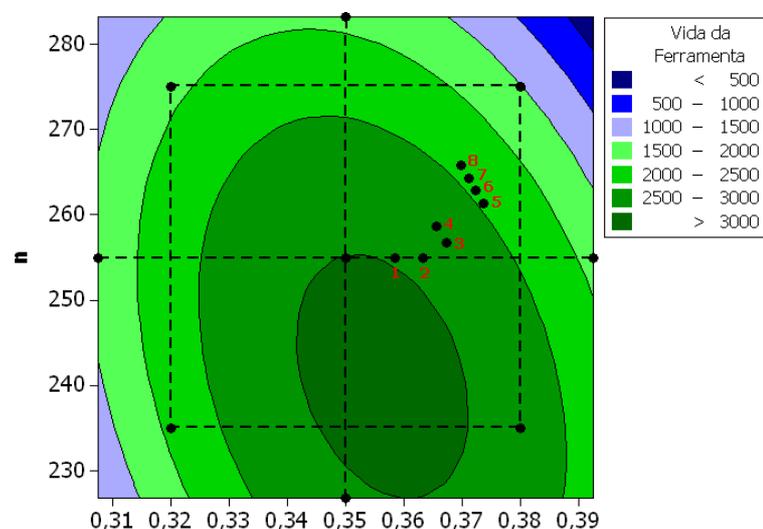


Figura 5.16 - Iterações do GRG no Plano da Vida Útil

A Tabela 5.11 mostra os fatores analisados no estudo, as três variáveis de resposta e uma comparação feita em relação à ferramenta hexagonal.

Tabela 5.11 - Comparativo entre Condição Anterior *versus* Otimizada

	Parâmetros	Anterior	Otimizada
Fatores	f (mm/rot.)	0,32	0,37
	n (rpm)	235	265
	Gt	Hexagonal	Quadrada
Respostas	T (mm)	1351	2431
	Txp (pc/h)	1451	1850
	Kp (\$/pç)	0,059	0,038

Os resultados alcançados com a otimização, conforme Tabela 5.11 demonstram que os ganhos foram significativos no torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico. Observa-se que as mudanças nos níveis dos fatores impactaram de forma positiva na vida da ferramenta, na taxa de produção e no custo de usinagem. Tecnicamente as melhorias no processo de usinagem dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico, são explicadas pelas modificações nos parâmetros de corte e geometria da ferramenta de corte. A alteração realizada no avanço de usinagem do ferro fundido cinzento martensítico foi um aumento de 15,63%, reduzindo-se o tempo de contato entre peça e ferramenta, fato este que contribui para uma maior vida da ferramenta e menor tempo de usinagem, aumentando-se a taxa de produção dos anéis de pistão e reduzindo-se o custo por peça fabricada. A rotação teve um aumento de 12,77% contribuindo-se para uma maior velocidade de avanço, reduzindo-se o tempo de usinagem e favorecendo-se a taxa de produção. Por último e não menos importante, a alteração na geometria da ferramenta de corte teve uma contribuição fundamental para o sucesso deste estudo. O desenvolvimento desta nova geometria de corte proporcionou elevação na vida da ferramenta de corte e favoreceu as condições de usinagem mais agressivas obtidas pelo estudo.

5.8. Validação dos Resultados

Com a definição da condição ótima de corte para o processo de torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico, decidiu-se realizar ensaios de confirmação para avaliar a confiança nos resultados matemáticos, repetindo-se a condição ótima 75 vezes, conforme Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Experimentos de Confirmação para Análise da Vida da Ferramenta

T (mm)				
2402	2553	2703	2402	2553
2553	2252	2402	2402	2402
2553	2252	2853	2102	2703
2553	2252	2402	2553	2402
2252	2252	2553	2252	2402
2415	2553	2402	2402	2415
2252	2415	2252	2415	2252
2252	2703	2102	2703	2102
2402	2252	2703	2402	2402
2402	2402	2853	2402	2703
2402	2402	2402	2102	2402
2853	2402	2553	2252	2402
2402	2853	2853	2402	2553
2553	2703	2102	2853	2402
2703	2252	2252	2102	2402

As condições de ruído adotadas durante o processo de usinagem dos experimentos de confirmação foram idênticas às adotadas durante o levantamento dos dados.

Ao final dos testes, o valor previsto pelo modelo encontra-se no intervalo de confiança de 95% construído para os experimentos de confirmação, conforme Figura 5.17, o que revela que o modelo proposto, obtido experimentalmente através do DOE e GRG é adequado para a melhoria do processo de usinagem.

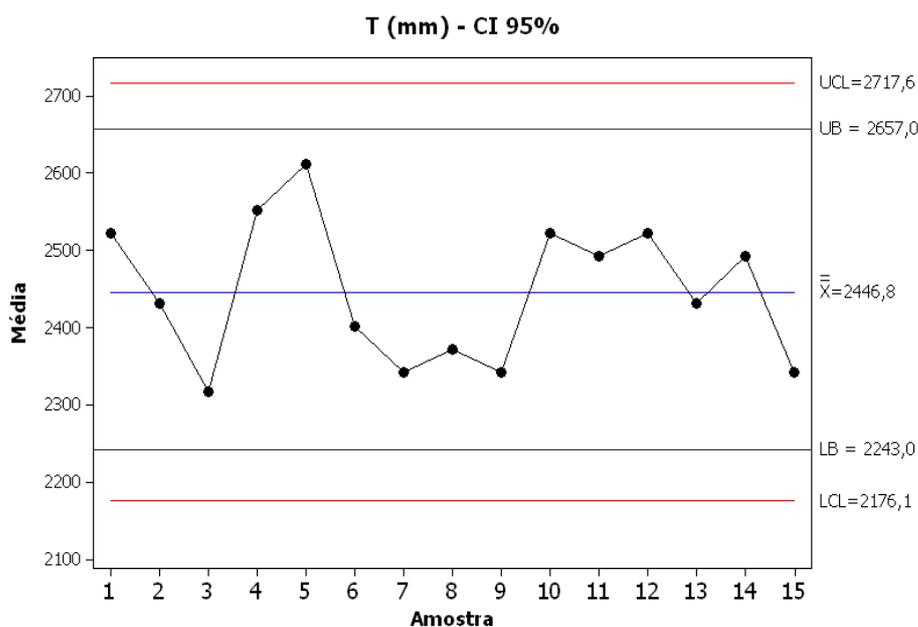


Figura 5.17 - Gráfico de Controle X-bar com Intervalo de Confiança de 95% para os Experimentos de Confirmação

6. Conclusões

6.1. Conclusões gerais

A partir dos resultados apresentados e discutidos ao longo do capítulo anterior, estabelecem-se, para o presente trabalho, as seguintes conclusões:

1 - A vida da ferramenta teve aumento significativo, fato este explicado devido à diferença de sua geometria de corte e da interação dos parâmetros de corte, avanço e rotação. A geometria especial da ferramenta quadrada apresentou melhor desempenho, devido à construção da aresta de corte escalonada com duas pontas de corte o que fraciona a remoção de material. A interação entre os parâmetros de corte diminuiu o tempo de contato entre a peça e a ferramenta, contribuindo para uma maior vida da ferramenta.

2 - A taxa de produção foi aumentada devido à otimização dos parâmetros de processo (avanço, rotação e geometria da ferramenta), que contribuíram para um menor tempo total de usinagem por peça fabricada e uma maior vida da ferramenta de corte. A condição otimizada, aumentou em 30,38% o avanço em milímetros / minuto, reduzindo-se o tempo total de usinagem por peça, conseqüentemente elevando-se a taxa de produção.

3 - A redução do custo de usinagem por peça foi alcançada devido o somatório de benefícios de uma melhor geometria de ferramenta de corte e dos parâmetros de corte otimizados, na usinagem dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico na operação de torneamento vertical.

4 - Os resultados foram expressivos para as respostas estudadas; aumento de 79,94% para a vida da ferramenta, 27,49% para a taxa de produção e uma redução custo de usinagem 35,59% por peça.

5 - A otimização do processo de torneamento vertical com base no Projeto de Experimentos combinada com o algoritmo GRG, disponível no aplicativo de otimização Solver[®], formam uma abordagem muito útil na modelagem das condições de usinagem.

6 - Os experimentos de confirmação mostraram que a vida da ferramenta pertence ao intervalo de confiança de 95%. Com isso, obteve-se a validação dos resultados ótimos e também dos modelos desenvolvidos para as respostas. Portanto, tais resultados fazem

destes modelos expressões úteis para um adequado controle do processo, na medida em que apresentam baixos erros quanto à previsão das respostas.

Mesmo considerando a qualidade dos resultados, e os resultados da presente abordagem, estas conclusões não podem ser extrapolados para diferentes materiais, ferramentas ou máquinas-ferramentas e são válidos apenas nos níveis adotados. A abordagem pode, no entanto, ser recomendada para otimizar qualquer processo de fabricação.

6.2. Sugestões para Estudos Futuros

Este trabalho está focado no entendimento, dentro de certos limites, de um processo de manufatura particular, o torneamento vertical duplo dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico em uma operação de desbaste, utilizando ferramentas gêmeas de metal duro revestidas com nitreto de titânio, utilizando a metodologia de projeto de experimentos e algoritmos de otimização específicos para se alcançar a otimização do processo. A escolha destas particularidades tem o intuito de estudar o método de otimização de múltiplas respostas proposto neste trabalho, utilizando os recursos disponíveis. No entanto, outros aspectos poderiam ser considerados em trabalhos futuros na tentativa de aperfeiçoar o método ou verificar suas limitações, tais como:

- Estudar outros processos de fabricação, tais como: retificação, mandrilamento, furação, fundição, soldagem e conformação ampliando o histórico de aplicação do método.
- Outras combinações com diferentes materiais, equipamentos ou ferramentas também caracterizam novos trabalhos e o aumento do conhecimento a respeito do método proposto.
- Aplicação de outros algoritmos de otimização, tais como: algoritmos genéticos, e outros poderiam ser avaliados, buscando a localização eficaz do ponto ótimo global.
- O desenvolvimento de um *software* computacional específico para a solução dos problemas de otimização de múltiplas respostas, com uma interface mais amigável, poderia ser considerado, utilizando o método proposto e contemplando todo o referencial teórico envolvido nesta pesquisa.

7. Referências Bibliográficas

ALARCÓN, O. E. Q. (2003) - Ferros Fundidos Cinzentos: Correlação entre estrutura e propriedades mecânicas, estudada por meio do ensaio de compressão entre cunhas.- Dissertação de Mestrado - Pós-graduação Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica (UNICAMP), Campinas, 212 pgs.

AL-AHMARI, A. M. A. (2007) - Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations - *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 305-311.

AGGARWAL, A.; SINGH H.; KUMAR P.; SINGH, M. (2008) - Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique - A comparative analysis. *Journal of Materials Processing Technology* V. 200, Issues 1-3, 8 May 2008, pp. 373-384.

ARAÚJO, F. M. (2009) - O projeto de anéis de pistão no desenvolvimento de motores de combustão interna. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Mecânica Automobilística. Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 62 pgs.

ASTM A 247-67 - Standard Method for Evaluating the Microstructure of graphite in Iron Castings.

AVCI, A.; ILKAYA, N.; SIMSIR, M.; AKDEMIR, A. (2009) - Mechanical and microstructural properties of low-carbon steel-plate-reinforced gray cast iron. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 1410-1416.

BAGETTI, J. H.; (2009) - Análise da Usinabilidade, Deformação e Temperatura no Fresamento dos Ferros fundidos vermicular e cinzento. Dissertação de Mestrado - Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 136 pgs.

BALZERS, OERLIKON BALZERS SERVICES (2011) - Revestimento Balinit®". Disponível em: <www.oerlikon.com/balzers/br>. Acesso em: 03 janeiro 2011.

BITTERLICH, B.; BITSCH, S.; FRIEDERICH, K. (2008) - SiAlON based ceramic cutting tools. *Journal of European Ceramic Society*, v. 28, pp. 989-994.

BRANCO, C. H. C.; SANTOS, A. B. S. (1989) - Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares. 3 ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT, 206 pgs.

BORILLE, A. V. (2005) - Análise do alargamento de ferro fundido cinzento GG25 com ferramentas de metal-duro. Dissertação de Mestrado - Pós-graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 153 pgs.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. (1978) - Statistics for Experimenters, John Wiley & Sons, 1 ed., pp. 690.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; MACGREGOR, J. F.; ERJAVEC, J. (1973) - Some Problems Associated with the Analysis of Multiresponse Data. *Technometrics*, V. 15, n 1, pp. 33-51.

BOX, G. E. P.; WILSON, K. B. (1951) - On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society*, XIII, V. 1, Série B, pp. 1-45.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. (1987) - Empirical Model-Building and Response Surfaces. John Wiley & Sons, 1 ed., pp. 650.

CALLISTER, W. D. JR. (2002) - Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª ed. Rio de Janeiro, Ed. LTC, pgs. 589.

CAMUSCU N.; ASLAN E.; BIRGOREN B. (2007) - Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al₂O₃ + TiCN mixed ceramic tool. *Materials and Design* 28, pp. 1618-1622.

CARLYLE, W. M.; MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. (2000) - Optimization Problems and Methods in Quality Control and Improvement. *Journal of Quality Technology* 32, pp. 1-17.

CAUCHICK-MIGUEL, P.A.; Coppini N.L. (1996) - Cost per piece determination in machining process: an alternative approach, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, pp. 939-946.

CHANDRA, M. J. (2001) - Statistical Quality Control. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, pp. 279.

CHIANG K.; NUN-MING L.; JENN-TSONG H. (2008) - Investigating the machinability evaluation of Hadfield steel in the hard turning with Al₂O₃/TiC mixed ceramic tool based on the response surface methodology - *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 532-541.

CHIAVERINI, V. (2005) - Aços e ferros fundidos, 7ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 576 pgs.

CHOUDHURY, I. A.; EL-BARADIE, M. A. (1998) - Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290 BHN). *Journal of Materials Processing Technology*, V 77, pp. 319-326.

CHOUDHURY S.K. ; BARTARYA G. (2003) - Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neural network and design of experiments - *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp.747-753.

COFAP (1996) - Manual Doutor em Motores, 118 pgs.

COLOMBARI, R. R.(2004) - Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção. Dissertação Mestrado em Engenharia de Produção. Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 119 pgs.

COLPAERT, H. (1974) - Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns, 3ª Edição, Edgard Blücher, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 672 pgs

CONSALTER, L. A. ; GUEDES, L. C. ; PUREY, J. A. (1987) - Usinabilidade de ferros fundidos. *Fundição e Matérias Primas*, São Paulo, n. 84, 39-45 pgs.

CORRÊA, D. C. (2002) - Usinabilidade de mancais bimetálicos: influência do avanço no desgaste e na formação de rebarbas. Dissertação Mestrado em Engenharia Automotiva . PUC Minas - Belo Horizonte, 05 de abril, 155 pgs.

COX, D.R.; REID, N. (2000) - The Theory of the Design of Experiments Chapman e Hall/CRC; 1 ed., pp. 336.

DEL CASTILLO, E. (2007) - Process Optimization - *A Statistical Approach*, Springer, 1st ed., pp. 459.

DEL CASTILLO, E., MONTGOMERY, D. C. (1993) - A Nonlinear Programming Solution to the Dual Response Problem, *Journal of Quality Technology*, v 28, n 2, pp. 331-336.

DELJAIKOV, S; BORDINASSI, E. C.; ALMEIDA, C. O. C F; BATALHA, G. F. E ; STIPKOVIC, M. F (2007) - A integridade superficial em um aço inoxidável superdúplex após o torneamento. Revista Máquina e Metais, Dezembro N° 503, Aranda editora, ano XLIV 138-157 pgs.

DERRINGER, G.; SUICH, R. (1980) - Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, V. 12, n 4, pp. 214-219.

DEVOR, R. E.; CHANG, T.; SUTHERLAND, J. W. (1992) - Statistical Quality Design and Control – Contemporary Concepts and methods. New Jersey, Prentice Hall, Inc. Cap. 15-20, pgs. 503-744.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. .; COPPINI, N. L. (2008) - Tecnologia da Usinagem dos Materiais, 6 ed. São Paulo: Artliber Editora, 262 pgs.

DIXIT, U.S.; SARMA, D.K. (2007) - A comparison of dry and air-cooled turning of grey cast iron with mixed oxide ceramic tool. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 160-172.

FERRARESE, A. (2004) - Efeito do desgaste do primeiro anel de pistão no seu desempenho de vedação e raspagem, Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da USP, São Paulo, 120 pgs.

FERRARESE, A. (2009) - Anéis de pistão de baixo atrito. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA). Trabalho apresentado Categoria Tecnologias OTTO, 14 pgs.

FERRARESI, D. (1970) - Fundamentos da Usinagem dos Metais. Edgard Blucher, 1ª Ed., 751 pgs.

FERREIRA, J. R. ; BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, A. P. (2007) - A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization - *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 26–35.

FERRER, J. A. G. (2006) - Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares de Ferro Fundido Cinzento. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), São Paulo, Campinas, 208 pgs.

FORSTER, E.; BATHE, R. V. (1990) - Avoiding Possible Confusion in Usual Methods of Steepest Ascent Calculation, *Chemo metrics and Intelligent Laboratory Systems*, V. 9, pp. 207-215.

GALDÁMEZ, E. V. C. (2002) - Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos na Melhoria da Qualidade de um Processo de Fabricação de Produtos Plásticos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 133 pgs.

GODIM, R. M. (2008) - Aplicação da distribuição de Weibull no monitoramento da operação de torneamento - Dissertação de Mestrado - Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 103 pgs.

GODINHO, A. F. C. E. (2007) - Análise do mandrilamento de cilindros de blocos de motores em ferro fundido vermicular com diferentes concepções de ferramentas - Dissertação de Mestrado - Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 129 pgs.

GOMES, J. H. F. (2010) - Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço carbono utilizando arame tubular inoxidável austenítico. Dissertação Mestrado em Engenharia de Produção. Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, pgs. 137.

GONÇALVES, A. (2010) - Obtenção E Caracterização de Revestimentos Compostos de Multicamadas TiO₂/TiN. Dissertação de Mestrado Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, 74 pgs.

GOODRICH, G. M. (2005) - Descobrimo o caminho para soluções de usinabilidade de ferro fundido - Estudo de caso 2 - Revista Fundição e Matérias-Primas, nº 66 – Junho, 1-7 pgs.

GUESSER, W. L. (2009) - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos, 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher Editora, 344 pgs.

GUESSER, W. L. E GUEDES, L. C. (1997) - Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à indústria Automobilística. Associação de Engenharia Autmotiva (AEA), São Paulo, 11 pgs.

HARRINGTON, E. C. (1965) - The Desirability Function, *Industrial Quality Control*, n 21, pp. 494-498.

HEJAZI, M.M.; DIVANDARI, M.; TAGHADDOS, E. (2009) - Effect of copper insert on the microstructure of gray iron produced via lost foam casting. *Materials and Design*, V 30 1085-1092.

ISCAR LTDA. (2001) - Conceitos básicos de usinagem, Catálogo, Israel.

ISCAR LTDA. (2007) - Turning Tools, Catálogo de torneamento, Israel.

ISIK, Y. (2007) - Investigating the machinability of tool steels in turning operations. *Materials and Design*, V 28, pp. 1417-1424.

ISO 6621 (1984) - International Organization for Standardization - Piston Rings.

ISO 3685 (1983) - Internacional Organization for Standardization tool life testing with single point turning tools. Switzerland.

KÖKSOY, O. (2007) - A nonlinear programming solution to robust multiresponse quality problem. *Appl. Math. Comput.*, V. 6, p. 23.

KÖKSOY, O., DOGANAKSOY, N. (2003) - Joint Optimization of Mean and Standard Deviation Using Response Surface Methods. *Journal of Quality Technology*, V. 35, n 3, pp. 237-334.

KO, Y. H., KIM, K. J., JUN, C. H. (2005) - A new loss function-based method for multiresponse optimization, *Journal of Quality Technology*, v 37, n 1, pp. 50-59.

KRAUSE, D. E. (1969) - Gray Iron-A Unique Engineering Material Gray, Ductile, and Malleable Iron Castings-Current Capabilities, ASTM STP 455, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, pp. 3-28.

KURT, M.; BAGCI, E.; KAYNAK, Y. (2009) - Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes. *Int J Adv Manuf Technol.*, pp. 458-469.

LALWANI, D.I.; MEHTA, N.K.; JAIN, P.K.(2008) - Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel - *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 167-179.

LASDON, L. S.; JAIN, A. D. A.; RATNER, M. (1978) - Design and testing of a Generalized Reduced Gradient Code for nonlinear programming. *ACM Trans. Math. Soft.*, 4 (1), pp. 34-50.

LEITNAKER, M. G.; COOPER, A. (2005) - Using Statistical Thinking and Designed Experiments to Understand Process Operation. *Quality Engineering*, Taylor & Francis Inc., pp. 279-289.

LIN, J. F.; CHOU, C. C. (2002) - The response surface method and the analysis of mild oxidational wear. *Tribology International*, v 35, pp. 771-785.

LUENBERGER, D. G. (1986) - Linear and nonlinear programming. Second Ed., Addison-Wesley, Rading, pp. 491.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. (2009) - Teoria da Usinagem dos materiais. Editora Edgard Blucher, 1ª Ed., 371 pgs.

MALUF, O. (2002) - Influência do roleteamento no comportamento em fadiga de um ferro fundido nodular perlítico. Dissertação de Mestrado Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo, São Carlos, 116 pgs.

MARCONDES, F. C. (2001) - Alternativas para a maximização da produtividade em usinagem sob a ótica da análise de valor. Dissertação de Mestrado - Pós graduação em Engenharia Mecânica. UNICAMP, Campinas, 185 pgs.

MARCONDES, F. C. (2007) - Usinagem Interna: Cuidados e Recomendações. Revista O Mundo da Usinagem, São Paulo, Sandvik Coromant do Brasil, 5ª Ed., ,Nº 35 pgs. 26-32.

MASON, R. L.; GUNST R.F.; HESS J.L. (2003) - Statistical Design and Analysis of Experiments, with Applications to Engineering and Science Wiley-Interscience; 2 edition, pp. 760.

MATTES, W. (2009) - Influência dos Revestimentos de Brocas na Furação do Ferro Fundido Nodular Austemperados . Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica da Sociedade Educacional de Santa Catarina – SOCIESC, Joinville, 112 pgs.

MELO, A. C. A.; FRANCO, S. D.; MACHADO, A. R. (2005) - Diferentes Desgastes avarias em ferramentas de metal duro. Revista Máquina e Metais, Dezembro, N° 479 Aranda editora, ano XLII, 118-152 pgs.

METALURGIA - <http://www.aceros.com.es/2/Fotos/metalurgia.html>. Acessado dia 05/02/11.

MEURER, P. R.; BOEHS L.; GUESSER W. L. (2007) - Usinabilidade de ferro fundido cinzento ligado utilizado na fabricação de discos de freios automotivos. 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, São Paulo, 15 a 18 de abril.

MIRANDA, G. W. A. (1997) - Uma contribuição para aplicações em controle adaptativo otimizado no torneamento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. UNICAMP, Campinas, 82 pgs.

MONTGOMERY, D. C. (2005) - Design and analysis of experiments. 6th edition. Arizona: John Wiley & Sons, Inc.

MONTGOMERY, D. C. (1997) - Designs and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons.

MONTGOMERY, D. C. (2001) - Design and analysis of experiments. Fourth ed., Wiley, New York.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. (2003) - Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2 ed., 570 pgs.

MONTGOMERY, D.C. (2000) - Design and Analysis of Experiments, 5º Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 672.

MASON, R.L. ; GUNST, R.F. ; HESS, J.L. (2003) - Statistical Design and Analysis of Experiments, with Applications to Engineering and Science, Wiley-Interscience; 2 edition, pp 760.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C. (2002) - Response Surface Methodology-Process and Product Optimization Using Designed Experiments. Wiley Series in Probability and statistics - John Wiley & Sons, Inc 2ed., pp. 824.

MURPHY, T. E.; TSUI, K. L.; ALLEN, J. K. (2005) - A review of robust design methods for multiple responses. *Research in Engineering Design*, V. 15, pp. 201-215.

NALBANT, M.; GÖKKAYA, H.; SUR, G.(2007) - Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials & Design* Volume 28, Issue 4, pp. 1379-1385.

NASH, S. G.; SOFER, A. (1996) - Linear and nonlinear programming. First ed., McGraw-Hill Companies Inc., pp. 692.

NETO, E.R. (2009) - Torneamento interno de cilindros automotivos de ferro fundido cinzento centrifugado. Dissertação de Mestrado - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 115 pgs.

NETO, B.; SCARMINIO, B.; BRUNS, I. S.; EDWARD, R. (2010) - Como Fazer Experimentos - Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria, 4ª Ed., Porto Alegre :Bookman, 414 pgs.

NILO JÚNIOR, L. P. (2003) - Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 111 pgs.

NOORDIN, M. Y. ; VENKATESH, V.C.; SHARIF, S.; ELTING, S; ABDULLAH, A. (2004) - Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, pp.46–58.

ORTIZ, F. JR.; SIMPSON, J. R.; PIGNATIELLO, J. J. Jr.; HEREDIA-LANGNER, A. (2004) - A Genetic Algorithm approach to multiple-response optimization. *Journal of Quality Technology*, V. 36, n 4, pp. 432-450.

OSBORNE, D. M.; ARMACOST, R. L.; PET-EDWARDS, J. (1997) - State of the art in multiple response surface methodology. *IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation*, V. 4, pp. 3833-3838.

ÖZEL, T.; KARPAT, Y. (2005) - Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, V45, pp. 467-479.

PAIVA, A. P. (2006) - Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UNIFEI, Itajubá, 257 pgs.

PAIVA, A. P.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P. (2007) - A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization. *Journal of Material Processing Technology*, n. 189, pp. 26-35.

PAIVA, E. J. (2008) - Otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas baseada em índices de capacidade. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 118 pgs.

PEREIRA, J. C. C. (2006) - Determinação de Modelos de Vida de Ferramenta e Rugosidade no Torneamento do Aço ABNT 52100 Endurecido Utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (DOE). Dissertação de Mestrado - Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica -Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 140 pgs.

PEREIRA, A. A.; BOEHS, L.; GUESSER, W. L. (2006) - The influence of sulfur on the machinability of gray cast iron FC25. *Journal of Materials Processing Technology*, V. 179, pp. 165-171.

PÉREZ, C. J. L.; ARBIZU, P. (2003) - Surface roughness prediction by factorial design of experiments in turning processes. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 143-144.

PICCILLI, M. R. (2009) - Otimização do processo de nitretação gasosa na redução de trincas em anéis de pistão para motores de combustão interna. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá programa de pós-graduação em Engenharia de Produção, Itajubá, 125 pgs.

PIRES, A. (2006) - Desenvolvimento de ligas de ferro fundido cinzento para a fabricação de cilindros secadores utilizados em máquinas de produção de papel. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade São Francisco, São Paulo, Itatiba, 101 pgs.

PITTORRI, F. A. (2005) - Um sistema para auxiliar na análise da forma livre de anéis de pistão automotivos. Mestre em Engenharia Elétrica Engenharia Eletrica e de Computação UNICAMP : Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Estadual de Campinas . Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 125 pgs.

PRADHAN, S.K.; NAYAK, B.B.; MOHAPATRA, B.K.; MISHRA, B.K. (2007) - Micro Raman Spectroscopy and Electron Probe Microanalysis of Graphite Spherulites and Flakes in Cast Iron - The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International , Metallurgical and materials transactions a volume 38A, October 2363.

REDDY N.S.K. ; RAO P. V. (2005) - Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling - *Int J Adv. Manuf. Technol.*, pp. 1202-1210.

REIS, A. M. (2000) - Influência do ângulo de posição secundário da ferramenta, raio de ponta e lubrificação na usinagem em presença de aresta postiça. Dissertação de Mestrado- Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia UFU, Uberlândia, 88 pgs.

ROSA, S.N. (2009) - Influência do teor de titânio no torneamento do ferro fundido vermicular- Dissertação de Mestrado - Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica (UNICAMP), Campinas, 96 pgs.

SANDIVK COROMANT (2010) - Torneamento - Catálogo Técnico, 152 pgs.

SANTOS, A.C.; SALES W.F. (2007) - Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais, São Paulo: Artliber Editora, 246 pgs.

SCHRAMM, B.; XAVIER, F.A (2007) - Materiais cerâmicos de corte - Revista Máquina e Metais , Fevereiro Nº 493, Aranda Editora, Ano XLIII pp. 32-49.

SHARMA, V. S.; SHARMA, S.K.; SHARMA, A. K. (2008) - Cutting tool wear estimation for turning . *Journal of Intelligent Manufacturing*. V. 19, Number 1, pp. 99-108.

- SHAW, M. C. (2004) - Metal cutting principles. New York: Oxford University Press, pp. 651.
- SINGH, D.; RAO P. V. (2007) - Surface roughness prediction model for hard turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, V. 32, Numbers 11-12, pp. 1115-1124.
- SMITH, W. F. (1993) - Structure and properties of engineering alloys, McGraw-Hill Book Company, pp. 672.
- SOUZA, J.V.C.; NONO, M.C.A.; RIBEIRO, M.V; MACHADO J.P.B.; SILVA, O.M.M. (2009) - Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool. *Materials and Design*, V30, pp. 715-2720.
- STEMMER, C. E. (2005) - Ferramentas de Corte I. 6 ed., Florianópolis: ed. UFSC, 249 pgs.
- STOETERAU, R. L. (2004) – Apostila de Processos de Usinagem. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 180 pgs.
- SUDO, T. T.; BRAGHINI, A. JR.; COELHO, R. T. (2001) - O desgaste de ferramentas na usinagem de FoFo cinzento a alta velocidade. *Revista O Mundo da usinagem*, São Paulo, Sandvik Coromant do Brasil, 1ª Edição, Nº 1 pags. 27-31.
- TELES, J. M. (2007) - Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Itajubá, 124 pgs.
- TIANFU J.; WEI W.; YUWEI G.; GUIYING Q.; XIN Z. (2007) - Properties of a gray cast iron with oriented graphite flakes. *Journal of Materials Processing Technology*, V182, pp. 593-597.
- TIKAL F.; SCHAFER M.; GLEIM P. E.; MALDANER J. (2007) - Medição óptica usada para caracterizar o revestimento. *Revista Máquina e Metais*, Fevereiro Nº 493, Aranda Editora ANO XLIII, pp. 88-93.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. (2000) - Metal Cutting. Fourth Edition Woburn, MA: Butterworth Heinemann, pp. 446.
- VALDIVIA, M. R. (2007) - Efecto de la martensita revenida en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de un acero microaleado a – 572 Nb”. Universidad Nacional De San Agustín, Escuela De Postgrado ,Unidad De Postgrado De La Facultad De Ingeniería de Procesos. 9º CIASEM, Cusco-Peru, Acta Microscopica Vol 16 No1-2, (Supp.2).
- VAN GYSEGHEM, E.; JIMIDAR, M.; SNEYERS, R.; REDLICH, D.; VERHOEVEN, E.; MASSART, D. L.; VANDER HEYDEN; Y. (2004) - Selection of Reversed-Phase Liquid Chromatographic Columns with Diverse Selectivity Towards the Potential separation of Impurities in Drugs, *Journal of Chromatography A*, n 1042, pp. 69-80.
- VATAVUK, J.; VILLAR, C. A. (2003) - Ferro fundido nodular com nióbio para aumento da resistência ao desgaste de anéis de pistão de motores de combustão interna. *Fundição e Serviços*. São Paulo, pgs. 138-145.
- VOLCI, G. A. (2007) - Comportamento tribológico do anel de primeiro canaleta em motores operando em sistemas flex fuel. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, na

Área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba , pgs 131.

WU, F. C. (2005) - Optimization of correlated multiple quality characteristics using desirability function, *Quality Engineering*, V. 17, n1, pp. 119-126.

XAVIER, F.A (2003) - Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 146 pgs.

XAVIER, F. A. (2009) - Estudo dos mecanismos de desgaste em ferramentas de nitreto de silício aplicadas no torneamento dos ferros fundidos vermicular e cinzento. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 267 pgs.

XAVIOR, A. M. ; ADITHAN, M. (2009) - Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, V. 209, Issue 2, 19 January 2009, pp. 900-909.

XUEPING, Z.; ERWEI, G.; RICHARD, C. L. (2009) - Optimization of process parameter of residual stresses for hard turned surfaces. *Journal of Materials Processing Technology* V. 209, Issue 9, 1 May 2009, pp. 4286-4291.

YANG Y.; CHORNG-JYH T.; YU-HSIN L.; MING-CHANG J. (2009) - Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis. *Journal of Materials Processing Technology* V. 209, Issue 6, 19 March 2009, pp. 2753-2759.

YALDIZ, S.; SÜLEYMAN, N.; TÜRKES, E. (2011) - Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology. *Measurement* , pp. 580-587.

YUHARA, D. A., (2000) - Aplicação de Revestimentos PVD em Ferramentas de Corte”, - Feira e Congresso, São Paulo, Brasil, Agosto 2000, 9 pgs.

ZEILMANN, R. P.; NICOLA, G. L.; FINIMUNDI, A. V.; SANTIN R. (2007) - Diferentes condições de uso de fluidos lubrificantes e refrigerantes Revista Máquina e Metais, Março N° 494, Aranda editora, ano XLIII, pgs. 110-123.