

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

**DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DE
LIMAS HEDSTRÖEM**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

DURVAL JOÃO DE BARBA JUNIOR

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 1997.

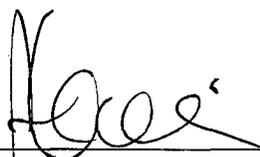
DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DE
LIMAS HEDSTRÖEM

DURVAL JOÃO DE BARBA JUNIOR

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

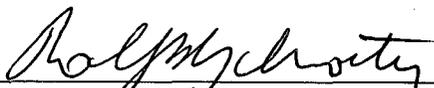


*Prof. Abelardo a. Queiroz, Ph.D.
Coordenador do curso*

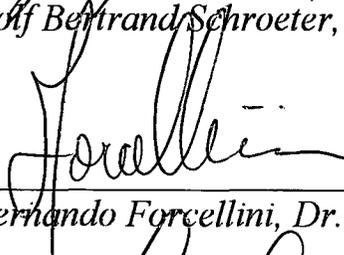


*Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Orientador*

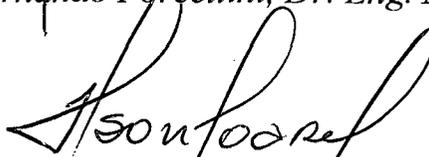
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr.Eng. Mec.



Prof. Fernando Forcellini, Dr. Eng. Mec.



Prof. Ilson José Soares, Dr.

Aos meus pais, Durval e Cleci

e a minha irmã Marion.

Estudos arqueológicos em sítios da Ilha de Santa Catarina, Ilha do Campeche e Ilhas Moleque do Sul na costa atlântica de Santa Catarina comprovam que os habitantes primitivos destes lugares empregavam tecnologia de usinagem abrasiva na fabricação de seus utensílios.

Em homenagem a estes artesãos, esta dissertação é intitulada de:

“AUSTRALOPITECUS RETÍFICUS”

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Durval João De Barba e Cleci Granzotto De Barba, pela compreensão, formação e carinho em todos os momentos de minha vida e que, certamente sem eles, não iniciaria mais esta jornada.

A minha irmã de sangue, Marion Cristine De Barba, pela tranquilidade familiar que sempre nos uniu e nos unirá.

A minha noiva, Flávia Borba Gonçalves, pela demonstração de amor, ternura e amizade nos caminhos por nós percorridos.

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner por sua amizade, companheirismo, confiança, exemplo humanístico e orientação deste trabalho.

À CAPES e CNPq pela concessão de bolsa de estudo e recursos que propiciaram o andamento do trabalho.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFSC - pelo fornecimento de recursos financeiros para a compra de material de estudo.

À ETFPel - UNED - Sapucaia do Sul pelo fornecimento das condições necessárias ao término deste trabalho.

À Winter do Brasil pelo fornecimento das ferramentas necessárias ao desenvolvimento desse trabalho.

Aos queridos irmãos de fé: M. Eng. Jefferson “Jeff” de Oliveira Gomes pela longa amizade cultivada desde os primeiros dias de nossa carreira acadêmica; ao Eng. Irapuan “Ira” Santos, Eng. Milton “1000tinho” Pereira, M. Eng. Ricardo Machado Perez e M. Eng. Rodrigo “Guigo” Stoeterau pelo inestimável apoio pessoal e profissional, pela presença constante e cooperação inestimável; ao M. Eng. Carlos Alberto Schuch Bork pela extrema afinidade e incentivos a mim dedicados.

Aos amigos e colegas: Eng. Alexandre “Jacaré” Dias, João Paulo Guimarães, Eng. Juliano Shermer Rossi, Klaus “Kinsky” Schlücking, Luciano Sena, Eng. Rodrigo Schibior, Samantha Grimm Cabral e Thiago “Duracell” Freitas pelas colaborações diretas na conclusão do trabalho.

A Hamilton Silveira e Nikolaus Geisthoevel pela confecção das peças do modelo funcional.

A todos que de uma forma ou de outra me ajudaram, o meu sincero agradecimento.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
SIMBOLOGIA.....	xvi
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. ESTADO DA ARTE.....	4
3.1. A PEÇA	4
3.1.1. Histórico dos instrumentos endodônticos	4
3.1.2. Generalidades	5
3.1.3. Padronização	6
3.1.4. Limas Hedström.....	8
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DAS LIMAS.....	10
3.2.1. Aços inoxidáveis.....	12
<i>Classificação dos aços inoxidáveis</i>	12
3.2.2. Aços inoxidáveis martensíticos.....	13
<i>Propriedades e aplicações dos aços inoxidáveis</i>	14
<i>Usinabilidade</i>	15
3.3. FABRICAÇÃO	17
4. O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	20
4.1. INTRODUÇÃO	20
4.2. SELEÇÃO DO REBOLO	21
4.2.1. Tipos de abrasivos	23
<i>Abrasivos para a retificação de aços inoxidáveis</i>	25
4.2.2. Granulometria.....	26

<i>Granulometria para a retificação de aços inoxidáveis</i>	27
4.2.3. Dureza.....	27
<i>Dureza de rebolos para a retificação de aços inoxidáveis</i>	28
4.2.4. Estrutura	28
<i>Estrutura dos rebolos para a retificação de aços inoxidáveis</i>	29
4.2.5. Tipos de ligantes	29
<i>Ligantes para a retificação de aços inoxidáveis</i>	30
4.3. DRESSAMENTO	31
4.4. FLUIDO DE CORTE.....	32
4.4.1. Funções dos fluidos de retificação	32
4.4.2. Tipos de fluidos de retificação.....	33
4.5. RETIFICAÇÃO TIPO <i>CREEP-FEED</i> E TIPO <i>DEEP</i>	35
4.5.1. Retificação tipo <i>Creep-Feed</i>	35
4.5.2. Retificação tipo <i>Deep</i>	37
4.6. RECOMENDAÇÕES NA RETIFICAÇÃO.....	38
5. PROJETO CONCEITUAL DA MÁQUINA RETIFICADORA.....	41
5.1. IDENTIFICAÇÃO DAS NECESSIDADES E DEFINIÇÕES DAS ESPECIFICAÇÕES	42
5.1.1. Clientes.....	42
5.1.2. Obtenção da Casa da Qualidade	43
5.2. CINEMÁTICA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	44
5.3. ESTRUTURA DE FUNÇÕES	45
5.3.1. Função Total	46
5.3.2. Funções Parciais	46
5.4. COMPONENTES PARA A MÁQUINA RETIFICADORA.....	48
5.4.1. Introdução	48
5.4.2. Bases.....	48
<i>Ferro fundido</i>	49
<i>Granito</i>	49
<i>Granito sintético</i>	49
<i>Concreto</i>	49
<i>Cerâmicos</i>	50
5.4.3. Matriz de análise dos materiais para base	50
5.4.4. Árvore de acionamento	51

<i>Mancais</i>	51
A) Mancal de rolamento	51
B) <i>Mancal magnético</i>	53
C) <i>Mancal hidrodinâmico</i>	54
D) <i>Mancal hidrostático</i>	55
E) <i>Mancal aerostático</i>	56
<i>Matriz de análise dos tipos de mancais</i>	58
<i>Acionamentos</i>	59
A) <i>Motor CA de indução</i>	59
B) <i>Motor CA síncrono de relutância</i>	60
C) <i>Motor CA síncrono de histerese</i>	61
D) <i>Motor CC com escovas</i>	61
E) <i>Motor CC sem escovas</i>	61
F) <i>Turbina a ar</i>	62
<i>Matriz de análise dos tipos de acionamento</i>	63
<i>Acoplamentos</i>	63
A) <i>Acoplamento de foles</i>	64
B) <i>Acoplamentos helicoidais</i>	65
C) <i>Acoplamento em cadeia (tipo link)</i>	65
D) <i>Acoplamento por diafragma</i>	66
E) <i>Acoplamento Hooke e Cardan</i>	66
F) <i>Acoplamento por correia</i>	67
<i>Matriz de análise dos tipos de acoplamentos</i>	68
5.4.5. <i>Guias</i>	68
<i>Guias de escorregamento</i>	69
<i>Guias de rolamento</i>	70
<i>Guias a filme fluido</i>	71
5.4.6. <i>Matriz de análise dos tipos de guias lineares</i>	72
5.4.7. <i>Fusos</i>	72
<i>Fusos de deslizamento simples</i>	73
<i>Fusos de deslizamento a filme fluido</i>	73
<i>Fusos de esferas recirculantes</i>	73
5.4.8. <i>Matriz de análise dos tipos fusos</i>	75
5.4.9. <i>Sensores</i>	75
<i>Sensores de posição</i>	75

<i>Sensores de fim de curso</i>	76
5.4.10. Fixação	77
5.4.11. Comando Numérico	78
5.5. CONCEPÇÃO DA MÁQUINA-FERRAMENTA	79
6. PROTÓTIPO DA MÁQUINA RETIFICADORA PARA A CONFECCÃO DE LIMAS HEDSTRÖEM	83
6.1. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO	83
6.2. SOLUÇÃO ADOTADA.....	85
6.2.1. O castelo	87
<i>Sistema de fixação</i>	87
<i>Sistema de sujeição</i>	87
<i>Sistema de movimentação</i>	88
6.2.2. O cabeçote retificador (árvore)	89
6.2.3. Rede de ar comprimido	91
7. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO	92
7.1. COMPORTAMENTO DINÂMICO	92
7.1.1. Estrutura do ensaio	93
7.1.2. Resultado e Conclusão	93
7.2. COMPORTAMENTO GEOMÉTRICO	95
7.2.1. Imprecisão total de giro.....	95
7.2.2. Deslocamento axial	95
7.2.3. Estrutura dos ensaios	95
7.2.4. Resultados e Conclusões	96
8. ENSAIOS	98
8.1. INTRODUÇÃO	98
8.2. ESPECIFICAÇÃO DA FERRAMENTA.....	98
8.3. ESPECIFICAÇÃO DA PEÇA BRUTA.....	99
8.4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM.....	99
8.5. CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS	100
8.5.1. Critério acabamento superficial e qualidade do gume.....	100
8.5.2. Critério taxa de retificação (Z)	100
8.6. METODOLOGIA DE ENSAIOS.....	101

8.7. RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	102
8.7.1.Critério acabamento superficial e qualidade do gume.....	102
8.7.2.Critério taxa de retificação	106
9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	108
BIBLIOGRAFIA.....	111
ANEXO 1.....	116
ANEXO II.....	118

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1- Dimensões e código de cores de acordo com a <i>American Dental Association</i> , especificação número 28 (DDR 1981) [2; 5; 7].	7
TABELA 3.2 - Aços inoxidáveis pela metalurgia e classificações AISI e UNS [8].	13
TABELA 3.3 - Aços inoxidáveis martensíticos conforme classificação AISI [11].	14
TABELA 4.1 - Identificação de rebolos e outros abrasivos [15; 16; 17].....	22
TABELA 4.2 - Identificação de rebolos de diamante e CBN [15; 16].	22
TABELA 4.3 - Classificação do tamanho de grão conforme normas ASTM e FEPA	27
TABELA 4.4 - Especificação para a dureza do rebolo.....	28
TABELA 4.5 - Marcação das velocidades especiais em rebolos conforme normas } FEPA e ISO.....	30
TABELA 4.6 - Recomendações de fluidos para a retificação [22].....	34
TABELA 4.7 - Condições para a retificação de aços inoxidáveis [16].....	38
TABELA 4.8 - Granulometrias para várias produções de superfícies [16].....	38
TABELA 5.1 - Classificação das especificações de projeto.....	44
TABELA 5.2 - Três estruturas diferentes de movimentos necessários para a usinagem das limas.....	45
TABELA 5.3 - Matriz de análise dos materiais para base [24].	50
TABELA 5.4 - Matriz de análise dos mancais [32; 35].	59
TABELA 5.5 - Matriz de análise dos acionamentos.....	63
TABELA 5.6 - Matriz de análise dos acoplamentos.	68
TABELA 5.7 - Matriz de análise dos tipos de guias lineares.	72
TABELA 5.8 - Matriz de análise dos fusos.....	75
TABELA 5.9 - Matriz de análise dos sensores de posição	76
TABELA 5.10 - Matriz de análise dos sensores de fim de curso	77
TABELA 5.11 - Matriz de análise dos sistemas de fixação.	77
TABELA 5.12 - Matriz de análise dos comandos numéricos.....	78
TABELA 6.1 - Escolha dos elementos mais apropriados.	84
TABELA 8.1 - Taxas de retificação (Z) em mm ³ /s e taxas de retificação específicas (Z') em mm ³ /s.mm.	106
TABELA 8.2 - Percentual de volume removido em relação à matéria bruta	107

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Broca endodôntica em uso.	4
FIGURA 3.2 - Principais partes de um instrumento endodôntico: (A) cabo, (B) parte intermediária, (C) parte ativa e (D) guia de penetração.	5
FIGURA 3.3 - Cortes esquemáticos de vários instrumentos intracanáis: A (lima tipo “K”); B (alargadores e limas especiais de seção triangular); C (lima <i>K-Flex</i>); D (lima Hedström); e (lima <i>Unifile</i>) [5].....	6
FIGURA 3.4 - D_1 (diâmetro imaginário da guia de penetração); D_2 (diâmetro situado a 16 mm de D_1) e L (comprimento da parte ativa, igual a 16 mm) [6].	7
FIGURA 3.5 - Seção transversal de uma lima Hedström.	8
FIGURA 3.6 - Aspecto geral de uma lima Hedström.....	8
FIGURA 3.7 - Limas tipo Hm de várias marcas e modelos: A (da <i>Maillefer</i>); B (da <i>Schwed-Antaeos</i>); C (da <i>Kerr</i>); D (da <i>Pierce</i>); E (<i>Handy Set File da Endo Technic</i>); F (<i>Endo Technic</i> automatizada do sistema <i>Pathfinder</i>); G (<i>Unifile</i>) [4].....	9
FIGURA 3.8 - Extremidades das limas (porção direita das figuras).	9
FIGURA 3.9 - Porção média das lâminas dos instrumentos.....	10
FIGURA 3.10 - Porção final das lâminas dos instrumentos.	10
FIGURA 3.11 - Micrografias metalográficas de uma lima tipo “K”, de aço com estrutura martensítica: (A)x100, (B)x 200 e (C)x 500 [4].....	11
FIGURA 3.12 - Micrografias metalográficas de uma lima tipo “k”. (A)x100 e (B)x 200 e (C)x 500 [4].	12
FIGURA 3.13 - Comparação entre a usinabilidade de alguns metais. as porcentagens são baseadas em 100 % para o aço inoxidável de livre usinagem AISI 416 [8]. .	16
FIGURA 3.14 - Método de torção de lâminas.....	18
FIGURA 3.15 - Método de fabricação por usinagem, (a) vista frontal e (b) vista superior	18
FIGURA 3.16 - Desenho esquemático da lima <i>Flex-R</i>	18
FIGURA 3.17 - Acabamento da lâmina Hedström fabricada por retificação.....	19
FIGURA 4.1 - Processo de retificação.....	20
FIGURA 4.2 - Comparação da dureza entre diversos materiais abrasivos [15].	24
FIGURA 4.3 - Gráfico de rendimento do óxido de alumínio (linha verde), carboneto de silício (linha vermelha) e superabrasivos (diamante e CBN) (linha azul) [18].	25
FIGURA 4.4 - Vida do rebolo de CBN em relação a velocidade de corte.....	26
FIGURA 4.5 - Distribuição da energia durante o corte na retificação [15].....	33

FIGURA 4.6 - Avanço, profundidade de corte e comprimento de passe para (A) retificação convencional e (B) retificação <i>Creep-Feed</i>	36
FIGURA 4.7 - Efeito do passo de dressamento na rugosidade R_a [23].	39
FIGURA 4.8 - Rugosidade média R_a em dependência da velocidade de corte v_s [15].	39
FIGURA 5.1 - Fluxograma das etapas do projeto conceitual.....	41
FIGURA 5.2 - Função total da retificadora.....	46
FIGURA 5.3 - Primeiro desdobramento da Função Total.....	47
FIGURA 5.4 - Subsistema ferramenta, peça e meio mais detalhados	47
FIGURA 5.5 - Árvore de acionamento da FAG com mancais de rolamento [35].	52
FIGURA 5.6 - Tipos de mancais de rolamento [32].	52
FIGURA 5.7 - Configuração básica de uma árvore de acionamento com mancais eletromagnéticos [34].	53
FIGURA 5.8 - Classificação dos mancais hidrostáticos [35].	55
FIGURA 5.9 - Representação esquemática do princípio de formação de um filme fluido lubrificante em mancais hidrodinâmicos [34].	56
FIGURA 5.10 - Representação esquemática do corte da árvore de precisão com mancais hidrostáticos [37].	56
FIGURA 5.11 - Classificação de mancais aerostáticos.	57
FIGURA 5.12 - Representação esquemática do corte da árvore de acionamento da retificadora OAGM 2500 [30].	58
FIGURA 5.13 - Áturbina de reação à ar com mancais aerostáticos do LMP (a) e rotor de palhetas móveis (turbina de deslocamento positivo (b)).	63
FIGURA 5.14 - Deslocamentos	64
FIGURA 5.15 - Acoplamento de Foles [43].	64
FIGURA 5.16 - Acoplamento Helicoidal em Corte [44].	65
FIGURA 5.17 - Acoplamentos por Diafragma [30].	66
FIGURA 5.18 - Acoplamentos <i>Cardan</i> e <i>Hooke</i> [46].	67
FIGURA 5.19 - Acoplamentos <i>Hooke</i> ; (A) com elemento acoplador cilíndrico e (B) com elemento acoplador esférico [46].	67
FIGURA 5.20 - Movimentos	69
FIGURA 5.21 - Guias de escorregamento cilíndrica [47] e prismática [48].	70
FIGURA 5.22 - Guias de rolamento cilíndrica [47] e prismática [48].	71
FIGURA 5.23 - Guia de elementos rolantes prismática [48].	71
FIGURA 5.24 - Guia aerostática.	71
FIGURA 5.25 - Fuso de deslizamento simples [47].	73
FIGURA 5.26 - Fuso de esferas recirculantes [50].	74

FIGURA 5.27 - Pré-carga de tração e pré-carga de compressão [50].	74
FIGURA 5.28 - Função Parcial, Subsistema Ferramenta	79
FIGURA 5.29 - Função Parcial, Subsistema Peça	80
FIGURA 5.30 - Função Parcial, Subsistema Meio	81
FIGURA 5.31 - interrelação dos três Subsistemas (Peça, Ferramenta e Meio)	82
FIGURA 6.1 - Arranjo selecionado para o protótipo	83
FIGURA 6.2 - Protótipo	86
FIGURA 6.3 e 6.4 - Cabeçote retificador e mesa	86
FIGURA 6.5 - Pinça	87
FIGURA 6.6 - Sistema de fixação da peça	87
FIGURA 6.7 - Sistema de sujeição	88
FIGURA 6.8 - Vista frontal das sistema de sujeição	88
FIGURA 6.9 - Sistema de movimentação da peça	89
FIGURA 6.10 - Vista frontal do cabeçote retificador	90
FIGURA 6.11 - Rede de ar comprimido	91
FIGURA 7.1 - Representação esquemática da montagem do equipamento para medição das vibrações do cabeçote	93
FIGURA 7.2 - Comportamento das vibrações como função da rotação	94
FIGURA 7.3 - Classes de qualidade para balanceamento de rotores rígidos	94
FIGURA 7.4 - Ensaio de imprecisão total de giro	96
FIGURA 7.5 - Ensaio de deslocamento axial	96
FIGURA 8.1 - Dimensões do rebolo. Unidade (mm)	98
FIGURA 8.2 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 9; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ mm/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 65^\circ$)	102
FIGURA 8.3 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 9; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ mm/s, $v_p = 0,19$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 65^\circ$)	102
FIGURA 8.4 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 9; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ mm/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 60^\circ$)	103
FIGURA 8.5 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 9; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 44$ mm/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 60^\circ$)	103
FIGURA 8.6 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 9; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ mm/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,28$ mm, $\chi_r = 60^\circ$)	103

FIGURA 8.7 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 9; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ mm/s, $v_p = 0,19$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 60^\circ$).....	104
FIGURA 8.8 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 9; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 44$ mm/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 65^\circ$).....	104
FIGURA 8.9 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 9; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ mm/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,28$ mm, $\chi_r = 65^\circ$).....	104
FIGURA 8.10 - Micrografia eletrônica da seção longitudinal da peça ensaiada nº 13; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ mm/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,28$ mm, $\chi_r = 65^\circ$).....	105
FIGURA 8.11 - Micrografia eletrônica da seção longitudinal da peça ensaiada nº 13; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ mm/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,28$ mm, $\chi_r = 60^\circ$).....	105
FIGURA 8.12 - Regiões das taxas de retificação e condições dos ensaios.....	106
FIGURA 8.13 - Micrografia eletrônica da seção transversal da peça ensaiada: (A) diâmetro da peça bruta, (B) diâmetro da peça usinada.	106
FIGURA A1.1 - Matriz de relação entre clientes e suas necessidades.....	116
FIGURA A1.2 - Matriz de relação entre as necessidades dos clientes e os requisitos da retificadora, ou Casa da Qualidade.....	117
FIGURA A2.1 - Vista geral do protótipo.....	118
FIGURA A2.2 - Vista traseira do protótipo, mostrando o sistema controlador de ar.....	119
FIGURA A2.3 - Vista lateral do protótipo, mostrando o sistema de controle e movimentação da peça.....	119
FIGURA A2.4 - Vista detalhada evidenciando o processo.....	120
FIGURA A2.5 - Vista detalhada do processo.....	120

SIMBOLOGIA

símbolo	unidade	designação
a		eixo de rotação em X
a'	[mm]	deslocamento angular
a _p	[mm]	profundidade de corte
b		eixo de rotação em Y
c		eixo de rotação em Z
d	[mm]	diâmetro da peça
D ₁	[mm]	diâmetro imaginário da guia de penetração
D ₂	[mm]	diâmetro situado a 16 mm de D ₁
e	[mm]	deslocamento axial
e _m	[mm]	espessura máxima do cavaco
F		força genérica
K		constante
χ _r	[°]	ângulo de direção do gume
L	[mm]	comprimento da parte ativa
n	[rpm]	rotação
q		relação de velocidades
R _a	[μm]	desvio médio aritmético da rugosidade
s	[mm]	deslocamento transversal
t	[mm]	profundidade de passe
v	[m/s]	velocidade de desbalanceamento
V		velocidade genérica
v _p	[m/min]	velocidade da peça
v _r	[m/s]	velocidade do rebolo
V _{rem}	[mm ³]	volume removido na seção
v _s	[m/s]	velocidade de corte
V _{total}	[mm ³]	volume total da seção
W		rotação genérica
x		eixo de coordenada cartesiana

símbolo	unidade	designação
X_m	[mm]	deslocamento máximo amplitude da onda senoidal
y		eixo de coordenada cartesiana
z		eixo de coordenada cartesiana
Z	[mm ³ /s]	taxa de retificação
Z'	[mm ³ /mm.s]	taxa de retificação específica volume usinado específico
Z'_i	[mm ³ /mm.s]	taxa de retificação específica para a seção i
Z'_w	[mm ³ /mm]	volume usinado relativo
α	[°]	ângulo de incidência
β	[°]	ângulo de cunha
γ	[°]	ângulo de saída
ϕ	[°]	ângulo de hélice
\varnothing	[mm]	diâmetro
ω	[rad/s]	velocidade angular
θ	[°]	ângulo de inclinação do rebolo

RESUMO

Neste trabalho procurou-se desenvolver a tecnologia de fabricação de instrumentos endodônticos, mais precisamente das limas tipo Hedström, devido a duas razões principais:

1. Dentre os instrumentos usados para o tratamento dos canais radiculares, as limas permitem um bom preparo das paredes do canal dentro de uma segurança maior do que os demais instrumentos, sendo então muito utilizadas pelos dentistas;
2. Todas as limas consumidas no Brasil são importadas, apresentando uma importância econômica ao país.

Deste modo analisaram-se as características geométricas da lima Hedström, o material constituinte e as marcas de processo encontradas visando a reprodução dos movimentos necessários a sua confecção. Observou-se que a geometria desses instrumentos é cônica-helicoidal, de passo variável, o que requer o comando simultâneo de três eixos na máquina-ferramenta, somado à mais quatro eixos de posicionamento para a sua fabricação. Além do mais, a lima Hedström dispõe de apenas uma entrada e sofre uma substancial redução da seção transversal em relação à matéria bruta. Deste fato conclui-se sobre a necessidade de produzir-se o canal em apenas um passe, iniciando a retificação *creep-feed* pela ponta da lima e com avanço linear-rotativo controlado.

De posse de todas essas informações executou-se o projeto conceitual de uma máquina retificadora que pudesse produzir as limas.

Para justificar este projeto e para comprovar o processo de obtenção das limas sugerido, desenvolveu-se um protótipo da máquina-ferramenta com uma concepção mais simples, de baixo custo e com limitações na execução da geometria das limas, isto é, a fabricação da parte ativa da lima de forma cilíndrica e não cônica.

Mesmo com estas limitações, o protótipo demonstrou que o processo de retificação para obtenção das limas é adequado às pequenas dimensões da peça a ser fabricada, pois as peças ensaiadas apresentaram baixa rugosidade e uma formação do gume afiada homogênea, justificando o projeto conceitual da máquina retificadora e o processo de fabricação aqui desenvolvido.

ABSTRACT

In this work, the manufacturing technology of root canal instruments, mainly reamers Hedström has been developed, due to two main reasons:

1. Among the instruments used for root canal dilatation, the reamers allow for a good preparation of wall canals, providing greater safety than others instruments, being widely used among dentists;
2. Most of reamers used in Brazil are imported, showing an economic significance for the country.

Therefore the geometric characteristics of the Hedström reamers, the component material and the process signs found were fully analyzed, aiming at reproducing the required movements for its manufacturing. It has been noted that the geometry of these instruments is conic-helicoidal, of variable pitch, which requires three axes simultaneous control on machine tool, added to four extra indexing axes for its manufacturing. Besides, a Hedström reamer has just one entrance and undergoes a significant reduction in the cross section in relation to the raw material. This fact has proved the necessity for producing the canal using only one pitch, beginning the creep-feed grinding by the reamer tip, with controlled linear-rotating feed.

Once all this information was gathered, the conceptual design of a grinding machine that would allow for the manufacturing of reamers was carried out.

In order to justify this project and to prove the suggested process for obtaining the reamers, a functional model for the grinding machine was developed, with a simpler conception, low cost and certain limitations regarding the reamers geometry manufacturing, that is, the manufacturing of a conic-shaped reamer cutting part rather than a cylindrical one.

Even with these limitations, the functional model has shown that the process of grinding for the obtaining of reamers is suitable to the minimal dimensions of the workpiece to be manufactured, as the tested workpieces have shown low surface roughness and a homogeneous formation of their sharp edges, thus justifying the grinding machine conceptual design and the manufacturing process developed herein.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Sempre que te perguntarem se podes fazer um trabalho, responde que sim e te ponhas em seguida a aprender como se faz.

Franklin Delano Roosevelt (1882-1945).

O Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) do Departamento de Engenharia Mecânica, em conjunto com o Laboratório de Endodontia do Departamento de Odontologia, ambos da Universidade Federal de Santa Catarina, propuseram o desenvolvimento da tecnologia de fabricação de instrumentos endodônticos, ou melhor, limas e alargadores usados nos canais radiculares.

Nesta fase inicial coube ao Laboratório de Endodontia definir as ferramentas de maior interesse e dificuldade de obtenção, e ao Laboratório de Mecânica de Precisão definir a tecnologia de fabricação, a máquina-ferramenta, o material e, posteriormente, tratamentos térmicos, bem como a seqüência de operações.

Uma vez escolhido o instrumento endodôntico a ser fabricado, procurou-se entender as funções que este apresenta, de forma que a ferramenta tivesse o rendimento esperado. A geometria da ferramenta, denominada de lima Hedström, é cônica-helicoidal, de passo variável, o que requer o comando simultâneo de três eixos na máquina-ferramenta, somado a mais quatro eixos de posicionamento para a sua fabricação.

A análise da microgeometria das ferramentas mostrou que as limas endodônticas são fabricadas por retificação, definindo-se assim o processo a ser estudado.

Em decorrência das limitações de tempo e de recursos, este trabalho se restringe a verificar a viabilidade de fabricação das limas Hedström. Para tanto foram desenvolvidos estudos tanto do ponto de vista do objeto de estudo (limas, material, geometria, tratamentos superficiais, etc.) quanto à forma de fabricá-lo (cinemática, seqüência de operação, processo, etc.), assim como o desenvolvimento de um protótipo de acionamento simplificado, com apenas um eixo controlado, um eixo de avanço fixo e quatro eixos de posicionamento, permitindo apenas a confecção de limas cilíndricas, destinado à comprovação do processo empregado.

O *know-how* de fabricação das limas é de grande importância econômica para o país,

visto que hoje todas as limas consumidas no Brasil são importadas, observando-se ainda que o preço médio de uma caixa com um jogo de seis limas é de US\$ 20,00, onde a matéria-prima representa apenas entre 1 a 2 % deste valor.

Nos capítulos que seguem, são feitas duas abordagens: uma no sentido do estudo do objeto (limas Hedström) e a outra no desenvolvimento de um protótipo para a obtenção do produto. Estas abordagens foram executadas com embasamento no estado atual de tecnologia, ressaltando a fundamentação teórica e o desenvolvimento de tecnologia de fabricação em retificação de aços inoxidáveis.

Os tópicos mencionados são distribuídos da seguinte forma:

Capítulo 2: apresenta-se o objetivo do trabalho, para que se possa compreender as decisões tomadas ao longo das etapas desta dissertação.

Capítulo 3: procura-se realizar um estudo dos instrumentos endodônticos intracanaís, ressaltando as formas e dimensões das limas, o método de fabricação e os materiais das mesmas, e um estudo mais detalhado das limas tipo hedström.

Capítulo 4: comenta-se sobre a tecnologia de fabricação visando o processo de retificação de aços inoxidáveis, desde a seleção do rebolo até recomendações para a retificação destes aços.

Capítulo 5: preocupa-se com a fase do projeto da máquina retificadora, obtendo a casa da qualidade (QFD), a cinemática do processo de retificação, a estrutura de funções, um resumo do conhecimento atual sobre componentes para a máquina-ferramenta, mencionando bases, mancais, acionamentos, acoplamentos, guias e fusos e, finalmente, a solução encontrada.

Capítulo 6: apresenta-se o protótipo da máquina retificadora, desde sua concepção até o detalhamento dos sistemas constituintes.

Capítulo 7: realiza-se uma avaliação de desempenho do modelo funcional, levando em conta seu comportamento dinâmico e comportamento geométrico.

Capítulo 8: fazem-se os ensaios propriamente ditos, visando a obtenção do *know-how* de fabricação das limas. Descreve-se as especificações da ferramenta e da peça ensaiada, a metodologia e os critérios de avaliação utilizados, bem como os resultados encontrados.

Capítulo 9: apresentam-se conclusões finais sobre o trabalho, bem como uma seção dedicada para sugestões de novos trabalhos nesta área.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

Ao analisar a história evite ser profundo, porque freqüentemente as causas são superficiais.

Ralph Waldo Emerson (1803-1882).

Os objetivos desta dissertação são:

1. Verificar a viabilidade (problemáticas) da fabricação de instrumentos endodônticos, principalmente das limas para tratamento de canal Hedström.
2. Desenvolver o *know-how* da tecnologia de fabricação e assim a nacionalização desta tecnologia, que ainda não é dominada pelo Brasil;
3. Servir de base para futuros trabalhos de aprimoramento e de desenvolvimento de novos instrumentos endodônticos.

Para que estes objetivos possam ser alcançados será iniciado um trabalho de engenharia reversa baseado em instrumentos existentes, onde será dada ênfase à investigação do material utilizado e nas marcas de processo encontradas, a fim de que se possam reproduzir os movimentos necessários à confecção desses instrumentos.

Obtidos os requisitos básicos para a máquina que produzirá esses instrumentos endodônticos, parte-se para o projeto conceitual da mesma, finalizando com a confecção de um protótipo e sua qualificação.

CAPÍTULO 3

ESTADO DA ARTE

O talento consiste em saber analisar a semelhança das coisas que diferem entre si e a diferença entre coisas iguais.

Anne Louise Germaine de Staël (1766-1817).

3.1 A PEÇA

3.1.1 HISTÓRICO DOS INSTRUMENTOS ENDODÔNTICOS

Para a realização dos tratamentos de canais radiculares, há necessidade de se utilizar instrumentos capazes de cortar e remover a dentina, bem como outros materiais de seu interior. Visto tratar-se de um campo muito pequeno, cujas variações anatômicas são enormes, torna-se obrigatório a utilização de instrumentos especiais (Figura 3.1).

Os primeiros instrumentos de que se tem notícias foram descritos por Fouchard em 1746, que os confeccionou a partir de cordas de piano amolecidas, temperadas, cortadas em comprimentos adequados e montadas em cabos apropriados. Em 1838 Mynard usou molas de relógios, as quais eram limadas até atingirem um pequeno diâmetro e, então, usadas como brocas. Em 1852 Arthur descreveu a fabricação de sondas farpadas, visando a remoção do tecido pulpar. Todos estes instrumentos eram confeccionados pelo próprio dentista, fato que se estendeu até aproximadamente 1875, quando teve início a fabricação dos instrumentos em escala industrial.

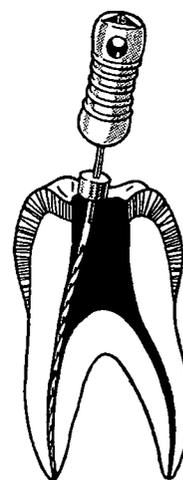


Figura 3.1 - Lima endodôntica em uso.

Já no século XX até 1955, os instrumentos tinham um acabamento cromado. Como este freqüentemente se destacava do instrumento, deixando-o rugoso, partiu-se para a fabricação em aço inoxidável, o que vem sendo feito até hoje. Atualmente já estão sendo comercializados instrumentos endodônticos em 012 ligas de titânio [1; 2].

3.1.2 GENERALIDADES

Dentre os instrumentos endodônticos usados para a dilatação dos canais radiculares, o preferido pelos endodontistas é a lima, cuja geometria permite um preparo da parede do canal radicular mais liso e dentro de uma segurança maior do que os outros instrumentos utilizados para a mesma finalidade [3].

Os instrumentos endodônticos são constituídos essencialmente de quatro partes principais, como mostrado na Figura 3.2: a) cabo; b) parte intermediária; c) parte ativa ou lâmina, (d) guia de penetração (extremidade da lâmina em forma cônica ou piramidal) [4].

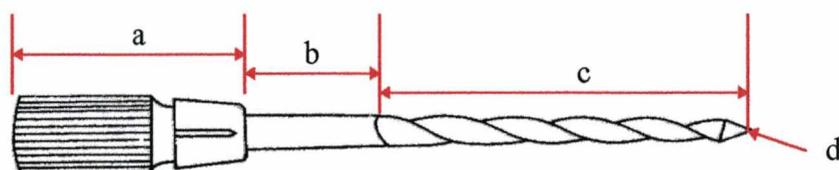


Figura 3.2 - Principais partes de um instrumento endodôntico: (a) cabo, (b) parte intermediária, (c) parte ativa e (d) guia de penetração [4].

- a) Cabo: forma cilíndrica, com a superfície lateral estriada longitudinalmente, permite melhor manuseio do instrumento. Pode ser de plástico ou metálico, fixo ou móvel, sendo que os de plástico apresentam-se com forma anatômica para as pontas dos dedos, o que permite ao profissional trabalhos mais prolongados sem fadiga. O calibre da parte ativa do instrumento está identificado no cabo, através de números, sulcos transversais ou colorações convencionadas;
- b) Parte intermediária: parte do instrumento que une o cabo à parte ativa, conferindo maior ou menor comprimento ao instrumento;
- c) Parte ativa: parte mais importante do instrumento, pois é a que age no interior do canal, tendo a função de desgastar tecidos duros e remover os moles. A parte ativa é constituída por uma haste cônica que pode ter seção transversal circular, triangular, quadrada ou em forma de vírgula (Figura 3.3). No primeiro caso, pode se apresentar lisa ou com farpas e, nas demais, torcida, apresentando espiras cujo comprimento e forma determinam a característica do instrumento. Esta parte apresenta um diâmetro de corte transversal que corresponde a um círculo descrito pelo giro em torno de seu próprio eixo;
- d) Guia de penetração: extremidade em forma cônica ou piramidal da haste. Dependendo dela ter base circular ou pontiaguda, arredondada ou rômbrica, ser longa ou curta, o instrumento

apresenta maior ou menor poder de perfuração ou de deslizamento [4].

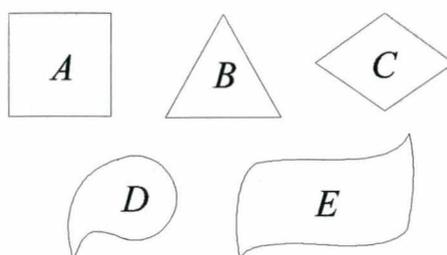


Figura 3.3 - Representação esquemática de seções transversais de vários instrumentos intracanalares: A (lima tipo “K”); B (alargadores e limas especiais de seção triangular); C (lima *K-Flex*); D (lima Hedström); E (lima *Unifile*) [5].

3.1.3 PADRONIZAÇÃO

Em 1958 Ingle e LeVine apresentaram uma proposta para a uniformização dos instrumentos, equipamentos e materiais de obturação endodônticos. Esta proposta, que incluía sugestões feitas por Green (1957), foi aceita e mais tarde modificada e usada como base para padronizações internacionais (ISO nº 3630, ANSI/ADA nº 28 e nº 58, DIN nº 13961 e nº 13962) [6; 7; 8;]:

- instrumentos de mesmo número têm o mesmo calibre e conicidade, independente da característica e fabricação do instrumento;
- os instrumentos são numerados de tal forma que cada número, ao ser multiplicado por 10, corresponda, em micrometros, à projeção do diâmetro de corte na base da guia de penetração do instrumento (D_1) (Figura 3.4);
- a medida do diâmetro D_1 deve ser tomada em um ponto distante a 1 mm da ponta terminal da guia de penetração;
- o aumento de calibre na seqüência dos instrumentos é de 50 μm do instrumento número 10 até o 60, e de 100 μm deste até o 140;
- a distância entre a base da guia de penetração (D_1) e o intermediário (D_2) é sempre $16 \pm 0,5$ mm (L), ver Figura 3.4;
- o diâmetro da parte ativa junto ao intermediário (D_2) é de 320 μm maior que o diâmetro da base da guia de penetração. Isto quer dizer que a conicidade do instrumento é de 0,02 mm/mm.
- o cone ou guia de penetração deve ter um vértice em ângulo de $75 \pm 15^\circ$;

- a haste do instrumento (parte intermediária) deve ter comprimentos variáveis entre 17, 19, 21, 23, 25, 28 e 31 mm;
- o diâmetro do instrumento entre a última espiral e o cabo (intermediário) não deve ser muito acentuada para evitar interferência deste contra as paredes da cavidade de acesso ao canal;
- o cabo do instrumento deve ter 11 mm de comprimento e diâmetro de $3,5 \pm 1$ mm.

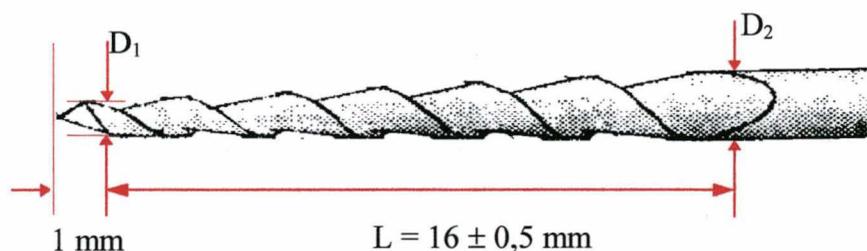


Figura 3.4 - D_1 (diâmetro imaginário da guia de penetração); D_2 (diâmetro situado a 16 mm de D_1) e L (comprimento da parte ativa, igual a 16 mm) [6].

A numeração dos instrumentos padronizados é representada por colorações do cabo, como mostrado na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Dimensões e código de cores de acordo com a *American Dental Association*, especificação número 28 (DDR 1981) [2; 5; 7].

Séries	Cor	Tamanho	Dimensão $D_1 \pm 0,020$ mm	Dimensão $D_2 \pm 0,020$ mm
especiais	rosa	06	0,060	0,380
	prateado	08	0,080	0,400
	violeta	10	0,100	0,420
série 1	branco	15	0,150	0,470
	amarelo	20	0,200	0,520
	vermelho	25	0,250	0,570
	azul	30	0,300	0,620
	verde	35	0,350	0,670
	preto	40	0,400	0,720
série 2	branco	45	0,450	0,770
	amarelo	50	0,500	0,820
	vermelho	55	0,550	0,870
	azul	60	0,600	0,920
	verde	70	0,700	1,020
série 3	preto	80	0,800	1,120
	branco	90	0,900	1,220
	amarelo	100	1,000	1,320
	vermelho	110	1,100	1,420
	azul	120	1,200	1,520
	verde	130	1,300	1,620
	preto	140	1,400	1,720

3.1.4 LIMAS HEDSTRÖEM

Este instrumento, fabricado por usinagem ou por torção, é constituído de uma haste de seção transversal, em forma de vírgula (Figura 3.5), apresentando forma de hélices espiraladas, a qual lhe dá a aparência toda particular de ser composta por pequenos cones com a base voltada para o cabo e sobrepostos um ao outro (Figura 3.6). Esta hélice, inclinada cerca de 60° em relação ao eixo do instrumento, transforma-se numa lâmina muito delgada e orientada para o sentido do cabo. Ela se prolonga até a guia de penetração, a qual se apresenta como um cone bem nítido [3].

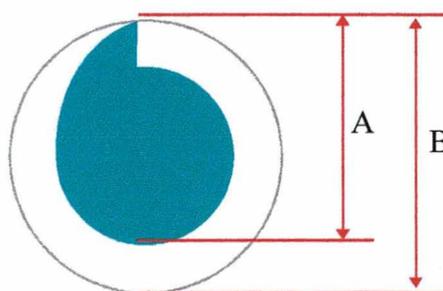


Figura 3.5 - Seção transversal de uma lima Hedström [3].

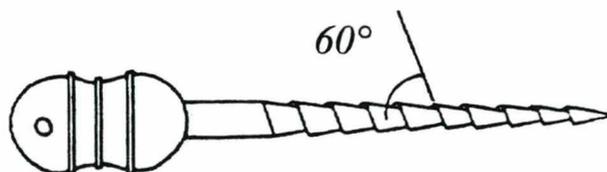


Figura 3.6 - Aspecto geral de uma lima Hedström [3].

Estas características conferem ao instrumento grande poder de corte quando lhe são aplicados movimentos no sentido axial, sendo, contudo, nula sua capacidade perfurante. Assim, as limas Hedström são instrumentos raspadores por excelência, e não perfuradores. Outrossim, se durante sua utilização aplicam-se movimentos de rotação horários, o diâmetro de corte (B) será muito maior que o seu maior eixo da seção transversal (A) (Figura 3.5). Assim, o instrumento tende a cortar uma quantidade de dentina muito grande em relação ao seu corpo, e pode não resistir a tal esforço, fraturando-se. Além disso, a guia de penetração, não sendo cortante, pode ajustar-se ao canal e, juntamente com a espiral cravada na dentina, travar o instrumento [3].

Como ressalva, as limas Hedström só devem ser utilizadas com o movimento de limagem, onde a dentina é removida através de movimentos axiais, e assim mesmo quando

apresentarem certa folga no interior do canal [3].

As limas, “raspadores” e “alisadores” de grande rendimento são instrumentos que rapidamente ampliam o canal e compensam suas curvaturas. São excelentes para preparar os canais de seção transversal elipsóide, achatada ou oitóide, tomando-se cuidado para que trabalhem sempre sobre duas paredes pelo menos, para não formar um sulco [3].

A Figura 3.7 mostra, esquematicamente, detalhes da guia de penetração e da parte ativa de várias marcas e modelos de limas do tipo H, que são variações das limas Hedström.

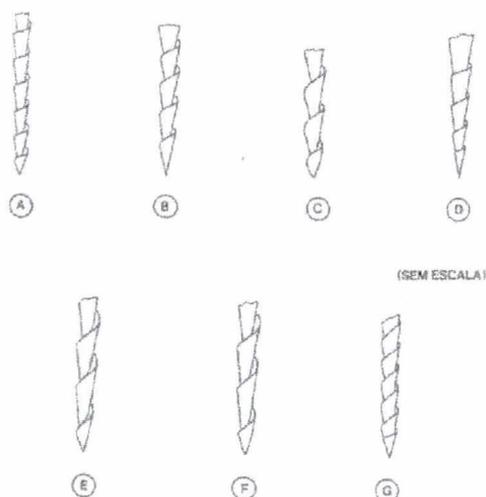


Figura 3.7 - Limas tipo H de várias marcas e modelos: A (da *Maillefer*); B (da *Schwed-Antaeos*); C (da *Kerr*); D (da *Pierce*); E (*Handy SET File* da *Endo Technic*); F (*Endo Technic*, automatizada do sistema *Pathfinder*); G (*Unifile*) [4].

As Figura 3.8, 3.9 e 3.10, obtidas com o microscópio eletrônico de varredura, ilustram aspectos de duas limas Hedström de diferentes tamanhos da segunda série: A (45) e B (70).

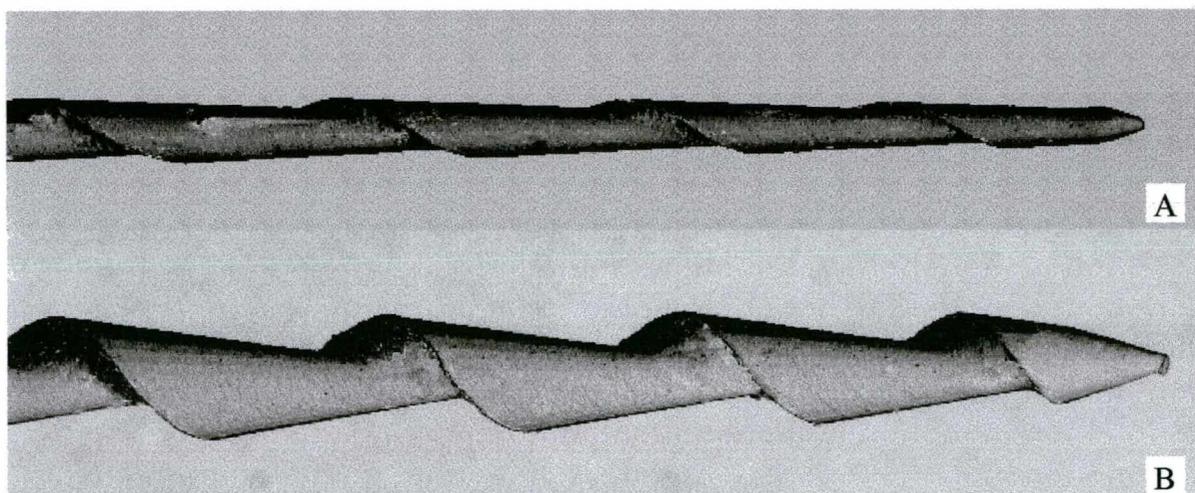


Figura 3.8 - Extremidades das limas (porção direita das figuras).

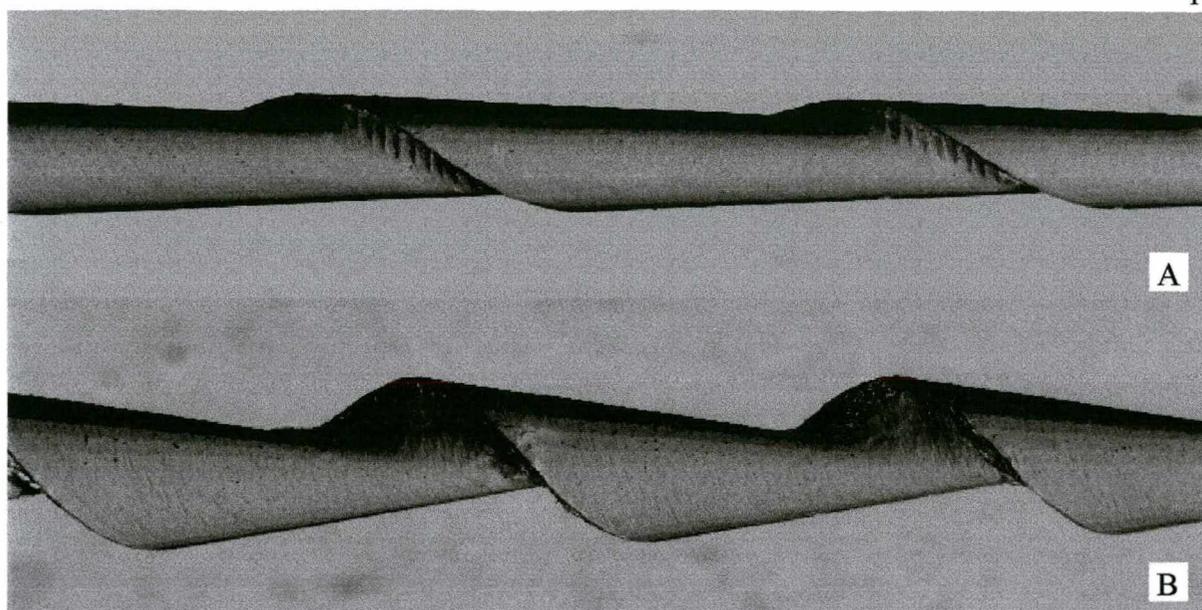


Figura 3.9 - Porção média das lâminas dos instrumentos.

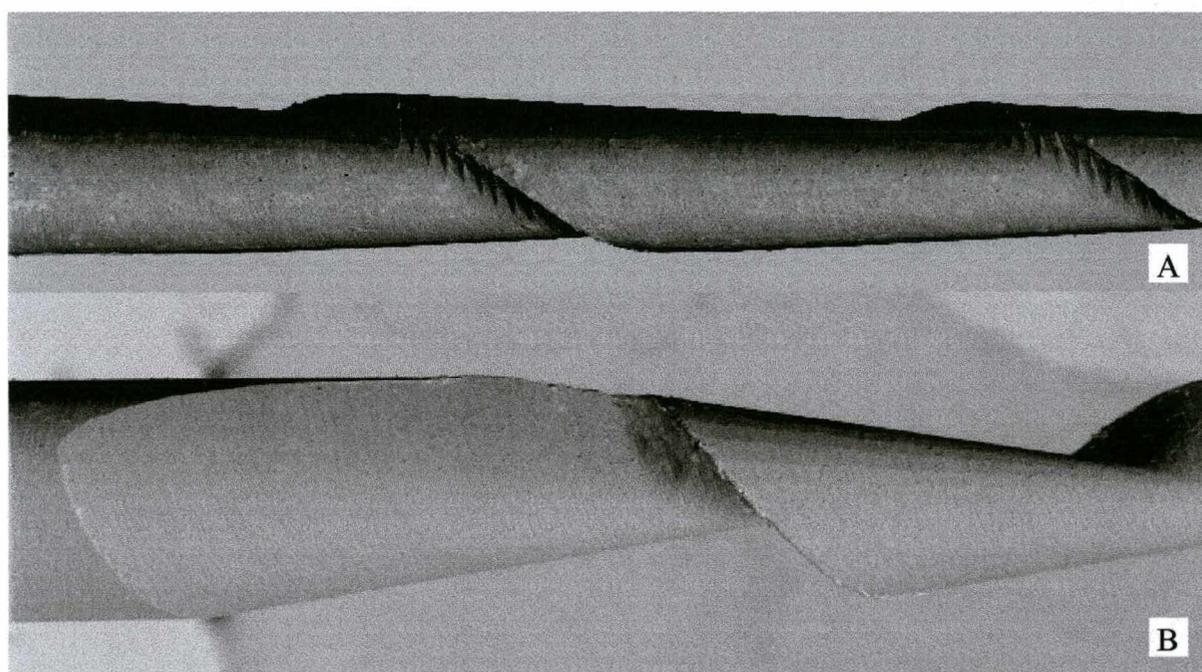


Figura 3.10 - Porção final das lâminas dos instrumentos.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DAS LIMAS

As limas são fabricadas a partir de uma haste de aço carbono ou de aço inoxidável e a grande maioria apresenta uma estrutura martensítica (Figura 3.11), apesar de haver variações no tipo de liga fabricada (Figura 3.12). Partindo de materiais de várias procedências para a

confeção dos instrumentos, usando técnicas diversas de fabricação e métodos de têmpera diversos, obtêm-se instrumentos semelhantes quanto à forma e tamanho, porém concordantemente diferentes, quanto à flexibilidade, eficiência e durabilidade [4; 9].

A flexibilidade dos instrumentos é inversamente proporcional ao seu calibre. Assim, instrumentos mais finos são mais flexíveis e, portanto, permitem acompanhar melhor a geometria dos canais. Por outro lado, distorcem ou se fraturam com mais facilidade do que os mais grossos [3].

A Figura 3.11 mostra micrografias metalográficas de limas para canal radicular, do tipo K, com uma estrutura martensítica.

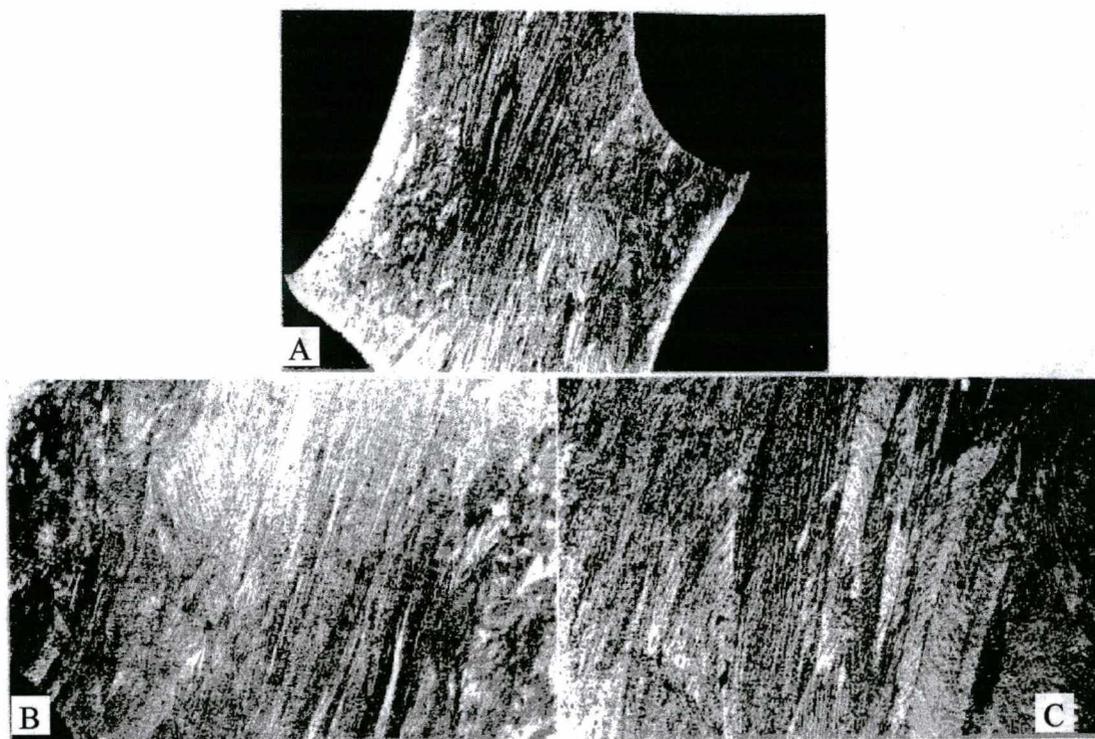


Figura 3.11 - Micrografias metalográficas de uma lima tipo K, de aço com estrutura martensítica: (A)x100, (B)x 200 e (C)x 500 [4].

A Figura 3.12 mostra micrografias metalográficas de uma lima tipo K de um aço não identificado, apresentando uma superfície externa bem irregular, com arredondamento dos gumes. A superfície irregular propicia a concentração de tensões facilitando a sua ruptura quando em funcionamento. Em (C), com ampliações de 500 vezes, verifica-se que há diferenças no tipo de liga, comparando-a com a lima mostrada na Figura 3.11 [4].

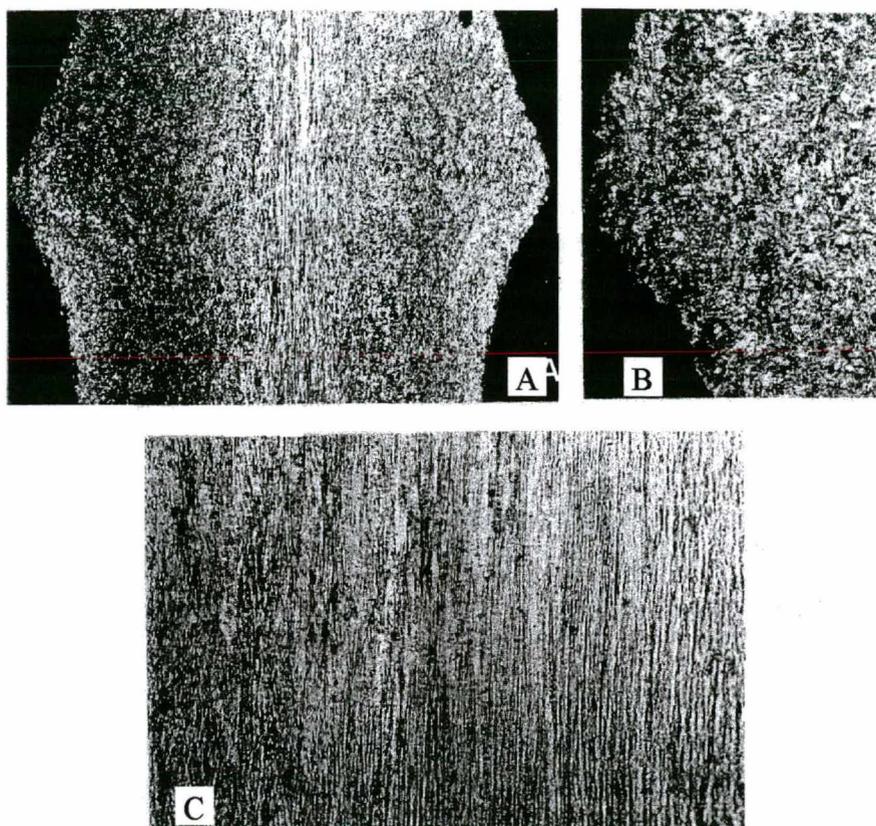


Figura 3.12 - Micrografias metalográficas de uma lima tipo K. (A)x100 e (B)x 200 e (C)x 500 [4].

3.2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Aços inoxidáveis são ligas a base de ferro contendo no mínimo 10% de cromo para lhe conferir a resistência à corrosão. Outros elementos de liga como níquel, molibdênio, nióbio ou titânio podem ser adicionados para mudar ou melhorar certas propriedades ou características do aço [8].

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Muitos métodos são usados para identificar os aços inoxidáveis. O mais comum é de acordo com sua estrutura metalúrgica, que se divide em quatro grupos: martensíticos, ferríticos, austeníticos e endurecíveis por precipitação. Podem ainda serem classificados pelo sistema numérico AISI (séries 200, 300 etc.) e pelo *Unifield Numbering System*, como ASTM e SAE, desenvolvidos para aplicações em todos os metais e ligas comerciais [8; 10].

A Tabela 3.2 lista os principais aços inoxidáveis da classificação pela estrutura AISI e

com classificação UNS correspondente.

Tabela 3.2 - Aços inoxidáveis pela metalurgia e classificações AISI e UNS [8].

AISI	UNS	AISI	UNS	AISI	UNS
AUSTENÍTICO					
201	S20100	304N	S30451	317	S31700
202	S20200	305	S30500	317L	S31703
205	S20500	308	S30800	321	S32100
301	S30100	309	S30900	321H	S32109
302	S30200	309S	S30908	329	S32900
302B	S30215	310	S31000	330	S33000
303	S30300	310S	S31008	332	S33200
303Se	S30323	316	S31600	334	S33400
304	S30400	316H	S31609	347	S34700
304H	S30409	316F	S31620	347H	S34709
304L	S30403	316L	S31603	348	S34800
304Cu	S30430	316LN	S31652	348H	S34809
304LN	S30453	316N	S31651	384	S38400
FERRÍTICOS					
405	S40500	430F	S43020	439	S43900
409	S40900	431	S43100	442	S44200
429	S42900	434	S43400	444	S44400
430	S43000	436	S43600	446	S44600
MARTENSÍTICOS					
403	S40300	416	S41600	440 ^A	S440002
410	S41000	420	S42000	440B	S440003
410S	S41008	420F	S42020	440C	S440004
414	S41400	422	S42200		
ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO					
S13800	S13800	S17400	S17400		
S15500	S15500	S17700	S17700		

Os aços inoxidáveis mais importantes para a fabricação de ferramentas endodônticas são os martensíticos. Por isso, a seguir, dar-se-á uma maior ênfase aos mesmos.

3.2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS.

Os aços inoxidáveis martensíticos caracterizam-se por serem aços-cromo, contendo entre 11,5 e 18,0 % de cromo, com ou sem níquel. Tornam-se martensíticos pela têmpera [11].

Estes aços, quando aquecidos acima de sua temperatura crítica (870 °C) e resfriados rapidamente, apresentam uma estrutura metalúrgica denominada de martensita. Na condição temperada, o aço possui alta resistência e dureza, mas para obter ótima resistência à corrosão, ductilidade e resistência ao impacto, faz-se um alívio de tensões ou um revenimento, usualmente na faixa de temperatura entre 150 e 370 °C [8].

Dentro desse grupo podem ser ainda consideradas três classes [8; 11]:

- baixo carbono, também chamado tipo “turbina”, possui dureza máxima de 45 HRC;

- médio carbono, também chamado tipo “cutelaria”;
- alto carbono, também chamado tipo “resistente ao desgaste”, possui dureza máxima de 60 HRC.

Esses aços estão todos incluídos na classificação AISI que considera os tipos indicados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Aços inoxidáveis martensíticos conforme classificação AISI [11].

Tipo AISI	C	Mn máx.	P máx.	S máx.	Si máx.	Cr	Ni	Mo	Outros
403, 410	0,15 máx.	1,00	0,04	0,03	0,50	11,5/13,0	--	--	--
414	0,15 máx.	1,00	0,04	0,03	1,00	11,5/13,5	1,25/2,50	--	--
416	0,15 máx.	1,25	0,06	0,15 mín.	1,00	12,0/14,0	--	0,60 máx.	--
420	0,15 máx.	1,25	0,06	0,06	1,00	12,0/14,0	--	--	Se = 0,15 mín.
420	0,16/0,25	1,00	0,04	0,03	1,00	12,0/14,0	1,00 máx	--	--
420	0,26/0,35	1,00	0,04	0,03	1,00	12,0/14,0	1,00 máx	--	--
420	0,36/0,45	1,00	0,04	0,03	1,00	12,5/14,5	1,00 máx	--	--
420 F	0,15 máx.	1,25	0,06	0,15 mín.	1,00	12,0/14,0	--	0,60 máx.	--
422	0,20/0,25	1,00	0,0025	0,0025	0,75	11,0/13,0	0,50/1,00	0,75/1,25	0,15/0,30 V; 0,75/1,25 W
431	0,20 máx.	1,00	0,04	0,03	1,00	15,0/17,0	1,00/1,25	--	--
440 A	0,60/0,75	1,00	0,04	0,03	1,00	16,0/18,0	--	0,75 máx.	--
440 B	0,75/0,95	1,00	0,04	0,03	1,00	16,0/18,0	--	--	--
440 C	0,95/1,20	1,00	0,04	0,03	1,00	16,0/18,0	--	--	--

As características mais importantes desses aços são as seguintes [11]:

- são ferromagnéticos;
- podem ser facilmente trabalhados, tanto a quente como a frio, sobretudo quando o teor de carbono for baixo;
- apresentam boa resistência à corrosão quando expostos ao tempo, à ação da água e de certas substâncias químicas;
- o níquel melhora a sua resistência à corrosão;
- a têmpera melhora a resistência à corrosão e contribui para evitar a precipitação de carbonetos.

PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

- Tipos 403 e 410: pelo baixo carbono são fáceis de conformar a frio no estado recozido; são empregados em palhetas forjadas ou usinadas de turbina e compressores, tesouras, canos de fuzis, componentes de micrômetros e instrumentos de medida, componentes para a indústria petroquímica, etc.;

- Tipos 420: pela alta dureza e razoável tenacidade que adquirem após adequado tratamento térmico, são empregados em cutelaria, instrumentos cirúrgicos, eixos de bombas, válvulas, peças de motores a jato, mancais de esferas, parafusos, buchas, etc.;
- Tipos 414 e 431: pela alta dureza e resistência mecânica, são empregados em molas, parafusos e porcas, peças para bombas, peças para aviões, eixos de hélices marítimas, peças para fornos, componentes para a indústria petroquímica, etc.. O tipo 431 é o de melhor resistência à corrosão entre os aços inoxidáveis martensíticos;
- Tipos 416, 416Se e 420F: por serem de usinagem fácil, adaptam-se facilmente a operações de usinagem, sendo empregados em parafusos, porcas, hastes de válvulas, lâminas de turbina, cutelaria, etc.. O tipo 416 oferece a melhor usinabilidade;
- Grupo de alto carbono estão os tipos 440A, 440B e 440C: devido ao alto teor de carbono, possuem alta resistência ao desgaste, por isso são empregados em instrumentos cirúrgicos e odontológicos, mancais de esferas, válvulas, bocais e outras aplicações em que, além da resistência à corrosão, sejam exigidas altas dureza e resistência ao desgaste [8; 11].

USINABILIDADE

A usinabilidade é uma característica apresentada por um par material da peça/material da ferramenta, definida para cada processo de usinagem. Não existe uma forma prática de definir a usinabilidade, partindo-se apenas das características mecânicas e físicas de um material. Mesmo assim, é possível estabelecer a usinabilidade sabendo-se das seguintes informações:

- vida da ferramenta ou desgaste;
- acabamento da superfície usinada;
- tipos de cavacos formados;
- forças de usinagem e suas componentes;
- temperatura na região de corte.

A cada uma destas informações é dada uma certa importância. Dependendo do processo, ou até da aplicação, os critérios podem ter níveis de importância distintos, de forma que também a avaliação da usinabilidade é variável. Além disto, os diversos critérios são interdependentes.

Por causa dos diferentes critérios de usinabilidade e pelas muitas variáveis influentes

sobre o processo de usinagem, a usinabilidade deve ser analisada com cautela. Os resultados obtidos em ensaios de usinabilidade podem ser afetados por diversos fatores, correlacionados ao processo e ao material da peça:

- rigidez da ferramenta e fixação;
- material e geometria da ferramenta;
- tipo de fluido de corte;
- tipo de operação de usinagem;
- dureza e distribuição da dureza na peça;
- microestrutura e distribuição da microestrutura;
- inclusões (carbonetos, óxidos, etc.) [13; 14].

A usinabilidade dos aços inoxidáveis é substancialmente diferente dos aços carbono ou aço liga e outros materiais, como mostra a Figura 3.13.

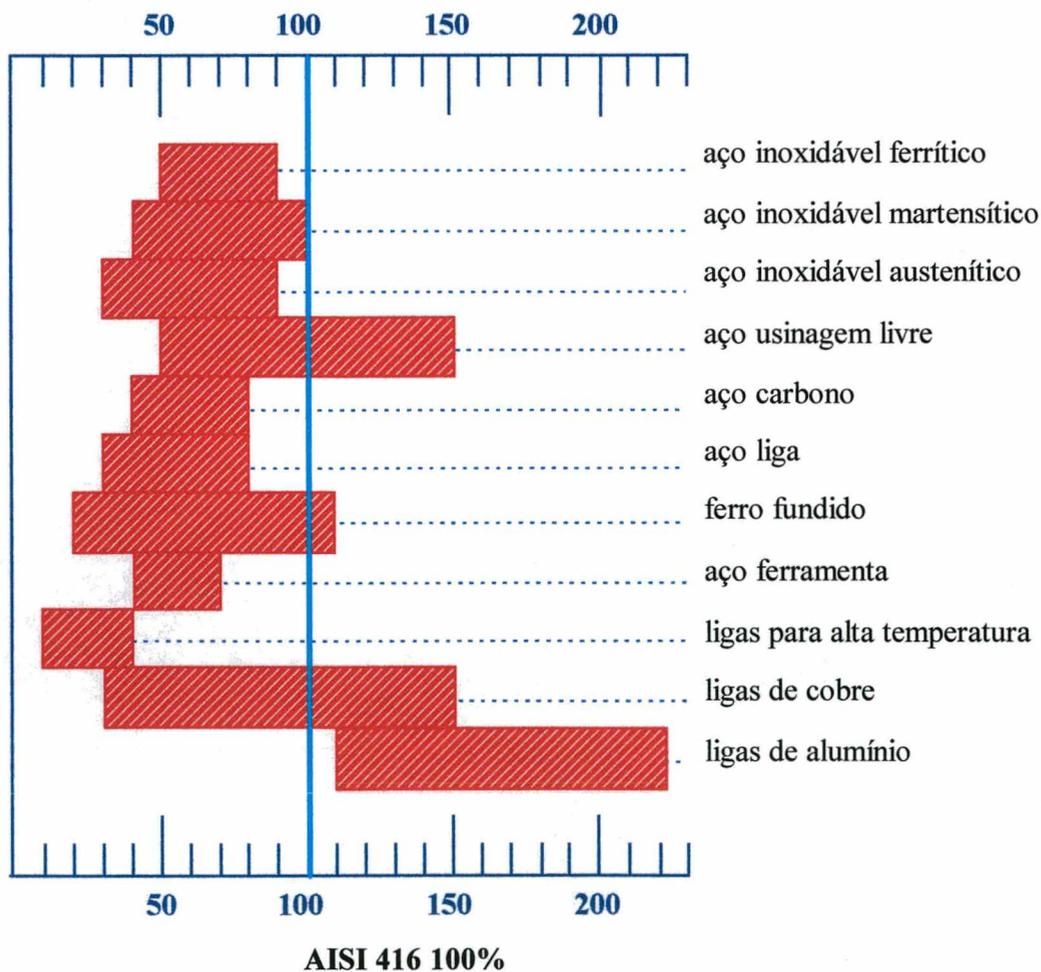


Figura 3.13 - Comparação entre a usinabilidade de alguns metais. As porcentagens são baseadas em 100 % para o aço inoxidável de livre usinagem AISI 416 [8].

Os aços inoxidáveis da série 400 são de fácil usinagem, mas produzem um cavaco longo que pode diminuir a produtividade. Os tipos 410 e 416 são os mais fáceis de usinar, e o tipo 440 o mais difícil, porque o alto teor de carbono propicia inclusões de carbonetos aumentando a abrasividade. As séries 200 e 300 são caracterizadas como sendo as mais difíceis de usinar, devido ao empastamento e também pela tendência de endurecimento por deformação [8; 10].

Certos elementos de liga nos aços inoxidáveis como enxofre, selênio, cobre, alumínio, chumbo ou fósforo, podem ser adicionados ou ajustados durante a fundição para alterar as características de usinagem. Eles servem para reduzir o atrito entre a peça e a ferramenta, minimizando a tendência do cavaco soldar na ferramenta. Também as inclusões de enxofre reduzem a força de atrito e a ductilidade dos cavacos, causando uma quebra mais fácil [8].

No estado recozido, os aços inoxidáveis martensíticos podem ser usinados mais facilmente do que os aços inoxidáveis austeníticos, mas são mais difíceis de serem usinados que os ferríticos. Em níveis altos de dureza a retificabilidade é reduzida, pois as altas pressões na retificação dos aços martensíticos podem criar zonas martensíticas destemperadas e zonas martensíticas supertemperadas e, assim, limitar a resistência à fadiga [10].

3.3 FABRICAÇÃO DAS LIMAS HEDSTRÖEM

Existem basicamente dois métodos para a fabricação dos instrumentos endodônticos, utilizados no tratamento de canais radiculares: o método da torção de lâminas prismáticas e o método de fabricação por usinagem. Estes dois métodos são guardados pelas empresas fabricantes de limas “a sete chaves”, sendo muito difícil alguma referência nesta área que possa ser apresentada. O método de fabricação por usinagem é ainda mais difícil, por isto o processo aqui descrito foi idealizado e depois desenvolvido pelos autores deste trabalho.

O método da torção de lâminas prismáticas (Figura 3.14) como o próprio nome diz, consiste em torcer uma haste cônica de seção triangular, quadrada, losangular ou em forma de vírgula (Figura 3.3) até que esta apresente espiras, ao longo da parte ativa, com passo de aproximadamente de 1 mm nos diâmetros mais finos e 2,5 mm nos mais grossos.

Estas espiras formam os gumes afiados e dispostos de forma inclinada com um certo ângulo em relação ao eixo do instrumento. Entre os gumes de forma espiral se formam sulcos que são zonas de apreensão de material.

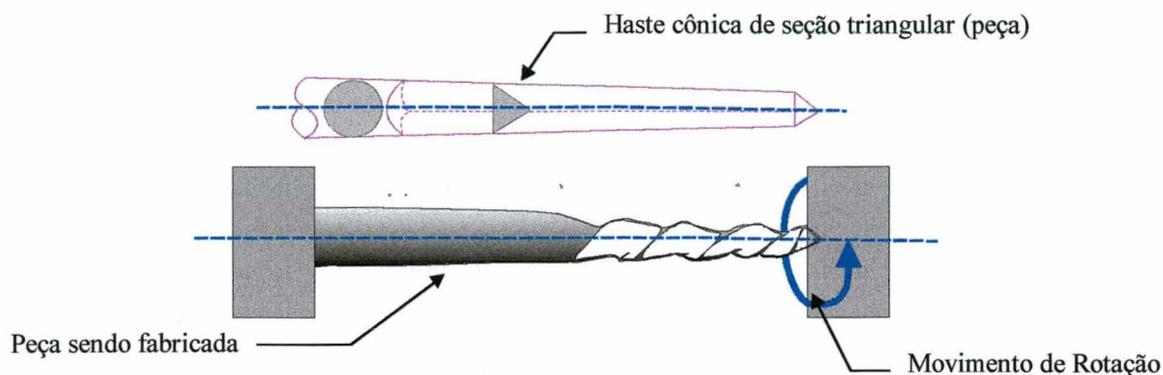


Figura 3.14 - Método de torção de lâminas.

O método de fabricação por usinagem (Figura 3.15) se constitui principalmente na retificação de uma haste de seção circular para a obtenção das espiras. Dependendo do perfil do rebolo, pode-se obter diferentes seções dos instrumentos.

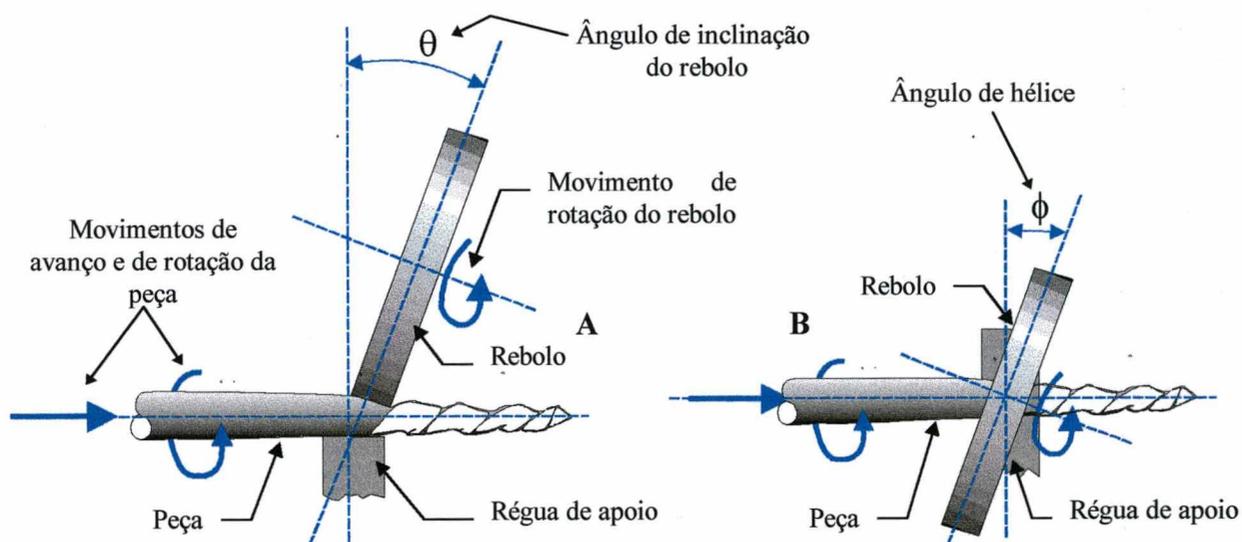


Figura 3.15 - Método de fabricação por usinagem; (A) vista frontal e (B) vista superior.

A Figura 3.16 mostra esquematicamente uma lima *Flex-R*, seção triangular, da *Union Broach*, USA, fabricada por usinagem e desenvolvida por *Roane* [4].



Figura 3.16 - Desenho esquemático da lima *Flex-R*.

Na escolha do processo de fabricação e da ferramenta de corte, a usinabilidade deve ser levada em consideração de forma individual para cada tipo de componente a ser fabricado.

A usinagem dos aços inoxidáveis apresenta algumas particularidades com relação aos aços ao carbono. Devido à menor condutividade térmica e à maior resistência mecânica, a temperatura no corte é mais elevada. Isto requer o uso de ferramentas resistentes às elevadas temperaturas. A diminuição do esforço sobre a ferramenta e a peça durante a usinagem, fundamental na fabricação de componentes de pequenas dimensões, só é possível pela diminuição da seção de usinagem momentânea. A manutenção da produtividade só poderá ser garantida aumentando-se a velocidade de corte. O processo de retificação conjuga estas características, sendo escolhido para a fabricação das ferramentas Hedström.

A Figura 3.17 mostra, em micrografia eletrônica, detalhes de uma lâmina da lima Hedström. Através de uma análise desta micrografia percebe-se uma superfície com ranhuras paralelas irregulares, além de sinais de vibração. Isto leva-se a concluir que o processo utilizado para a obtenção dessa lima foi o de retificação.

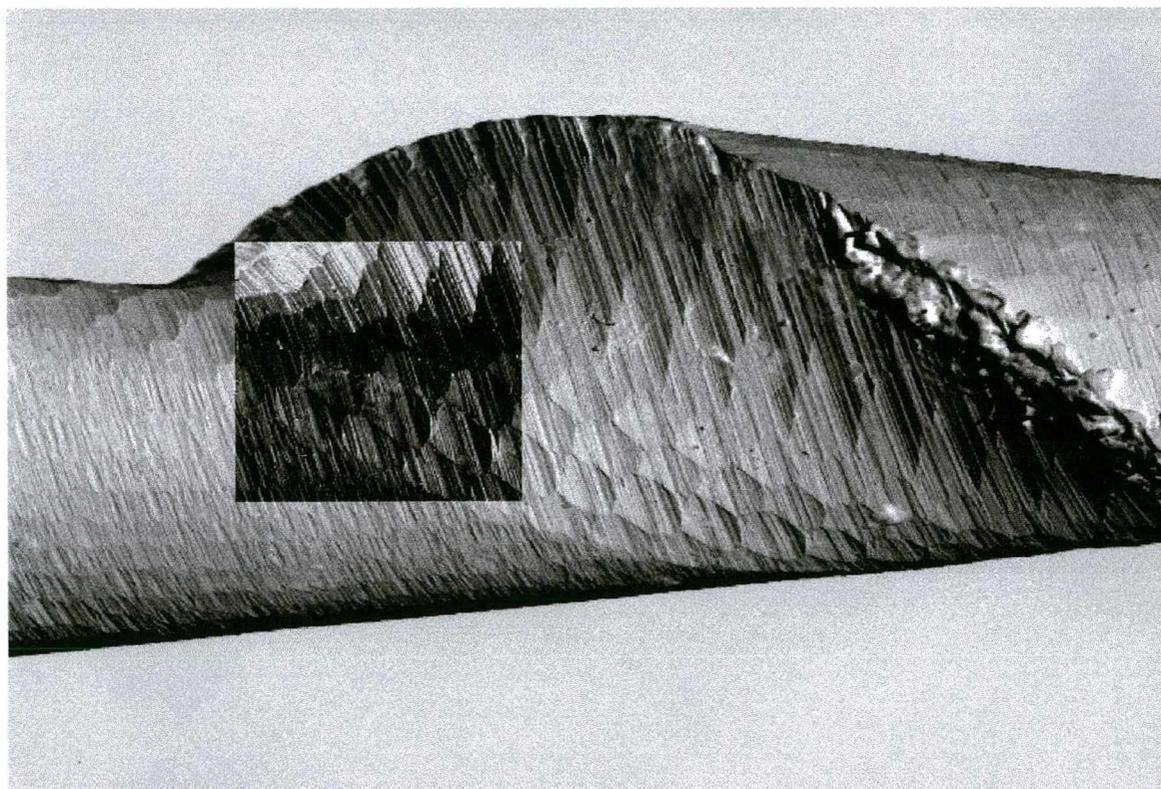


Figura 3.17 - Acabamento da lâmina Hedström fabricada por retificação.

CAPÍTULO 4

O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Se não posso desenhá-lo, é porque não o entendo.

Albert Einstein (1879-1955).

4.1 INTRODUÇÃO

A área de aplicação da retificação é muito grande, assim como é grande a variedade de processos aplicados na prática, pois são muitas as formas de estruturar o processo. Isso gera uma difícil tarefa para o engenheiro, escolher o processo e o transcurso do processo, de tal forma que o trabalho não leve só ao resultado desejado, mas ao mesmo tempo da forma mais econômica possível [15].

A retificação de precisão de peças forjadas, fundidas, barras, tubos, e outros produtos conformados feitos de aço inoxidável, superligas e titânio, é um dos trabalhos mais difíceis na indústria. Todos os parâmetros do sistema inteiro de retificação (máquina, abrasivo, dressamento e fluido de retificação) devem ser cuidadosamente selecionados e controlados para o trabalho ser executado com a máxima eficiência [10].

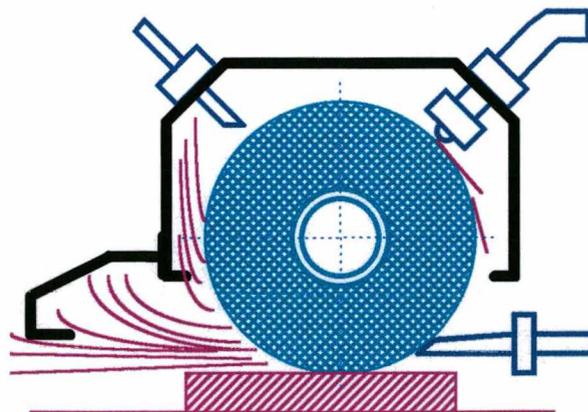


Figura 4.1 - Processo de retificação.

A maioria desses materiais são duros e resistentes à abrasão. Muitos têm baixa condutividade térmica e, assim, a maior resistência mecânica dos aços inoxidáveis martensíticos combinado com o encruamento da raiz do cavaco leva a um maior desgaste das ferramentas de corte, limitando a taxa de retificação.

Os cavacos tendem a empastar e preencher os poros dos rebolos exigindo freqüentes recondiçõamentos do mesmo. Uma otimização do processo só pode ser obtida pela escolha correta da ferramenta. Também as pressões de contato podem ser elevadas e, em combinação com as elevadas velocidades de corte empregadas, pode-se ter um superaquecimento, contribuindo para um possível dano térmico na peça.

A maior resistência e a alta taxa de encruamento de muitos desses materiais freqüentemente aumentam a potência necessária para a remoção do cavaco, causando maior desgaste do abrasivo. Se a potência disponível na máquina não for suficiente, é preciso mais tempo para a retificação, e a produtividade é, portanto, diminuída [10].

4.2 SELEÇÃO DO REBOLO

Certos cuidados devem ser tomados na seleção do rebole e do abrasivo para obter as tolerâncias e o acabamento desejados sem danificar a peça [16].

Os principais fatores a serem considerados na seleção do rebole para a retificação de aços inoxidáveis e superligas incluem o tipo e classe de material a ser retificado, a área de contato entre rebole e a peça, a quantidade de material a remover, a precisão e o acabamento exigidos. Todos esses fatores afetam a escolha do tipo de abrasivo, tamanho de grão, ligante, classe e estrutura. A dureza do material a retificar e a sua susceptibilidade à quebra são aspectos críticos com respeito à retificabilidade [10].

Os rebolos são classificados principalmente em relação aos abrasivos e aos ligantes. Como abrasivos têm-se os convencionais (óxido de alumínio e carboneto de silício) e os superduros (diamante e nitreto de boro cúbico). Quanto aos ligantes, destacam-se os ligantes cerâmicos vitrificados, os resinóides e os metálicos. A relação entre o volume de grãos abrasivos, ligante e poros confere propriedades específicas aos rebolos. O tamanho do grão define as seções de usinagem, e assim, o acabamento superficial da peça.

A Tabela 4.1 mostra o sistema de marcação normalizado, para identificação dos rebolos de abrasivos convencionais (pela ANSI B74.13-1977 e ISO 525-1975E) e a Tabela 4.2 o sistema de marcação padrão para a identificação dos rebolos de diamante e nitreto de boro cúbico (pela ANSI B74.13-1977).

Tabela 4.1 - Identificação de rebolos e outros abrasivos [15; 16; 17].

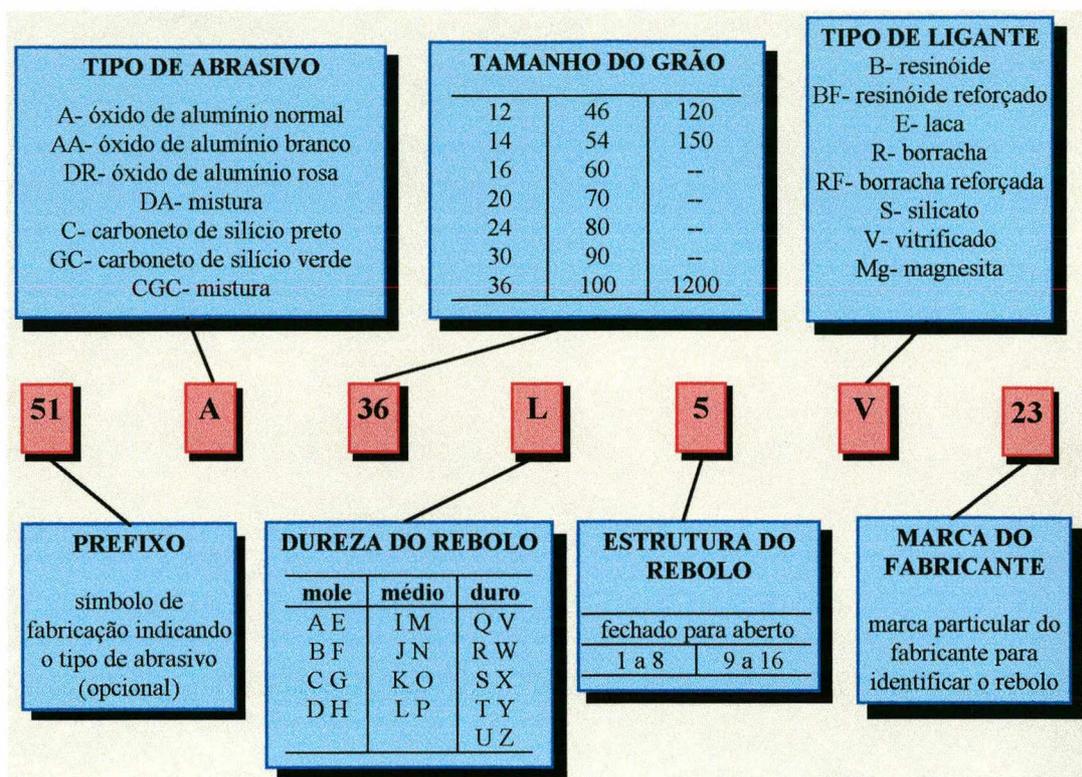
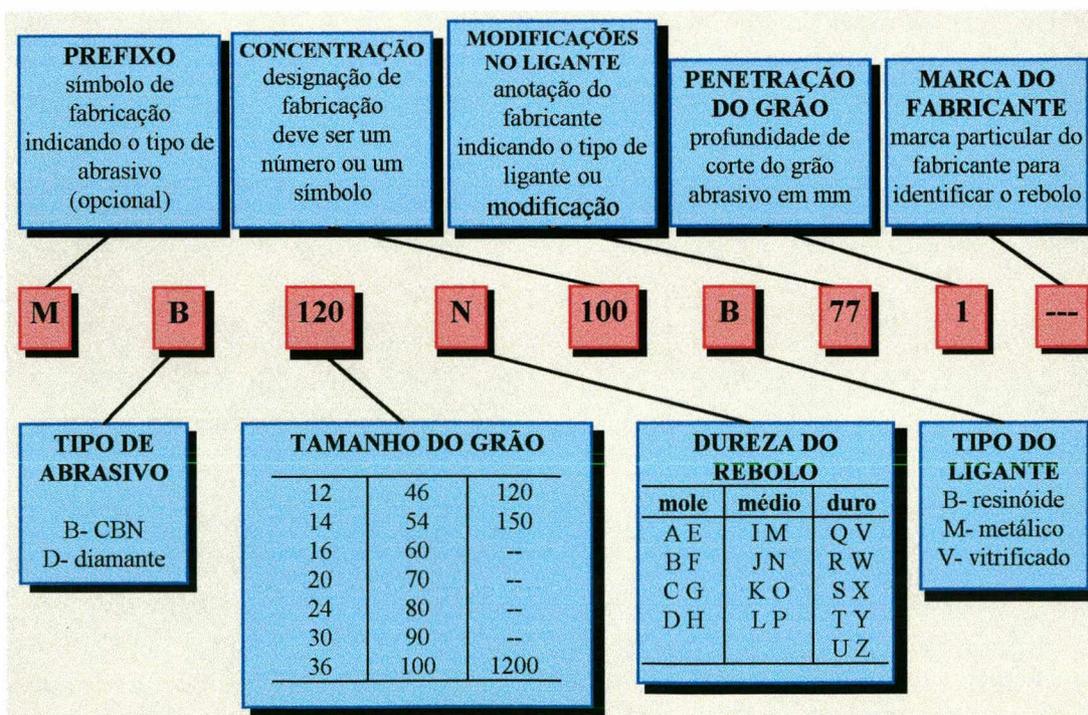


Tabela 4.2 - Identificação de rebolos de diamante e CBN [15; 16].



4.2.1 TIPOS DE ABRASIVOS

Na retificação, a remoção de material se processa através da ação de grãos abrasivos unidos entre si por um ligante. Para que exista remoção eficiente de material é necessário que os grãos possuam certas características, como:

- ruptura frágil, propiciando uma contínua recuperação de gumes vivos;
- alta dureza, para que mantenham por muito tempo os gumes afiados;
- resistência termo-química, evitando a deterioração ou reação com o material da peça.

Como é difícil um abrasivo satisfazer a todas estas exigências simultaneamente, sua escolha depende do material a ser retificado e do resultado desejado [17].

Os dois abrasivos mais usados em aplicações industriais são o óxido de alumínio e o carboneto de silício. O óxido de alumínio, empregado na fabricação de rebolos, é um material sintético produzido em fornos elétricos a arco, tendo grande variações nas propriedades, como dureza e friabilidade, que dependem da percentagem de impurezas presentes, geralmente TiO_2 , SiO_2 , e FeO_3 . O grau de tais impurezas distingue as três qualidades básicas encontradas no mercado:

- normal: apresenta cor marrom cuja intensidade é função do teor de TiO_2 , é tenaz e usado em operações de retificação de desbaste e de uso geral para aços comuns;
- média: apresenta cor marrom mais clara até cinza esbranquiçado, é semi-frágil e designado para uso geral;
- extra: tem cor branca e Al_2O_3 com pureza superior a 99%, é frágil, apresentando grãos duros ($K_{100} = 2150$), porém menos tenazes e mais friáveis, usado para a retificação de ferramentas e aços temperados, cementados ou duros. A adição de CrO_3 em percentuais baixos torna os grãos um pouco mais duros e mais friáveis que o branco, modificando sua cor para rosa. É usado em aços sensíveis ao calor, em ligas de difícil retificação e também para a remoção com grandes taxas de retificação. No mercado nacional existem dois tipos de grão rosa: o comum e o rubino, mais avermelhado. Ambos possuem o mesmo grau de friabilidade, porém o rosa é um pouco mais duro [16; 17; 18; 19].

O carboneto de silício, obtido em fornos elétricos a resistência, é mais duro que o óxido de alumínio ($K_{100} = 2450$ a 3000) e é usado principalmente para a retificação de não-metálicos, não-ferrosos e materiais de baixa ductilidade. Distinguem-se basicamente duas qualidades de carbonetos de silício, as quais variam com o tipo e a porcentagem de impurezas, e com a

posição dentro do forno durante a fusão:

- verde: a cor esverdeada está associada à presença de pequenas porcentagens de nitrogênio no carboneto de silício muito puro. É bastante friável e usado em geral na retificação de metal duro.
- preto: a presença de alumínio ou seus óxidos conferem coloração de azul a preto ao carboneto de silício menos puro. É um pouco menos friável que o verde e usado em materiais não-ferrosos ou não-metálicos.

Podem ser feitas várias combinações de abrasivos de óxido de alumínio e de carboneto de silício, obtendo-se efeitos intermediários aos produzidos usando-se um só dos dois. Também estes desempenhos poderão variar em função dos percentuais de participação de cada um dos componentes. Estes abrasivos combinados são eficazes somente com ligantes orgânicos: resinóides, borracha e goma laca [16; 17; 18].

O nitreto de boro cúbico (CBN) é um material cristalino sintético obtido em altas temperaturas e elevadas pressões e com dureza que se aproxima à do diamante ($K_{100} = 4700$). O CBN é recomendado para ligas metálicas que são difíceis de serem retificadas com abrasivos convencionais, como o aço e ferro fundido, com dureza acima de 50 HRC e ligas de níquel e cobalto a alta temperatura com dureza acima de 35 HRC [10; 16].

A Figura 4.2 mostra uma comparação da dureza entre diversos materiais abrasivos.

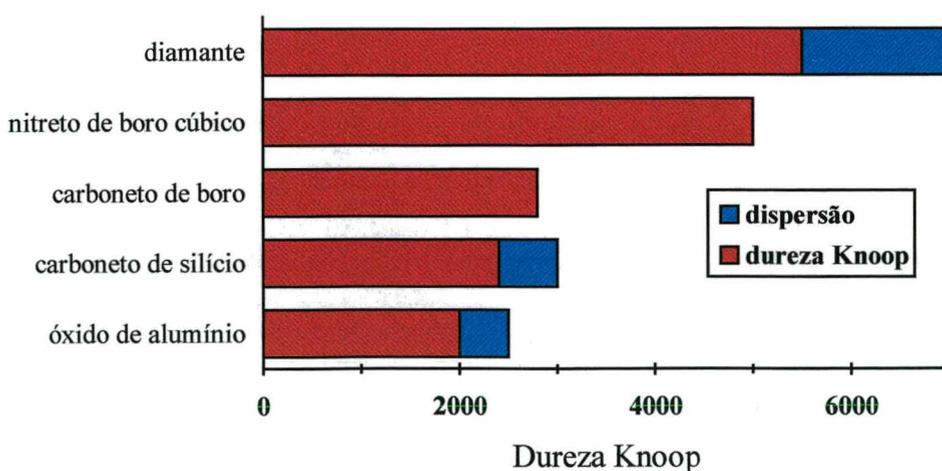


Figura 4.2 - Comparação da dureza entre diversos materiais abrasivos [15].

O diamante, sintético ou natural, é predominantemente empregado na retificação de óxidos, carbonetos e nitretos.

O carboneto de boro, embora apresente dureza elevada, não é empregado na fabricação de rebolos devido à sua baixa resistência térmica.

A Figura 4.3 apresenta valores orientativos das tendências de comportamento dos abrasivos para algumas famílias de materiais [18].

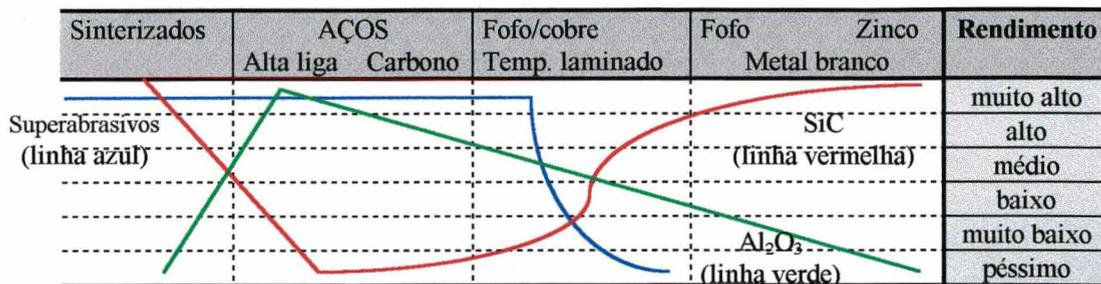


Figura 4.3 - Gráfico de rendimento do óxido de alumínio (linha verde), carboneto de silício (linha vermelha) e superabrasivos (diamante e CBN) (linha azul) [18].

ABRASIVOS PARA A RETIFICAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS

Vários tipos de abrasivos são usados para retificar aços inoxidáveis. O óxido de alumínio, que é mais tenaz que o carboneto de silício, é especialmente utilizado em aços inoxidáveis martensíticos AISI série 400 e superligas. Os fabricantes de abrasivos oferecem diferentes tipos de óxido de alumínio para suprir diversas exigências. Materiais friáveis e semi-friáveis são mais utilizados, pois cortam melhor, com menor temperatura e com pressões de corte reduzidas. Algumas vezes muitos tipos de grãos de óxido de alumínio são misturados no mesmo rebolo para a combinação de corte livre e capacidade de manter a forma [10].

Abrasivos de carboneto de silício são usados para retificar aços inoxidáveis austeníticos série 300, algumas superligas, como o Inconel, e, em alguns casos, ligas de titânio [10].

Têm-se obtido bons resultados com rebolos mistos, contendo 50% de óxido de alumínio e 50% de carboneto de silício na retificação *centerless* de tubos e barras de aço inoxidável, feitos de aços das séries 300 e 400. Esta mistura aumenta a versatilidade desses rebolos sem sacrificar a durabilidade. Tais rebolos mistos, normalmente disponíveis somente com ligante resinóide ou de borracha, são também úteis quando as retificadoras possuem potência insuficiente, porque eles reduzem as exigências de pressão, principalmente se forem de classe mole [10].

O nitreto de boro cúbico (CBN) está sendo usado para a retificação de ferramentas e

aços inoxidáveis martensíticos com dureza acima de 40 HRC. Foram encontradas aplicações limitadas para a retificação com CBN em aços inoxidáveis austeníticos, pois a natureza empastante deste aço tende a arrancar as partículas abrasivas do rebolo, causando um rápido desgaste. Uma razão limitante quanto ao emprego de CBN é o seu alto custo, cerca de 10 vezes mais caro que o óxido de alumínio ou o carboneto de silício. Além disto exige aplicações em máquinas potentes e modernas, devido às altas velocidades de corte exigidas (Figura 4.4), onde o uso desse abrasivo pode tornar-se economicamente justificável [10; 20].

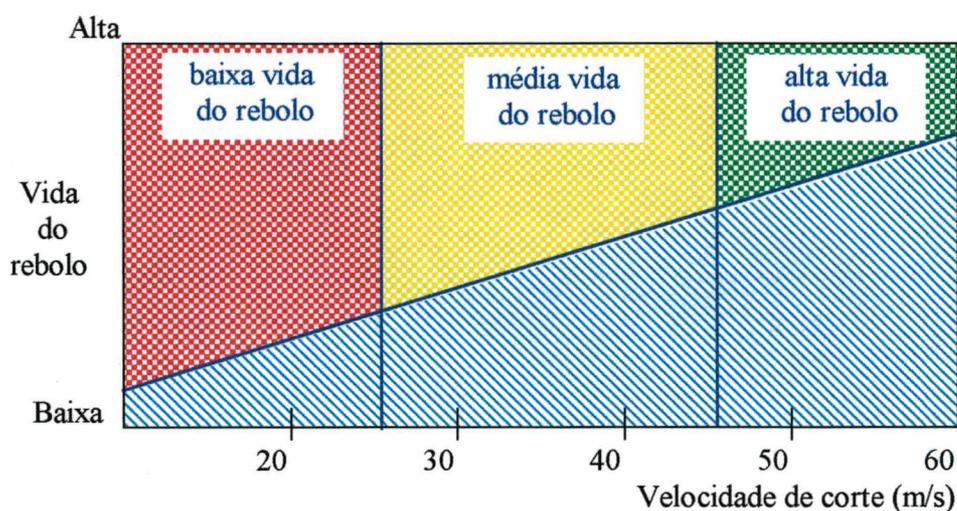


Figura 4.4 - Vida do rebolo de CBN em relação à velocidade de corte.

4.2.2 GRANULOMETRIA

A dimensão e a uniformidade dos grãos são características importantes nos processos de usinagem com abrasivos. A classificação mais usual é a ANSI B74.12-1977, que especifica o tamanho dos grãos em *mesh*, que representa o número de malhas por polegada linear de uma peneira, na qual os grãos do abrasivo ficam retidos no processo de seleção. Esta classificação usual para abrasivos convencionais [17; 21]. Para grãos de diamante e CBN é usada também a classificação FEPA (Federação Européia dos Fabricantes de Abrasivos), que especifica a abertura dos grãos da malha da peneira em micrometros. As dimensões dos grãos de diamante são indicadas internacionalmente pela letra D e o CBN pela letra B. O número subsequente indica o diâmetro médio da graulação em micrometros. As especificações dos grãos através das normas ASTM e FEPA são mostradas na Tabela 4.3 [17].

Tabela 4.3 - Classificação do tamanho de grão conforme normas ASTM e FEPA.

ASTM (mesh)	FEPA (μm)	Uso
70	B 46	operações de retificação normais
80	B 54	
100	B 64	operações de retificação
120	B 76	
150	B 91	
180	B 107	
220	B 126	retificação de
240	B 151	acabamento fino
280	B 181	
320	B 213	
400	B 251	superacabamento

A granulometria do abrasivo usada em rebolos depende principalmente das exigências de acabamento e forma. Esta influi na rugosidade, taxa de remoção, tamanho de cavaco e no desgaste da quina do rebolo. A rugosidade da peça depende ainda de outros fatores como dureza do rebolo, estrutura e método de dressamento. Abrasivos de grãos finos tendem a produzir superfícies com baixos valores de rugosidade [10; 16].

Em rebolos de CBN, devido à sua dureza, é necessário o emprego de grãos delgados, que são usados, como os abrasivos convencionais, para obter o mesmo nível de acabamento. Acabamentos extremamente finos são difíceis de obter com abrasivos de CBN porque existe pouco ou nenhum polimento da superfície, visto que os abrasivos de CBN têm desgaste bastante pequeno [16].

GRANULOMETRIA PARA A RETIFICAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS

Grãos relativamente grossos (24 a 60) são usados para retificar aços inoxidáveis e superligas, porque estes produzem cavacos longos que exigem poros grandes que podem ser obtidos mais facilmente com granulometrias grosseiras. Grãos mais finos são usados ocasionalmente para melhores acabamentos superficiais, retificação de roscas e cantos afiados. Mas quanto menor o grão maior a chance de empastamento do rebolo, o que limita a taxa de retificação [10].

4.2.3 DUREZA

A dureza de um rebolo é a medida da força de união dos grãos no rebolo. O principal fator que afeta a força de união é a quantidade de retenção do ligante num único grão, e varia de A a Z em ordem crescente de conteúdo ligante. A dureza pode variar em função da qualidade do ligante utilizado para a fabricação do rebolo ou, ainda, em função da qualidade e do tipo de ligante utilizado [19]. A dureza do rebolo deve variar inversamente com a dureza da peça. Para materiais duros usam-se rebolos de classes macia, enquanto para materiais macios usam-se rebolos de classes mais dura. A dureza ideal é aquela na qual os grãos gastos e arredondados são eliminados do ligante, de modo que haja uma reafiação automática da pedra. A especificação da dureza é feita por letras maiúsculas, como mostrado na Tabela 4.4 [16; 17].

Tabela 4.4 - Especificação para a dureza do rebolo.

Dureza	Especificação
Extra-macio	A - B - C - D - E - F - G
Macio	H - I - J - K
Médio	L - M - N - O
Duro	P - Q - R - S
Extra-duro	T - U - V - X - Y - W - Z

DUREZA DE REBOLOS PARA A RETIFICAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS

Classes macias a médias (F a L) são geralmente usadas para a retificação de aços inoxidáveis e superligas, e as classes mais duras são usadas para a retificação de roscas e de forma, assim como para a retificação de barras em máquinas mais potentes [10].

As classes mais macias são utilizadas para a retificação de materiais mais duros. Por causa da menor quantidade de ligante e maior quantidade de vazios (poros), os grãos quebram ou são arrancados à medida que cegam, expondo dessa forma grãos novos e afiados ao trabalho [10].

Quanto maior a área de contato, mais dura é a classe a ser usada. Classes mais duras podem também ser usadas para materiais mais moles, requerendo mais potência e gerando mais calor [10].

4.2.4 ESTRUTURA

O número da estrutura relaciona-se ao espaçamento entre os grãos do rebolo e não tem relação direta com a porosidade e com a densidade. A seleção depende principalmente de exigências de separação do cavaco ou da capacidade de manter a forma do rebolo [10; 17].

Rebolos que possuem uma estrutura aberta (números altos) são recomendados para a retificação de superfícies planas, enquanto rebolos que têm um estrutura fechada (números baixos) são recomendados para a retificação cilíndrica, *centerless* ou de forma. Rebolos de estrutura fechada também são recomendados quando pequenos valores de acabamento são necessários [16].

ESTRUTURA DOS REBOLOS PARA A RETIFICAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS

Uma estrutura razoavelmente aberta (8 a 13) é geralmente utilizada para retificar aços inoxidáveis. Uma estrutura mais aberta ainda pode ser necessária para reduzir o calor e a pressão de retificação a baixas tensões, ou para aplicações em retificação de discos com grandes áreas de contato. Estruturas mais fechadas são freqüentemente usadas para a retificação de forma e acabamentos mais finos [10].

4.2.5 TIPOS DE LIGANTES

Os ligantes possuem a função de manter o grão aprisionado até que este esteja suficientemente cego ou tenha perdido sua capacidade de corte para, nesse momento, liberar o grão desgastado para que os grãos mais afiados entrem em ação [17].

Diversos tipos de ligantes são empregados na fabricação de rebolos. Os tipos resinóide, borracha e vitrificado são os mais utilizados. Ligantes vitrificados são mais frágeis que ligantes resinóides, mas são superiores para manter a forma. Velocidades comuns usadas em rebolos vitrificados são de 33 a 43 m/s. Velocidade altas (51 a 64 m/s) necessitam rebolos especiais, testados e aprovados para a máquina e para a velocidade desejada. Velocidades comuns usadas em rebolos de ligantes resinóides são de 33 a 48 m/s. Em alguns casos, os rebolos podem operar com velocidades superiores a 64 m/s. Em qualquer caso, a velocidade marcada no

rebolo é a velocidade máxima permissível [16].

As velocidades elevadas são marcadas especialmente sobre as faces planas dos rebolos, por meio de faixas, conforme normas FEPA e ISO, como a seguir [18]:

Tabela 4.5 - Marcação das velocidades especiais em rebolos conforme normas FEPA e ISSO.

Velocidades	Marcação
45 m/s	faixa amarela
60 m/s	faixa azul
80 m/s	faixa vermelha
100 m/s	faixa verde

Rebolsos de ligantes resinóides são usados para a retificação com fluido de corte e para operações de corte (*cut off*) [16].

Rebolsos de CBN são disponíveis com ligantes resinóides, vitrificados e metálicos. Rebolsos de ligante resinóide produzem um bom acabamento em altas taxas de remoção de metal e fornece uma razoável vida do rebolo. Rebolsos de ligante vitrificado são melhores para a manutenção da forma e fornecem uma vida mais longa ao rebolo. Rebolsos de ligante metálico são melhores para corte livre e dão altas taxas de remoção de metal [16].

Rebolsos com ligantes metálicos obtidos por deposição galvânica contém uma única camada de grãos de CBN e não podem ser dressados, porém permitem altíssimas velocidades de retificação, resultando em elevadas relações de desgaste [16].

LIGANTES PARA A RETIFICAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS

Os ligantes usados dependem principalmente da aplicação, e os vários tipos disponíveis são freqüentemente modificados pelos fabricantes de rebolos para se adequar a exigências especiais. Rebolsos de óxido de alumínio com ligante vitrificado são os mais comuns para retificar aços inoxidáveis. Este é um ligante rígido que permite rápida remoção, e geralmente necessita menores pressões de retificação. É quase sempre usado na retificação de forma [10].

Ligantes resinóides são mais tenazes, podem suportar maiores tensões, e podem ser operados a maiores velocidades. Rebolsos dessa espécie necessitam menos dressamentos. Esta ação de autodressamento torna-o ideal para a retificação *centerless* de barras e tubos. Também a baixa resiliência ajuda a absorver vibrações e altas pressões localizadas, como resultado de

contato com barras que não são perfeitamente circulares ou retilíneas [10].

Bons resultados são obtidos na retificação plana de aços inoxidáveis e superligas com ligantes resinóides B-24 e segmento abrasivo de óxido de alumínio fabricados pela *Bay State Abrasive*. Estes segmentos são sensíveis termicamente, absorvendo o calor gerado na retificação, e causando o amolecimento do ligante a temperaturas relativamente baixas. Isto continuamente mantém os grãos afiados expostos com quebra de grão controlada, e mais metal pode ser removido com menor geração de calor [10].

4.3 DRESSAMENTO

Para obter um bom desempenho de um rebolo, este deve ser preparado para cada operação. Esta preparação consiste na configuração macro e microgeométrica do rebolo. A configuração macrogeométrica ou o perfilamento confere a forma geométrica à região de trabalho do rebolo. A configuração microgeométrica ou afiação confere capacidade de corte ao rebolo.

Em rebolos de abrasivos convencionais o perfilamento e a afiação se confundem em apenas um processo, denominado de dressamento. Em rebolos de abrasivos superduros normalmente se fazem necessárias duas operações distintas de perfilamento e afiação.

A operação de dressamento é parte integrante da operação de retificação. Não podemos considerar o desempenho de um rebolo sem estudar as condições de dressamento. A forma com que é realizada vai influir notavelmente no acabamento, no arranque de material, na tolerância dimensional e na vida do rebolo [19].

Os objetivos elementares do dressamento são:

- restaurar a capacidade de corte, permitindo que novos grãos afiados apareçam na superfície;
- retirar as partículas encruadas na superfície de trabalho que o jato do refrigerante não conseguiu remover;
- adequar as condições de corte para o acabamento desejado;
- refazer o perfil, caso necessário.

Em condições ideais de trabalho o rebolo deve ser auto-afiável, quer dizer depois que os grãos já foram usados devem aparecer os da “camada seguinte”, para continuar a operação. Um rebolo prático e tecnicamente correto é aquele que precisa de uma dressagem

ocasionalmente para a recuperação do perfil [19].

4.4 FLUIDO DE CORTE

A seleção de um fluido e a sua correta aplicação pode fazer a diferença entre o sucesso e a falha de uma operação de retificação. A seleção depende principalmente da retificabilidade do material e da compatibilidade do fluido com o material e o operador, e ainda devem ser considerados: o rebolo usado, severidade da operação, a quantidade de fluido de corte, método de aplicação, o sistema de limpeza e filtragem, quantidade de água usada em solução aquosa e emulsão, e controle da oxidação e rancidez. As exigências de tolerâncias e acabamento, assim como a disponibilidade e custo do fluido também devem ser avaliadas. O custo por peça retificada, entretanto, é mais importante porque um fluido mais caro ou em maiores concentrações pode freqüentemente ser mais econômico [10].

A abrasão, resistência e baixa condutividade térmica dos aços inoxidáveis e superligas tornam a escolha do fluido ainda mais crítica.

4.4.1 FUNÇÕES DOS FLUIDOS DE RETIFICAÇÃO

Os fluidos de retificação apresentam as mesmas funções dos fluidos utilizados em operações com ferramenta de geometria definida. Eles lubrificam a interface cavaco/rebolo e rebolo/peça, reduzindo a temperatura de contato e a temperatura na raiz do cavaco, deslocando o mecanismo de deformação de cavacos de uma área com dominância de deformação plástica para uma com maior participação de mecanismos de cisalhamento. Assim reduz-se o trabalho necessário para remover um dado volume de material e, com isto, o calor gerado na retificação. Os fluidos minimizam o calor gerado nas partes que estão sendo retificadas, reduzindo os danos metalúrgicos na camada limite.

O calor desenvolvido na interface abrasivo/peça, bem como na região de deformação primária na retificação, é de até uma ordem de grandeza maior que nos processos de usinagem com ferramentas de corte de geometria definida. Tanto os picos de temperatura gerados por atrito, como o calor gerado por deformação plástica, influenciam dominantemente a característica da peça. Na retificação, o fluido de corte deve ter propriedades refrigerantes em

baixas velocidades de corte e predominantemente lubrificante em altas velocidades de corte [10; 22].

No torneamento, tem-se observado que 97% da energia envolvida é dissipada sob a forma de calor (com os cavacos e na ferramenta) e os 3% remanescentes na superfície de corte. Numa comparação do torneamento com a retificação, somente 4% da energia requerida para a retificação “deixam o sistema” com os cavacos, mais de 12% são absorvidos pelo rebolo e o restante, em torno de 84%, ficam retidos na superfície retificada. Esta alta retenção de energia na peça retificada é uma forte evidência da necessidade de uma alta lubrificação na retificação para prevenir a geração excessiva de calor (Figura 4.5) [10].

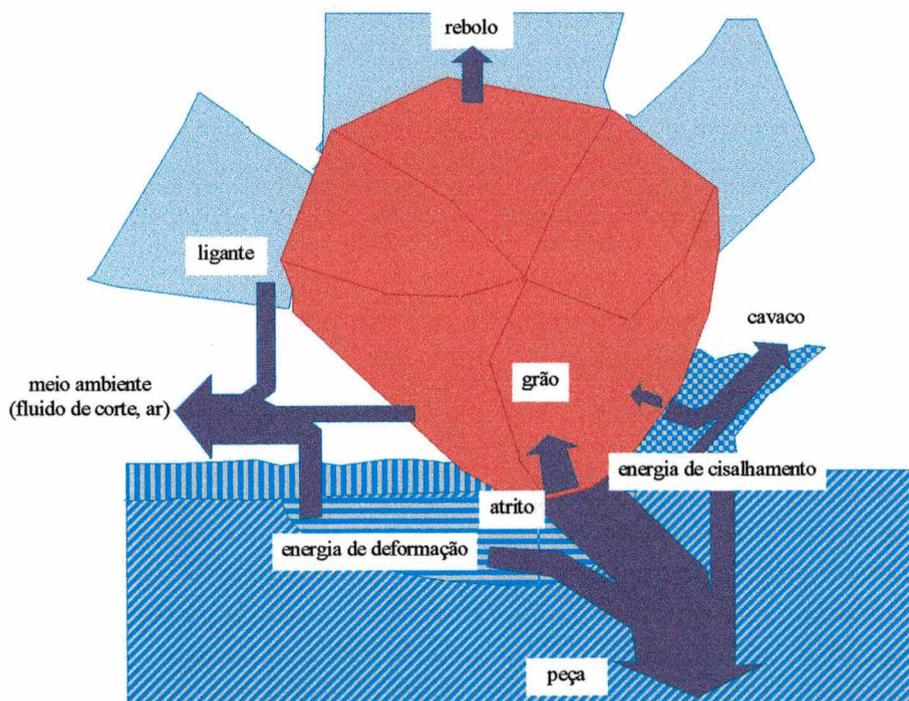


Figura 4.5 - Distribuição da energia durante o corte na retificação [15].

4.4.2 TIPOS DE FLUIDOS DE RETIFICAÇÃO

A caracterização dos fluidos de retificação é extremamente difícil devido ao grande número de fórmulas de cada um dos muitos fabricantes e à necessidade de definição entre estes fabricantes sobre o que exatamente define um fluido para trabalho pesado ou leve ou um de aplicações gerais.

Os fluidos de corte na retificação, assim como na usinagem com geometria definida,

subdividem-se em dois grandes grupos: os óleos miscíveis em água (emulsionáveis) e os óleos não emulsionáveis. Em ambos os casos pode-se tratar de óleos minerais ou sintéticos, aditivados ou não. Os diversos fabricantes apresentam soluções diferentes na composição do fluido de corte para atender a uma maior necessidade de refrigeração ou de lubrificação. Em baixas velocidades de retificação (até 45 m/s) é mais frequente encontrar emulsões como fluido de corte. À medida que se aumenta a velocidade de retificação a melhora da lubrificação leva a uma diminuição mais acentuada dos picos de temperatura, provocados pelo atrito, tendo como resultado menores defeitos metalúrgicos no processo. A estabilização da temperatura média do sistema é garantida por um aumento da vazão.

A Tabela 4.6 fornece recomendações gerais para a seleção de um fluido de retificação para materiais específicos de peças.

Tabela 4.6 - Recomendações de fluidos para a retificação [22].

material	Tipos de retificação			
	de forma	cilindrica	interna	plana
aços de baixo e médio carbono	óleo MD, HD miscível em água	óleo LD, M-HD miscível em água	GP miscível em água	LD e GP miscível em água
aço martensítico	óleo HD, HD miscível em água	óleo HD, HD miscível em água	óleo LD, miscível em água	GP miscível em água
aços inoxidáveis, marange, ligas de níquel	óleo HD, HD miscível em água	HD miscível em água	óleo GP, GP miscível em água	HD miscível em água
ferro fundido	HD miscível em água	GP miscível em água	GP miscível em água	GP miscível em água
ligas de titânio	HD miscível em água	HD miscível em água	HD miscível em água	HD miscível em água

HD = trabalho pesado; MD = trabalho médio; LD = trabalho leve; GP = aplicações gerais.

Uma linha atual da fabricação é atentar para a minimização do número de fluidos em uso numa fábrica. Isto é feito normalmente com a seleção de fluidos para trabalho pesado que apresentem grande faixa de abrangência, isto é, eles são compatíveis com a maior parte dos materiais de trabalho. Quando usados em baixas concentrações (2 a 4 %), eles funcionam como fluidos para trabalho leve; em concentrações médias (4 a 8 %), como fluido de aplicações gerais; e em altas concentrações (10 a 20 %), funcionam como fluidos para trabalho pesado. As vantagens de se usar um ou dois fluidos desta maneira são óbvias: menor quantidade de material a ser adquirido em menor número de inventários, controles e procedimentos de reciclagem. Finalmente, com este procedimento, há uma menor

probabilidade de uma mistura inadequada de fluidos e suas conseqüências [22].

4.5 RETIFICAÇÃO TIPO *CREEP-FEED* E TIPO *DEEP* [22]

4.5.1 RETIFICAÇÃO TIPO *CREEP-FEED*

A retificação *creep-feed* originou-se na Europa em 1958, quando o primeiro protótipo de um rebolo *creep-feed* foi desenvolvido pela firma *ELB-Schliff* da República Federal da Alemanha. Hoje muitos fabricantes de máquinas-ferramentas nacionais e estrangeiras oferecem máquinas *creep-feed* especiais. Recentemente houve um interesse particular em máquinas que operem tanto em retificação convencional como em retificação *creep-feed*.

Geralmente a retificação *creep-feed* é usada em operações de retificação de forma, em um único passe e em penetrações de trabalho maiores que a usual. Nos processos de retificação de forma, tipicamente encontrados na fabricação de brocas e fresas, a retificação *creep-feed* encontra o seu principal campo de aplicação.

O processo de retificação *creep-feed* é marcado por um modo especial de operação, como ilustra a Figura 4.6. Em contraste com a técnica convencional, as penetrações de trabalho por passo ou revolução são aumentadas em 1.000 a 10.000 vezes e o avanço é diminuído na mesma proporção. Assim é possível retificar perfis com uma profundidade de 1,0 a 30,0 mm ou mais, em um único passe, usando velocidades de avanço de 0,25 a 0,75 mm/min, fazendo o tempo de máquina reduzir em 50 a 80%. Nas condições *creep-feed* é evitado o múltiplo contato inicial entre rebolo/peça, típicos de operações convencionais. Como conseqüência a estabilidade do perfil do rebolo é consideravelmente melhorada, por outro lado, o esforço de trabalho é maior devido ao aumento da largura de contato entre rebolo/peça.

Comparando com o processo de retificação convencional e com as mesmas taxas de retificação, as operações *creep-feed* são caracterizadas pelos seguintes fatores tecnológicos:

- aumento da força de retificação;
- redução da força média por grão;
- aumento da temperatura na zona de corte rebolo/peça;
- redução da temperatura na superfície gerada na peça.

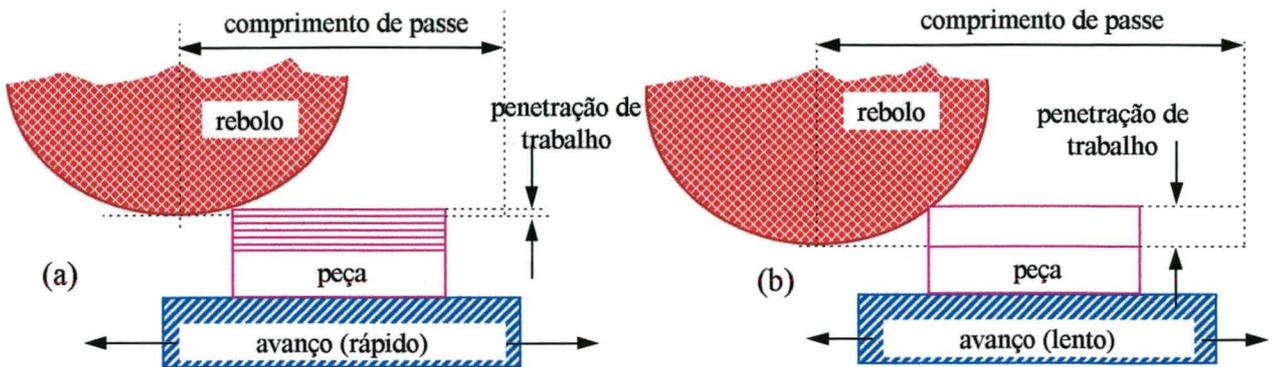


Figura 4.6 - Avanço, profundidade de corte e comprimento de passe para (a) retificação convencional e (b) retificação *creep-feed*.

Na retificação *creep-feed*, para uma mesma taxa de retificação, os cavacos se tornam mais compridos e finos que na retificação com movimento alternativo (pequena penetração de trabalho e grande velocidade de avanço). Com isto a parcela de trabalho de atrito aumenta e também a temperatura. Assim, neste processo a lubrificação se torna ainda mais importante, mesmo para baixas velocidades de retificação. Em decorrência dos cavacos muito longos produzirem volumes maiores, a porosidade de um rebolo para a retificação *creep-feed* deve ser maior que para um rebolo especificado para a retificação com movimento alternante.

Para fazer uso total das vantagens econômicas e tecnológicas deste processo de manufatura de alta eficiência e alta precisão, é essencial a aplicação de máquinas-ferramentas, rebolos, métodos de dressamento e controle de técnicas especialmente desenvolvidos. Um sistema de produção como este é consequência dos seguintes fatores:

- alta estabilidade estática e dinâmica da máquina-ferramenta;
- alta precisão, guias livres de *stick-slip* com características favoráveis de amortecimento;
- maior potência de eixo (2 a 3 vezes mais do que no processo de retificação normal);
- maior gama de velocidade na árvore;
- sistema motor-eixo altamente balanceado e diretamente conectado, com rolamentos de alta precisão e desempenho;
- mesa de trabalho simples, não hidráulica, com proteção em toda a área da região do *creep-feed* e, ainda, com grande variedade de velocidades;
- velocidade de mesa consistente, especialmente em faixas mais elevadas;

- sistema de refrigeração de alta pressão;
- mecanismos de dressamento integrados;
- sistemas de controle integrados;
- rebolos especialmente adaptados para a operação;
- atualização do *know-how* do processo.

Um pré-requisito indispensável para a aplicação com sucesso do método *creep-feed* é o uso de máquinas e ferramentas que sejam especialmente projetadas para uso na retificação *creep-feed* e que atendam completamente os padrões.

4.5.2 RETIFICAÇÃO TIPO *DEEP*

O termo *deep* é usado na Europa para descrever operações *creep-feed* na retificação cilíndrica externa de ferramentas, roscas e engrenagens associado a um aumento da velocidade de corte.

Uma vantagem da retificação cilíndrica *deep* é que a zona de contato é significativamente menor do que na retificação *creep-feed*. Isto resulta em forças de retificação em torno de três vezes menores que na retificação *creep-feed*, na mesma taxa de remoção. Entretanto, existem desvantagens na retificação *deep*. O processo envolve o mergulho descendente do rebolo em direção à peça, para só depois ser executado a operação de *creep-feed*, através de uma revolução completa da peça e, finalizando, a retração do rebolo.

Atualmente, o processo de retificação externa *deep* é mais tradicional que a retificação de superfície *creep-feed*. Roscas de precisão, por exemplo, têm sido produzidas por retificação de mergulho durante décadas.

O exemplo mais impressionante do potencial do método *creep-feed* em geral é a retificação *deep* de ranhuras em brocas com uma profundidade de corte de no máximo 17,3 mm e com velocidade periférica do rebolo superior a 100 m/s. Nesta aplicação, as ranhuras são retificadas em toda a profundidade usinada em um único passe, por um rebolo com ligante resinóide especial e altas velocidades de rebolo. A taxa de remoção de material alcança valores de até 16.487 mm³/s, a qual é 50 a 100 vezes mais alta que o valor máximo alcançado na retificação de superfície *creep-feed* e superior em 20 vezes ao processo convencional de fresamento de ranhuras. No caso de brocas de tamanhos pequeno a médio, a operação é executada em aço-rápido tratado termicamente. As brocas com diâmetro superior a

15 mm são endurecidas depois da retificação *deep*, para assegurar uma dureza constante sobre a seção total de trabalho.

4.6 RECOMENDAÇÕES NA RETIFICAÇÃO

As condições de retificação apresentadas na Tabela 4.7 representam uma aproximação das condições ótimas, alcançadas em testes e experimentos, para serem utilizadas na indústria. Estas condições podem ser ajustadas para se obter a adequação às características da peça a ser retificada, solicitação de acabamento, objetivos econômicos e condições operacionais [16].

Tabela 4.7 - Condições para a retificação de aços inoxidáveis [16].

Aços inoxidáveis	Dureza HBn	Condições	Velocidade do rebolo	Velocidade da peça	Avanço mm/passos	Rebolo ANSI
Ferríticos	135 - 185	recozido	28 m/s	15 m/min	desbaste	A46IV
Austeníticos	135 - 275	recozido ou trab. a frio	a	a	0,05	C46JV
Martensíticos	135 - 275	recozido	33 m/s	30 m/min	acabamento	A46IV
Martensíticos	acima de 275	temperado e recozido			0,013	A46HV

O tamanho de grão do rebolo determina, aproximadamente, qual o acabamento que pode ser obtido na peça, como fornece a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Granulometrias para várias produções de superfícies [16].

Granulometria em <i>mesh</i>	Rugosidade R_a em μm
46	0,80
54	0,50 a 0,80
60	0,38 a 0,50
80	0,25 a 0,38
120	0,20 a 0,25

Uma granulometria fina do rebolo produz superfícies com baixos valores de rugosidade e apresenta baixa capacidade de remoção de cavaco.

A obtenção de valores de acabamento menores que 0,25 a 0,28 μm (R_a) requerem atenção especial de velocidades de retificação e da taxa de retificação específica [16].

Uma estrutura mais fechada aumenta a precisão desejada, tanto de forma com da rugosidade [19].

O dressamento do rebolo também desempenha um importante fator na rugosidade. Um

dressamento com grau de recobrimento pequeno, por exemplo, pode introduzir ondas espirais na superfície do rebolo aumentando a rugosidade da peça. A Figura 4.7 mostra claramente que se o passo do dressamento for muito pequeno, a rugosidade também será reduzida, e um passo grande gera uma alta rugosidade [23].

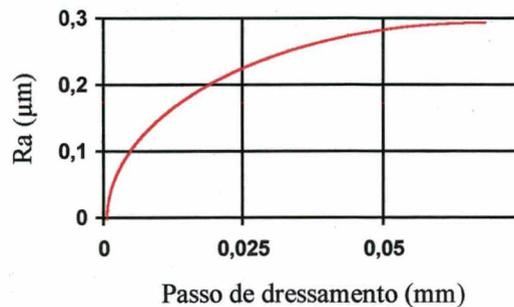


Figura 4.7 - Efeito do passo de dressamento na rugosidade R_a [23].

A Figura 4.8 mostra que uma diminuição da rugosidade é obtida com o aumento da velocidade de corte. A causa para isso são as menores seções de usinagem que ocorrem, apesar da diminuição do número de gumes cinemáticos no processo [15].

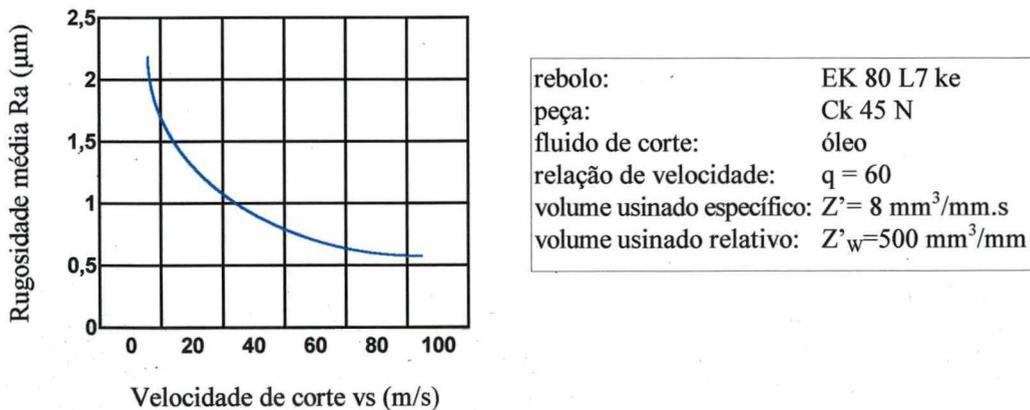


Figura 4.8 - Rugosidade média R_a em dependência da velocidade de corte v_s [15].

Assim, se aumentarmos a velocidade periférica do rebolo, a espessura do cavaco será menor, o grão abrasivo estará submetido a esforços menores e a vida útil do rebolo, conseqüentemente, será maior. O rebolo se comportará como mais duro. Inversamente, a redução da velocidade do rebolo implica em uma espessura de cavaco maior. O grão estará submetido a esforços maiores e o rebolo se comporta como macio, conforme a equação de Alden (4.1).

$$e_m = \frac{v_p}{v_r} \cdot \sqrt{\frac{t}{d}} \quad (4.1)$$

onde:

e_m = espessura máxima do cavaco

v_p = velocidade da peça

v_r = velocidade do rebolo

t = profundidade de passe

d = diâmetro da peça

Quando pretende-se trabalhar com velocidades elevadas, para melhorar um acabamento ou prolongar a vida útil de um rebolo, deve-se observar o limite imposto pela resistência mecânica da liga do rebolo. Esta resistência à ruptura depende da forma do rebolo, da relação entre diâmetro externo e diâmetro do furo, do ligante, da dureza e da utilização de reforço de tela de fibras [18; 21].

Das considerações feitas sobre a peça a ser produzida (lima Hedström), do processo de retificação, dos materiais abrasivos e das condições de retificação, pode-se estabelecer as características básicas que devem ser atendidas pela retificadora a ser empregada.

A lima Hedström dispõe de apenas uma entrada e sofre uma substancial redução da seção transversal em relação à matéria-prima bruta. Deste fato conclui-se sobre a necessidade de produzir-se o canal em apenas um passe, iniciando a retificação *creep-feed* pela ponta da lima e com avanço linear-rotativo controlado.

Disto resulta a necessidade de um rebolo que garanta um perfil de quina por um longo período (elevada relação G: volume de material removido da peça em relação ao volume de abrasivo extraído do rebolo durante a retificação) com elevada porosidade. Além disso deve-se garantir uma boa lubrificação da região de trabalho e assim garantir temperaturas baixas no processo.

A partir deste reconhecimento partiu-se para o projeto da máquina-ferramenta.

CAPÍTULO 5

PROJETO CONCEITUAL DA MÁQUINA RETIFICADORA

Nós cientistas necessitamos especialmente da imaginação. Não bastam a matemática e a lógica, precisamos de um pouco de estética e poesia.

Maria Mitchell (1818-1889).

O processo de projeto conceitual da máquina retificadora foi dividido em cinco etapas: Casa da Qualidade para obter as especificações de projeto, cinemática do processo para conhecer os movimentos necessários para a execução da peça a ser usinada, estrutura de funções para a determinação e a visualização das funções dos diversos componentes constituintes da máquina retificadora e os componentes para a máquina retificadora comparados e avaliados segundo as matrizes de análise. Estas quatro etapas deram subsídios para a quinta etapa do projeto conceitual que foi a concepção da máquina retificadora. O fluxograma da Figura 5.1 apresenta estas etapas:

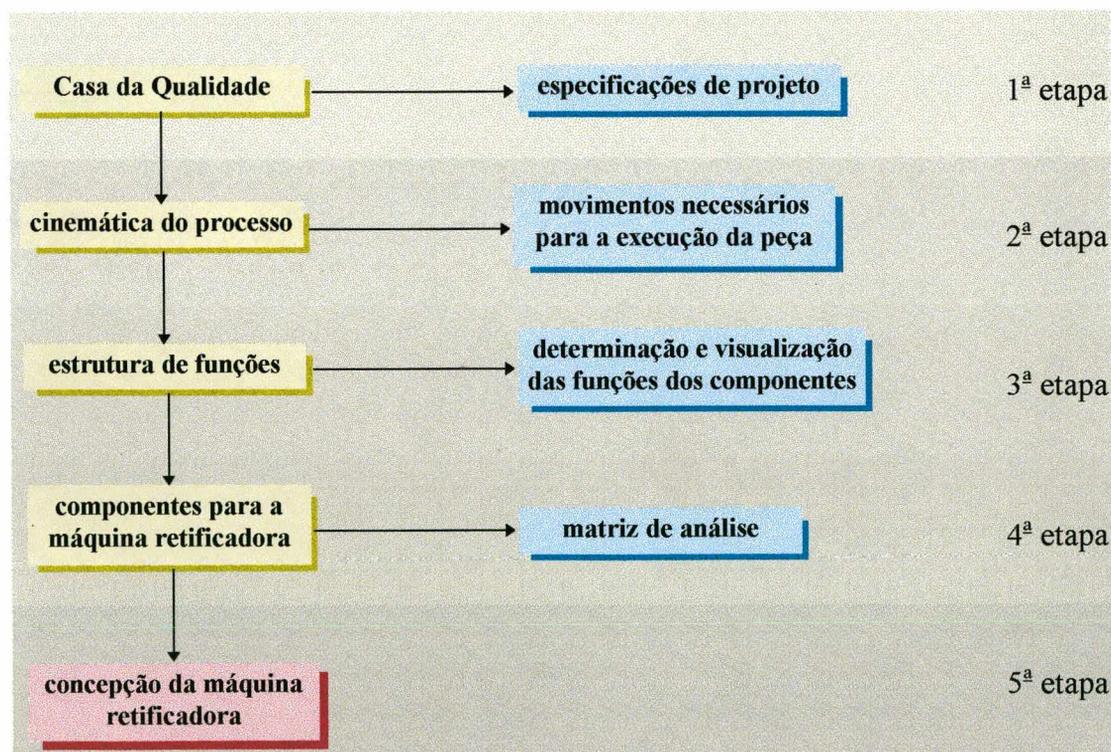


Figura 5.1 - Fluxograma das etapas do projeto conceitual.

A seguir apresenta-se uma descrição detalhada das cinco etapas do projeto conceitual.

5.1 IDENTIFICAÇÃO DAS NECESSIDADES E DEFINIÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES

5.1.1 CLIENTES

Nesta primeira fase do desenvolvimento do projeto de uma retificadora de instrumentos endodônticos apresenta-se uma breve definição e descrição das diversas classes de clientes, as quais estão direta ou indiretamente ligadas com o desenvolvimento e utilização da retificadora. É importante observar que esta máquina está sendo desenvolvida com o propósito de ser utilizada inicialmente em ensaios de usinagem e futuramente na produção seriada de peças. Deste modo, os clientes são classificados em três categorias: clientes externos, clientes intermediários e clientes internos.

- Clientes externos (operação): o termo clientes externos refere-se ao agrupamento de pessoas, instituições ou empresas relacionadas com a utilização da retificadora, ou seja, aquelas que irão produzir os instrumentos endodônticos [24].

Esta classe de clientes é constituída pelo seguinte grupo:

- pesquisadores;
 - fabricante externo de instrumentos endodônticos;
 - usuários externos.
- Clientes intermediários (manutenção, montagem e ajustagem): os clientes intermediários constituem uma segunda classe formada pelas pessoas responsáveis pela embalagem, armazenamento, transporte e manutenção, fundamentais para um eficiente funcionamento da máquina [24].

Esta classe de clientes é constituída pelo seguinte grupo:

- pesquisadores;
 - fabricantes externos de máquinas-ferramentas;
 - usuários externos de máquinas-ferramentas.
- Clientes internos (fabricação, usinagem e fornecedores de componentes): os clientes internos constituem uma terceira classe formada pelas pessoas responsáveis pelo projeto e pela fabricação da retificadora, bem como pelos fornecedores de componentes [24].

Esta classe de clientes é constituída pelo grupo abaixo:

- projetistas;
- técnicos de fabricação;
- fornecedores de componentes.

Após a classificação dos clientes, foram estabelecidas as suas necessidades em relação à máquina retificadora, relacionando-as com cada uma das três classes de clientes previamente definidas. Estas necessidades foram obtidas por meio de um questionário focalizando os interesses e necessidades de cada classe, abordando os principais setores envolvidos com o desenvolvimento e utilização da máquina, tais como setores de projeto, fabricação, manutenção e descarte, fornecedores de componentes e, principalmente, o usuário da retificadora [24].

5.1.2 OBTENÇÃO DA CASA DA QUALIDADE

Para a obtenção da casa da qualidade levantaram-se os requisitos de qualidade do produto relacionados com cada uma das necessidades dos clientes, empregando-se para tanto a técnica de *brain storming*. Com isto, atrela-se os QUÊS (necessidades) com os COMOS (requisitos), apresentando um conjunto de exigências capaz de satisfazer as necessidades dos clientes.

De posse das necessidades e dos requisitos de qualidade passou-se a montar a Casa da Qualidade, que é a primeira matriz do Desdobramento da Função Qualidade (QFD). Para tanto, foi preenchido o corpo da Casa da Qualidade, resultando na matriz de relacionamento entre os requisitos de projeto e as necessidades dos clientes. Após, foram colocados os resultados de avaliações dos clientes (valor do consumidor), gerando uma coluna ao lado da matriz de relacionamento, com um peso para cada necessidade. Estes pesos foram obtidos a partir de uma matriz de interesse entre clientes e necessidades (Anexo 1, Figura A1.1), onde graduou-se a relação entre clientes e necessidades numa interação forte, média ou fraca. Por último, foram determinados os valores de importância para cada um dos requisitos de qualidade, obtidos por meio do produto entre cada coluna da matriz de relacionamento (requisito) e a coluna correspondente ao valor do cliente, de tal forma a possibilitar uma classificação dos requisitos de qualidade, destacando-se os mais importantes que devem ser atendidos preferencialmente pelo projeto da retificadora (Anexo 1, Figura A1.2) [24].

Finalmente, a partir da ordem de classificação dos requisitos de qualidade (classificação

de importância), obteve-se a Tabela 5.1 com as especificações de projeto, destacando as principais especificações que devem ser satisfeitas preferencialmente pelo projeto da retificadora de precisão (prioridades).

Tabela 5.1 - Classificação das especificações de projeto.

pri	pts	esc	requisitos	objetivo	sensor
1	234	5	custo	R\$ 100.000,00	livro caixa
2	195	5	balanceamento do rebolo	batimento radial < 0,05 $\mu\text{m/volta}$ batimento axial < 0,05 $\mu\text{m/volta}$	balanceadora Schenck
3	173	4	desgaste do rebolo	mínima (depende do tipo)	rugosidade da peça
4	160	4	freqüência de manutenção	mínima uma vez por mês	calendário
5	157	4	vibração	amplitude máxima $\leq 0,05 \mu\text{m}$ fora das freqüências naturais	acelerômetro frequencímetro
6	150	4	atrito	baixo	energia consumida
7	145	3	normalização	baixo nº de peças especiais	nº de peças especiais
8	138	3	rigidez	alta	FFT
9	134	3	rigidez da fixação da peça	alta	FFT
10	130	3	balanceamento da árvore	batimento radial e axial $\leq 0,05 \mu\text{m/volta}$	balanceadora Schenck
11	130	3	rugosidade	$R_a \leq 0,5 \mu\text{m}$ e $R_t \leq 1,0 \mu\text{m}$	rugosímetro
12	115	3	deformação da peça	máxima 0,1 %	FFT
13	108	3	confiabilidade de medição	$\pm 0,01 \mu\text{m}$	
14	106	3	erros de forma	linearidade e paralelismo	sistema Waico de medição
15	106	3	erros geométricos	garantia de tolerância dimensional	leitura de medição
16	89	2	energia/tempo	1 kW/h	wattímetro
17	89	2	ergonomia	satisfação do operador	operador
18	83	2	inércia	maximização das partes fixas minimização das partes móveis	FFT
19	81	2	tempo de acesso (comando)	mínima por função (operação)	relógio
20	62	2	freqüência de acidentes	nula	nº de acidentes
21	61	2	pressão da linha	$\pm 7 \text{ bar}$	barômetro
22	59	1	amortecimento	$\xi < 0,5$	FFT
23	55	1	estabilidade térmica	$20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$	termômetro
24	54	1	tempo de resposta ao choque	20 μs	acelerômetro frequencímetro
25	51	1	potência de acionamento	$\pm 1 \text{ kW}$	wattímetro
26	46	1	esforço de acionamento	facilidade do operador	dinamômetro
27	15	1	estabilidade química	sem ataque químico, corrosão, etc.	visual

FFT: *Fast Fourier Transformer*.

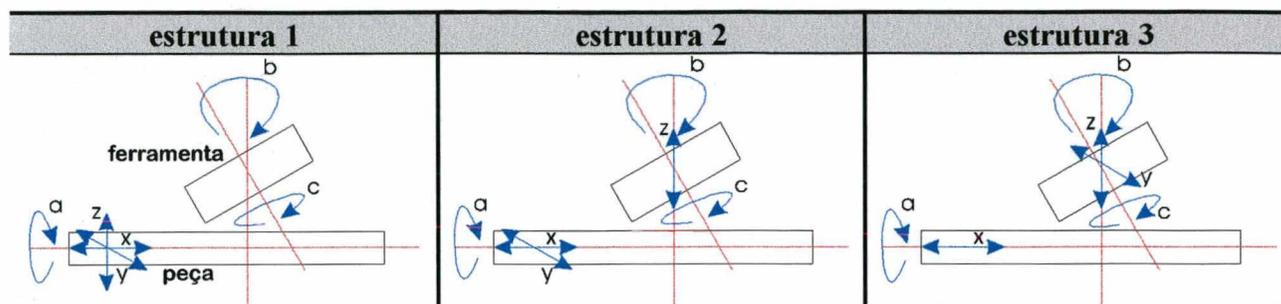
5.2 CINEMÁTICA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Os movimentos relativos entre a peça e a ferramenta podem ser determinados com a ajuda de uma sistematização do processo de usinagem, onde procura-se aliar a ferramenta adequada aos seus respectivos movimentos necessários para a geração da forma da peça. A retificação de uma lima Hedström de geometria cônica-helicoidal e de passo variável é possível por meio do emprego de três movimentos de translação e três movimentos de rotação.

A Tabela 5.2 mostra os movimentos necessários para a usinagem das limas. Os movimentos de translação podem ser distribuídos sistematicamente sobre a peça ou sobre a ferramenta, enquanto os movimentos de rotação permanecem inalterados, no eixo (a) sobre a

peça e nos eixos (b) e (c) sobre a ferramenta.

Tabela 5.2 - Três estruturas diferentes de movimentos necessários para a usinagem das limas.



A estrutura 1 apresenta os movimentos de translação x, y e z distribuídos sobre a peça.

Na estrutura 2 os movimentos de translação x e y permanecem sobre a peça e o movimento de translação z sobre a ferramenta.

Para a estrutura 3 os movimentos de translação z e y estão dispostos sobre a ferramenta e o movimento de translação x permanece na peça.

Com as definições da cinemática do processo, com o estudo do processo e com as dimensões da peça chega-se às exigências (pré-concepção) da máquina-ferramenta, como segue abaixo:

- máquina de pequeno porte;
- cabeçote de alta rotação, de 50.000 a 100.000 rpm (eixo c);
- eixo x de 40 mm de curso controlado;
- eixo y de 40 mm de curso controlado;
- eixo z de 40 mm de curso controlado;
- eixo a de 360° de rotação controlada;
- eixo b de 0 a 45° de giro de posição.

5.3 ESTRUTURA DE FUNÇÕES

A estrutura de funções permite a determinação e a visualização das diversas funções dos elementos constituintes da máquina como um todo, de tal forma que o procedimento de estruturação da máquina, baseado nas funções de seus diferentes subsistemas, possibilite uma análise clara e um estudo objetivando o melhor arranjo a ser implementado [24].

A descrição clássica de função apresenta esta entidade de projeto como sendo uma

relação quantitativa e qualitativa entre entradas e saídas de um sistema, sendo representada por um verbo (Figura 5.1) [25].

5.3.1 FUNÇÃO TOTAL

No caso da retificadora, objeto deste estudo, a função total da máquina é **retificar as limas tipo hedström**, ou instrumentos endodônticos que possuam características superficiais e geométricas semelhantes às das limas. Na Figura 5.2 pode-se observar a representação da função total, suas entradas e saídas [24].

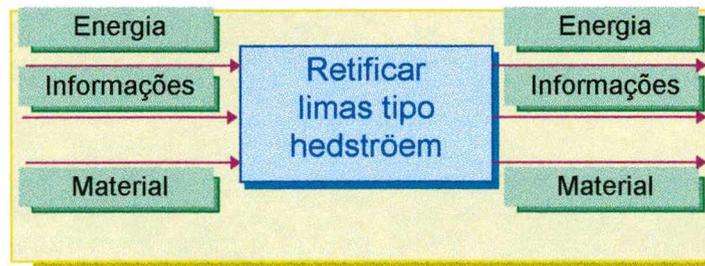


Figura 5.2 - Função total da retificadora.

5.3.2 FUNÇÕES PARCIAIS

Não é possível a otimização de um sistema mecânico diretamente. Normalmente é possível a otimização de subsistemas que podem ser descritos matematicamente, e necessitam unicamente a otimização com poucos critérios [26].

A decomposição de um sistema mecânico é um problema muito comum, para o qual não existe um procedimento sistemático padronizado e nenhuma tentativa de explicação do método ou das leis nas quais está baseado. Contudo, deve ser executada de maneira a assegurar que os subsistemas (funções parciais), após configurados, ainda satisfaçam a função total proposta ao sistema técnico [25; 27].

Deste modo, tendo-se uma idéia qualitativa e quantitativa dos requisitos do projeto da retificadora, identificados na fase anterior, partiu-se para o estabelecimento da estrutura de funções parciais. Assim, estabeleceram-se diferentes diagramas funcionais para a máquina. A determinação da estrutura de funções a ser empregada no projeto considera a máquina como um elemento com três subsistemas básicos mostrados na Figura 5.3 [24]:

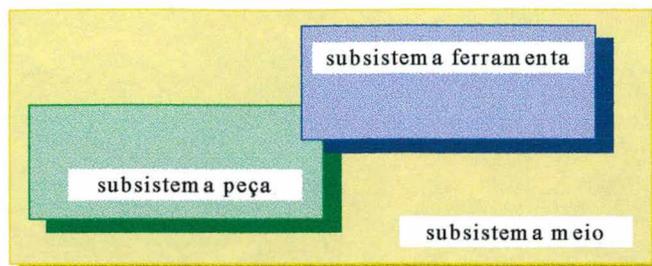


Figura 5.3 - Primeiro desdobramento da função total.

Desdobrando novamente estes subsistemas chega-se a um detalhamento maior, ou seja os sistemas constituintes da máquina retificadora, como mostrado na Figura 5.4.

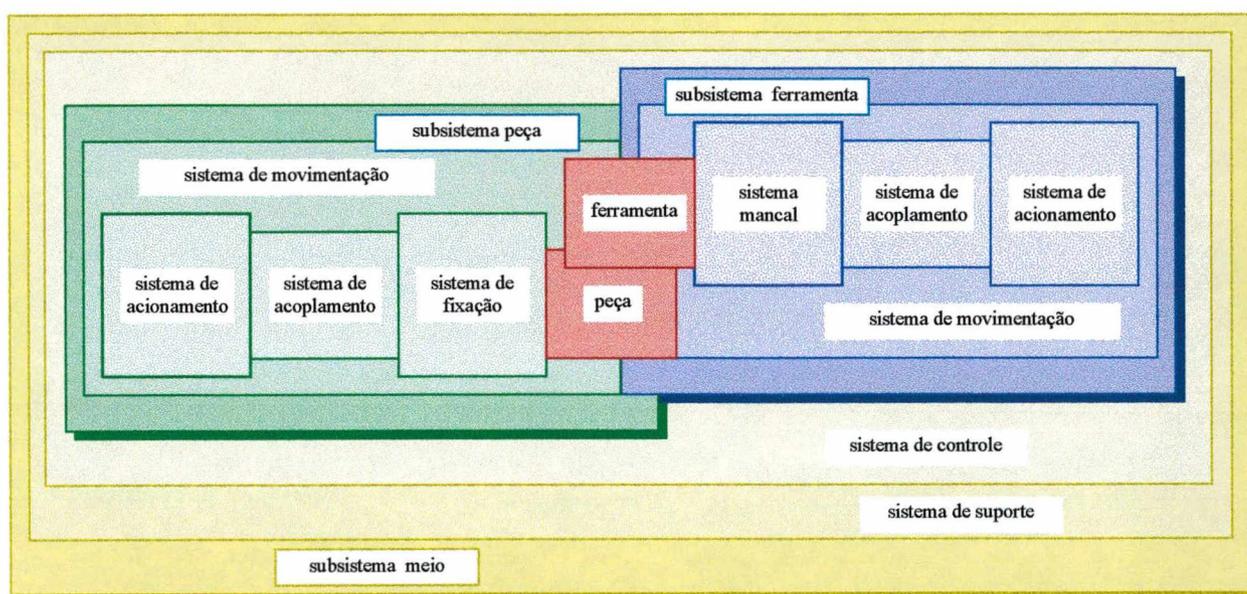


Figura 5.4 - Subsistemas ferramenta, peça e meio mais detalhados.

A seguir apresenta-se uma descrição de todos os componentes dos subsistemas, mostrados na Figura 5.4, na forma de matrizes de análise, nas quais mostram-se as vantagens e as desvantagens de cada elemento em relação aos demais, para a escolha das possíveis concepções para a máquina.

5.4 COMPONENTES PARA A MÁQUINA RETIFICADORA

5.4.1 INTRODUÇÃO

Rigidez e potência são características importantes em máquinas usadas para retificar aços inoxidáveis e super ligas. Máquinas especiais são raramente necessárias, mas as máquinas

comuns devem ter alta rigidez estática e dinâmica para minimizar deflexões, vibrações e folgas. Selecionar a máquina certa e mantê-la em ordem pode aumentar a produtividade com uma redução dos custos, ao mesmo tempo em que ocorre uma melhora da precisão das peças retificadas [10].

A rigidez de uma máquina-ferramenta é limitada pela rigidez de seu componente mais flexível. Assim, tendo-se uma estrutura composta de vários elementos construtivos com rigidez distinta, deve-se efetuar o seu dimensionamento de tal forma que as exigências sejam satisfeitas pelo componente mais flexível [28].

Neste capítulo buscou-se uma revisão de alguns tipos de elementos de máquinas-ferramentas, para que assim se pudesse melhor escolher os utilizados na fabricação da retificadora.

5.4.2 BASES

A principal função de uma base é fornecer rigidez estática e dinâmica para a estrutura da máquina-ferramenta, de modo que esta venha a sofrer as mínimas deformações possíveis quando da ação de carregamentos ou da ação de elementos externos, como por exemplo temperatura [10; 29].

De uma forma geral, as bases de máquinas-ferramentas são fabricadas em ferro-fundido. Algumas tentativas estão sendo realizadas no sentido da substituição deste por concreto polimérico, granito e cerâmicas, entre outros [29].

Mais recentemente, com o desenvolvimento da ciência dos materiais, passou-se a se utilizar materiais com baixo coeficiente de dilatação, como por exemplo o Zerodur (cerâmica vítrea), além de aços especiais tais como o Invar e granitos sintéticos [24].

A seguir serão apresentados alguns materiais utilizados como base de máquinas-ferramentas.

FERRO-FUNDIDO

O uso do ferro-fundido em máquinas-ferramentas é largamente difundido, remontando aos séculos XVIII e XIX, sendo tomado praticamente como regra entre os fabricantes em todo o mundo. A estabilidade do ferro-fundido depende principalmente do resfriamento uniforme e lento no molde após o vazamento, o que por sua vez depende de como o molde foi projetado,

permitindo que o resfriamento se dê por tempo suficiente antes de expô-lo ao ar [24].

GRANITO

O uso de granito como material para base de máquinas-ferramentas, teve origem nas máquinas ópticas. Em função do percentual de seus constituintes, o granito apresenta diversas denominações, geralmente relacionadas com a cor predominante, como por exemplo granito preto e granito rosa, dentre outros. Desta forma a composição do granito aliada ao tamanho de grão determinam a qualidade do granito natural. A grande vantagem da utilização de granito natural está na estabilidade dimensional (térmica), dinâmica e na inexistência de tensões internas [24].

GRANITO SINTÉTICO

Os granitos sintéticos são materiais obtidos a partir de granulados de granito natural, com forma e tamanho definidos, aglutinados por meio de resinas epóxi. As principais vantagens, frente ao granito natural, são a melhoria da capacidade de amortecimento e a facilidade na obtenção de formas, no entanto não é simples conseguir um elevado grau de empacotamento durante a fabricação deste material [24].

CONCRETO

O concreto é definido como um composto de areia, cascalho, pedra moída, ou outros agregados unidos por uma massa pastosa de cimento e água. A mistura dos ingredientes, em proporções adequadas, forma uma massa plástica que pode ser fundida ou moldada em formas pré-determinadas. O uso de concreto como elemento estrutural em máquinas-ferramentas tem sido utilizado na Europa por alguns fabricantes de máquinas especiais, notadamente em bases e colunas. As vantagens do uso do concreto, à base de cimento *Portland*[®], estão na abundante experiência acumulada por usuários e centros de pesquisa em todo o mundo, principalmente na engenharia civil, e seu baixíssimo custo ($\approx R\$ 80,00/m^3$). O concreto como elemento estrutural em máquinas-ferramentas melhora sensivelmente a capacidade de amortecimento de vibrações [24].

CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos apresentam muitas vantagens em relação aos materiais tradicionais, tais como aço, alumínio e granito. Os principais tipos de materiais cerâmicos utilizados em

máquinas-ferramentas são a alumina (Al_2O_3), alumina reforçada e carboneto de silício, além de materiais especiais tais como Zerodur. As principais vantagens do uso de materiais cerâmicos como elementos estruturais em máquinas-ferramentas, estão na alta rigidez, estabilidade dimensional, térmica, resistência ao desgaste e resistência química. Por outro lado, suas principais desvantagens estão na baixa capacidade de amortecimento, que pode ser contornada por meio do uso de amortecedores e dissipadores estruturais, dificuldade de usinagem e custo [24].

5.4.3 MATRIZ DE ANÁLISE DOS TIPOS DE MATERIAIS PARA BASE

No item anterior apresentou-se uma descrição dos diferentes tipos de materiais para base utilizados em máquinas-ferramentas. A Tabela 5.3 mostra uma comparação das propriedades mais importantes desses materiais.

Tabela 5.3 - Matriz de análise dos materiais para base [24].

parâmetros	ferro-fundido	granito	granito sintético	concreto	cerâmica
custo					
trabalhabilidade					
rigidez					
amortecimento					
estabilidade dimensional					
resistência química					
resistência mecânica					

 BAIXO
  MÉDIO
  ALTO
  MUITO ALTO

5.4.4 ÁRVORE DE ACIONAMENTO

As árvores de acionamento são um dos componentes mais sensíveis no projeto de uma máquina-ferramenta de precisão. Seu erro de movimentação e estabilidade dinâmica e térmica refletem diretamente no resultado final da usinagem.

As características desejáveis são alcançadas com uma correta escolha do tipo de mancalização que suportará os esforços da usinagem, assim como os esforços provenientes da máquina.

MANCAIS

O mancal ideal para máquinas de precisão deve ter a característica principal de reter sua posição no espaço, independente dos valores de carga, como velocidade, força de cisalhamento, vibrações, influências térmicas, etc.. É claro que um mancal que mantém sua posição no espaço com absoluta precisão não existe, pois o rotor do mancal muda constantemente sua posição relativa a um sistema de coordenadas fixo, e onde as suas propriedades estáticas, dinâmicas, geométricas e térmicas possuem uma interdependência com os valores das cargas aplicadas. Deste modo, para que se projete o sistema mancal corretamente faz-se necessário uma rápida revisão dos diversos mancais existentes para depois definir qual será o utilizado no escopo do trabalho [29; 30; 31].

A) MANCAL DE ROLAMENTO

Cabeçotes utilizando mancais de rolamento têm atingido muitas aplicações em máquinas-ferramentas convencionais. As maiores vantagens destes mancais estão na padronização internacional e na relativa simplicidade para o cálculo aplicativo, bem como sua seleção. Estes mancais são relativamente compactos, podem suportar cargas pesadas, são facilmente instalados, mantidos e repostos [32; 33; 34].

Os mancais de rolamento são fabricados e selecionados segundo classes de precisão. Mesmo para classes de precisão de giro mais elevadas não se consegue uma fidelidade de giro absoluta. Este erro é devido à imprecisão de fabricação dos casquilhos e das esferas dos rolamentos, que apresentam variações dimensionais e de forma e, ainda, decorrente de erros de montagem dos rolamentos nos componentes. Em consequência, têm-se trajetórias não circulares, que podem levar à ruptura do filme lubrificante e a flutuações complementares da posição do eixo de rotação [31].

A Figura 5.5 mostra uma árvore de acionamento com mancais de rolamento de um torno de precisão da empresa FAG, que pode produzir furos com rugosidade de até $1\mu\text{m}$ [35].

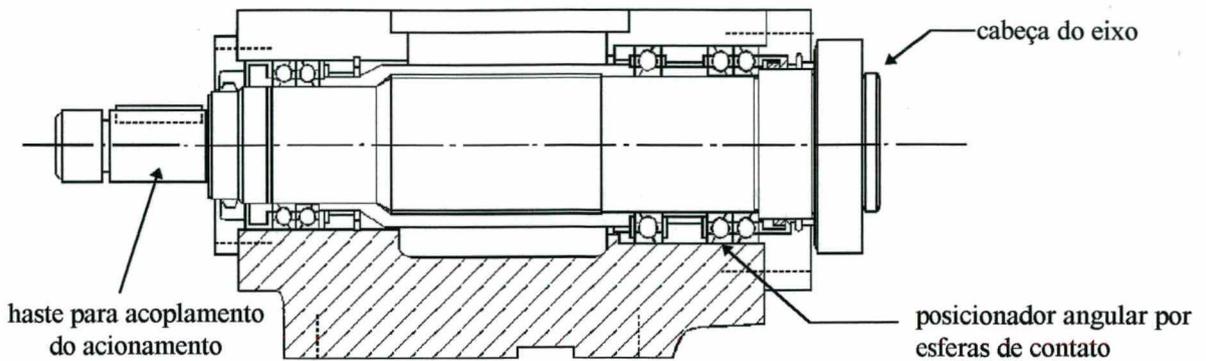


Figura 5.5 - Árvore de acionamento da empresa FAG com mancais de rolamento [35].

Para máquinas-ferramentas de precisão costuma-se utilizar mancais de rolamento do tipo (Figura 5.6):

- esféricos (contato angular);
- rolos cônicos;
- rolos cilíndricos.

Elemento Rolante Esférico de Contato Angular		VANTAGENS → BAIXO ATRITO → FÁCIL INSTALAÇÃO → LUBRIFICAÇÃO MESMO EM ALTAS VELOCIDADES	DESVANTAGENS → BAIXA RIGIDEZ
Elemento Rolante Cônico		VANTAGENS → ALTA RIGIDEZ	DESVANTAGENS → DIFÍCIL INSTALAÇÃO → LUBRIFICAÇÃO POR SPRAY DE ÓLEO → ALTA PERDA DE POTÊNCIA
Elemento Rolante Cilíndrico		VANTAGENS → ALTA RIGIDEZ RADIAL	DESVANTAGENS → ALTA PERDA DE POTÊNCIA → NECESSITA DE UM MANCAL AXIAL ADICIONAL

Figura 5.6 - Tipos de mancais de rolamento [32].

B) MANCAL MAGNÉTICO

Os mancais magnéticos agem suspendendo o eixo-rotor do fuso dentro de um campo magnético gerado entre eletroímãs opostamente colocados. Em princípio, como não há

absolutamente nenhum contato metal-metal, enquanto o campo magnético está atuando não há atrito, não há necessidade de lubrificação, há pouca geração de calor e rigidez elevada, mas dependendo da potência o calor das bobinas tem de ser dissipado através de um fluxo controlado de um refrigerante (ar, água ou óleo).

A Figura 5.7 mostra uma árvore de acionamento de máquina-ferramenta construída com mancais eletromagnéticos, mostrando seus componentes básicos.

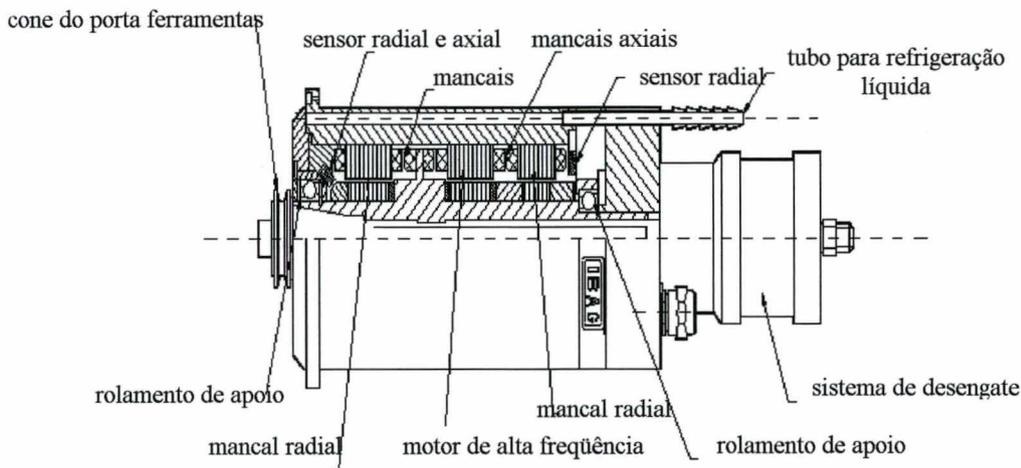


Figura 5.7 - Configuração básica de uma árvore de acionamento com mancais eletromagnéticos [34].

Os eletroímãs têm um circuito elétrico composto de um amplificador de potência, um microprocessador e um sensor de posição. Quando o sensor detecta que o eixo-rotor distanciou-se do seu magneto associado, o microprocessador aumenta a corrente no magneto trazendo o eixo-rotor para mais perto. Com a colocação dos eletroímãs em posições opostas os sensores mantêm o rotor continuamente centralizado.

A centralização no sentido radial, portanto, é obtida por dois pares de eletroímãs que circundam o eixo-rotor exercendo uma força magnética no mesmo. Um mancal magnético em separado posiciona o eixo axialmente [36].

Para proteger o mancal contra sobrecargas ou falhas eletrônicas, eles são montados sobre mancais de rolamento auxiliares, com folga igual à metade da folga do mancal eletromagnético [32; 34].

Devido a excelente rigidez proporcionada por estes mancais, sua principal aplicação se dá em fusos de alta velocidade, onde pode-se atingir rotações entre 10.000 e 100.000 rpm. Apesar de não haver geração de calor por atrito entre as partes metálicas, os mancais

eletromagnéticos apresentam a desvantagem de geração excessiva de calor devido às correntes parasitas, o que torna necessária a utilização de refrigeração [33].

C) MANCAL HIDRODINÂMICO

Os mancais hidrodinâmicos representam o que há de mais antigo, simples e barato na tecnologia de mancais, e ainda são utilizados na construção de máquinas [32].

Em mancais hidrodinâmicos as superfícies em movimento relativo são separadas por um filme fluido que é arrastado para dentro da fenda de separação pelo próprio movimento, gerando uma pressão no filme fluido, causada pelo movimento relativo entre as duas superfícies. Isto resulta numa fenda dependente da velocidade relativa e do carregamento do eixo, conforme ilustrado na Figura 5.8 [34].

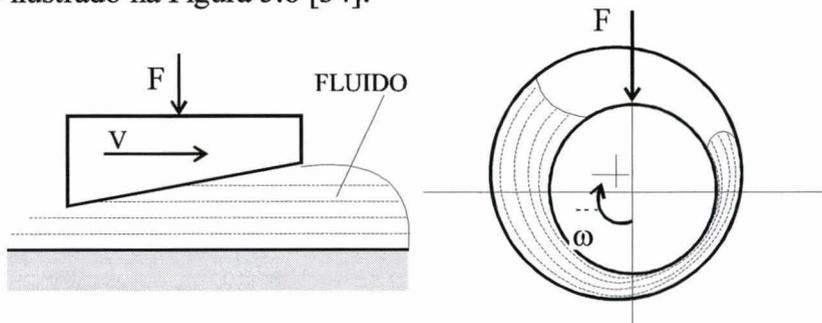


Figura 5.8 - Representação esquemática do princípio de formação de um filme fluido lubrificante em mancais hidrodinâmicos [34].

Quanto maior a velocidade relativa entre as superfícies do rotor e do estator, maior será a pressão de sustentação gerada e o deslocamento do centro de rotação do mancal. Este mancal apresenta desgaste na partida. Retificadoras, onde se mantém o rebolo em movimento o dia inteiro, apresentam desgaste extremamente pequeno [32].

Em função deste princípio operacional, a fabricação de peças de precisão utilizando este tipo de mancal é extremamente difícil, se não impossível, pois o mancal muda sua posição espacial em função da velocidade angular e carga aplicada [32].

D) MANCAL HIDROSTÁTICO

Os mancais hidrostáticos utilizam um filme fino de óleo para suportar a carga. Geralmente a espessura deste filme de óleo está na ordem de grandeza de 5 a 100 μm [32].

Os mancais hidrostáticos têm grande aplicação em máquinas-ferramentas convencionais

e de precisão. Isto é devido à sua grande vantagem de separação entre dois componentes da máquina, parte estática (estator) e parte rotativa (rotor), com um filme permanente de óleo. Estes mancais são isentos de desgaste e devido ao constante filme de lubrificante não apresentam o fenômeno de *stick-slip*, mesmo a baixas velocidades [32].

A Figura 5.9 mostra a forma de uma árvore de precisão com mancais hidrostáticos [37].

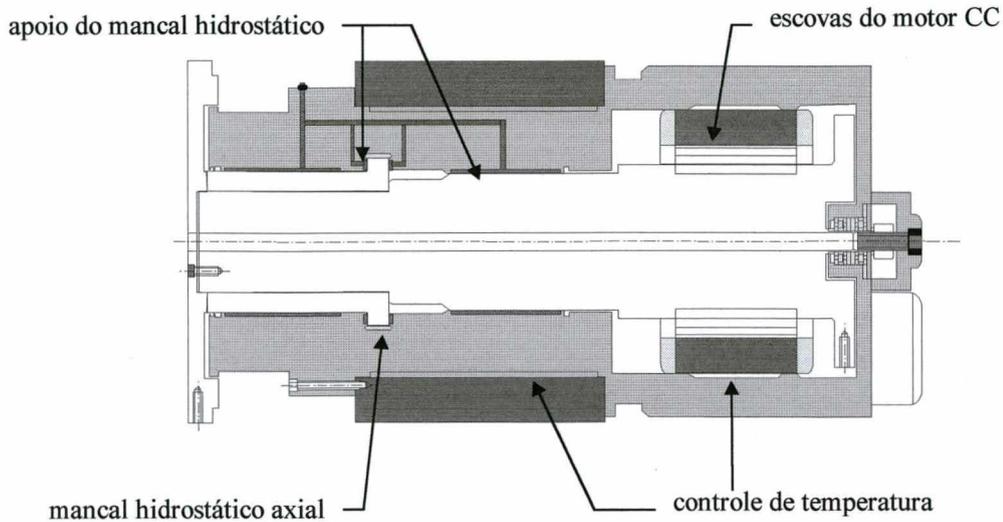


Figura 5.9 - Representação esquemática do corte da árvore de precisão com mancais hidrostáticos [37].

Com o aumento da velocidade relativa aumenta a geração de calor no mancal. Para fluidos com elevada viscosidade, como os óleos, a vazão do fluido é insuficiente para transportar o calor gerado para fora da fenda do mancal, de forma que para se conseguir uma estabilização do sistema faz-se necessária uma refrigeração complementar [34].

A variação da temperatura do líquido lubrificante leva a uma variação da viscosidade do mesmo, refletindo diretamente sobre a característica de funcionamento do mancal [34].

Estas duas limitações têm restringido as aplicações dos mancais hidrostáticos a velocidades relativamente baixas [34].

Na Figura 5.10 mostra-se uma variedade de formas básicas de mancais hidrostáticos. Se a classificação está baseada na direção principal de carregamento, consegue-se discernir três grupos principais de mancais:

- mancais radiais;
- mancais combinados (radiais e axiais);
- mancais axiais.

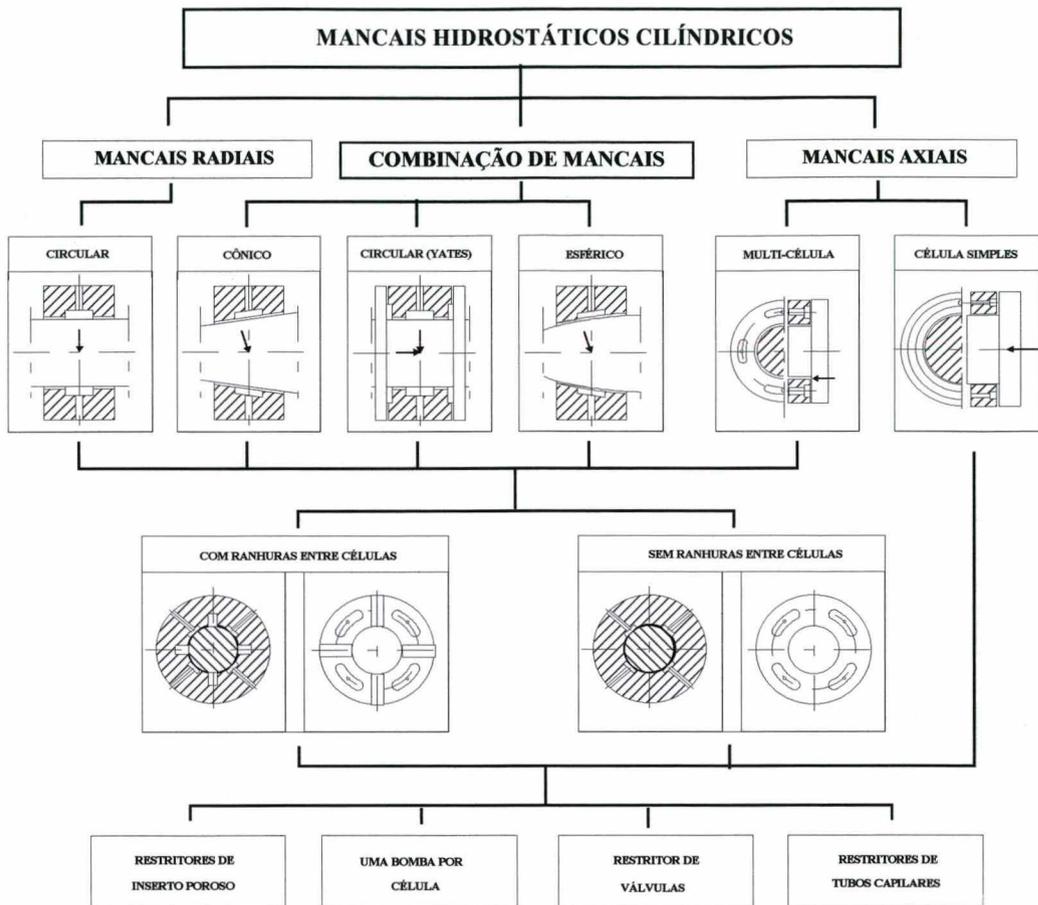


Figura 5.10 - Classificação dos mancais hidrostáticos [35].

Todos operam no princípio de suportar o carregamento com um filme fino de alta pressão de óleo que flui continuamente para fora do mancal. Portanto, faz-se necessária a utilização de uma fonte de suprimento de óleo a alta pressão, bem como uma forma de coletá-lo novamente e realimentá-lo no sistema. Isto exige filtros maiores, uma vez que se corre o risco de contaminação do óleo [32; 34].

E) MANCAL AEROSTÁTICO

Os mancais aerostáticos seguem o mesmo princípio de funcionamento dos hidrostáticos, sendo o ar pressurizado externamente e alimentado para dentro da folga do mancal. A diferença está apenas nas propriedades do lubrificante utilizado. A viscosidade do ar é 3 a 4 ordens de grandeza menor que a do óleo, além de ser também praticamente independente da temperatura. A utilização de ar como lubrificante requer folgas muito pequenas entre rotor e estator, a fim de se conseguir altas capacidades de carga e rigidez,

conseqüentemente aumentam as dificuldades e custos de fabricação [32; 34].

As perdas por atrito nestes mancais são muito pequenas devido à baixa tensão de cisalhamento do meio gasoso. Entretanto, para aplicações em altas velocidades, o aquecimento não pode ser negligenciado uma vez que o fluxo e o calor específico do ar são baixos.

Os mancais aerostáticos funcionam muito suavemente, possuem alta repetibilidade de movimento e apresentam erros de concentricidade de rotação muito baixos. Os erros de batimento estão relacionados basicamente com os erros geométricos das partes constituintes do mancal.

Costuma-se aplicar pressões de ar de 4 a 15 kgf/cm² na folga do mancal, a qual varia normalmente de 5 a 25 µm. A capacidade de carga é resultante da distribuição de pressão efetiva na fenda do mancal, enquanto que a rigidez é função da forma da fenda e do tipo de restritor que controla a taxa de fluxo no interior da fenda. Embora a sua capacidade de carga e rigidez sejam menores que a dos mancais hidrostáticos, como as forças aplicadas na usinagem de precisão e ultraprecisão são pequenas, eles satisfazem estes requisitos, sendo os mais utilizados, principalmente nas guias e em árvores de máquinas-ferramentas de ultraprecisão [32; 34].

Na Figura 5.11 tem-se a classificação destes mancais aerostáticos [32; 33].

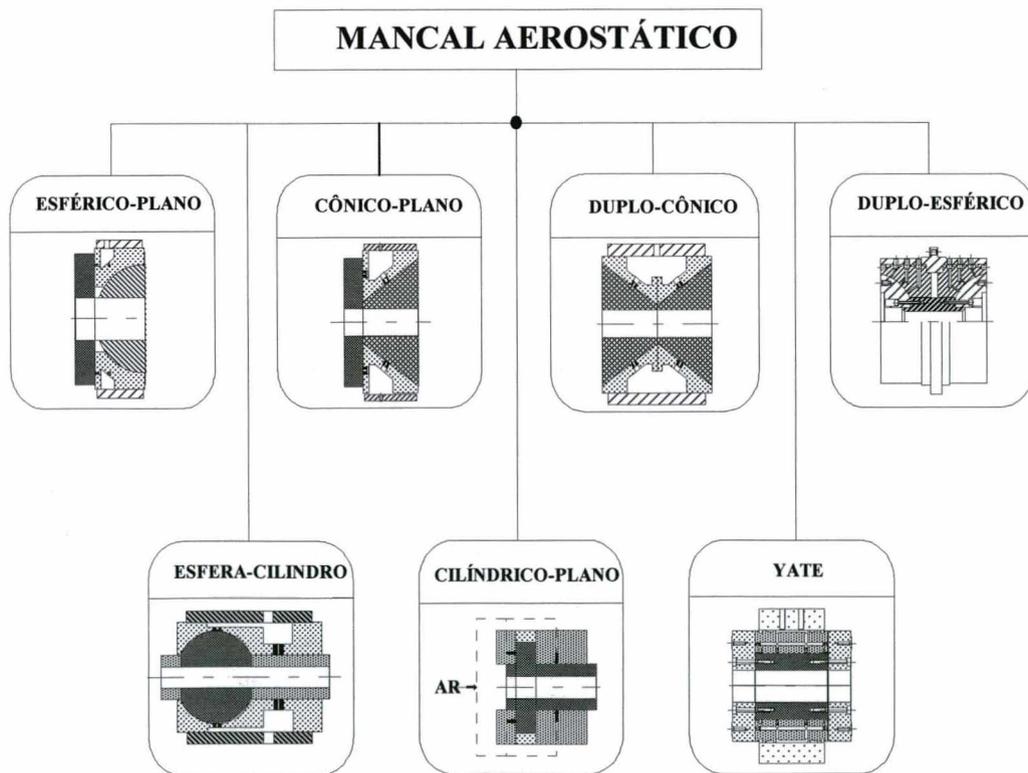


Figura 5.11 - Classificação de mancais aerostáticos [32].

Uma das aplicações de maior sucesso de mancais aerostáticos tem sido em árvores para retificação. Baixas forças de corte e pequenos carregamentos dinâmicos são particularmente adequados para a aplicação de mancais aerostáticos para cabeçotes porta-rebolo e cabeçotes porta-peça. Outra grande aplicação é em cabeçotes para retificação interna, os quais podem atingir altas velocidades, acionados por turbinas a ar ou motor elétrico integrado, que têm a vantagem de ter um movimento de baixo nível de vibrações, gerando um melhor acabamento superficial do componente retificado [30; 38].

A Figura 5.12 mostra uma árvore de uma máquina para retificar grandes componentes ópticos, a OAGM 2500 da *Cranfield Precision Engineering Ltd.* [30].

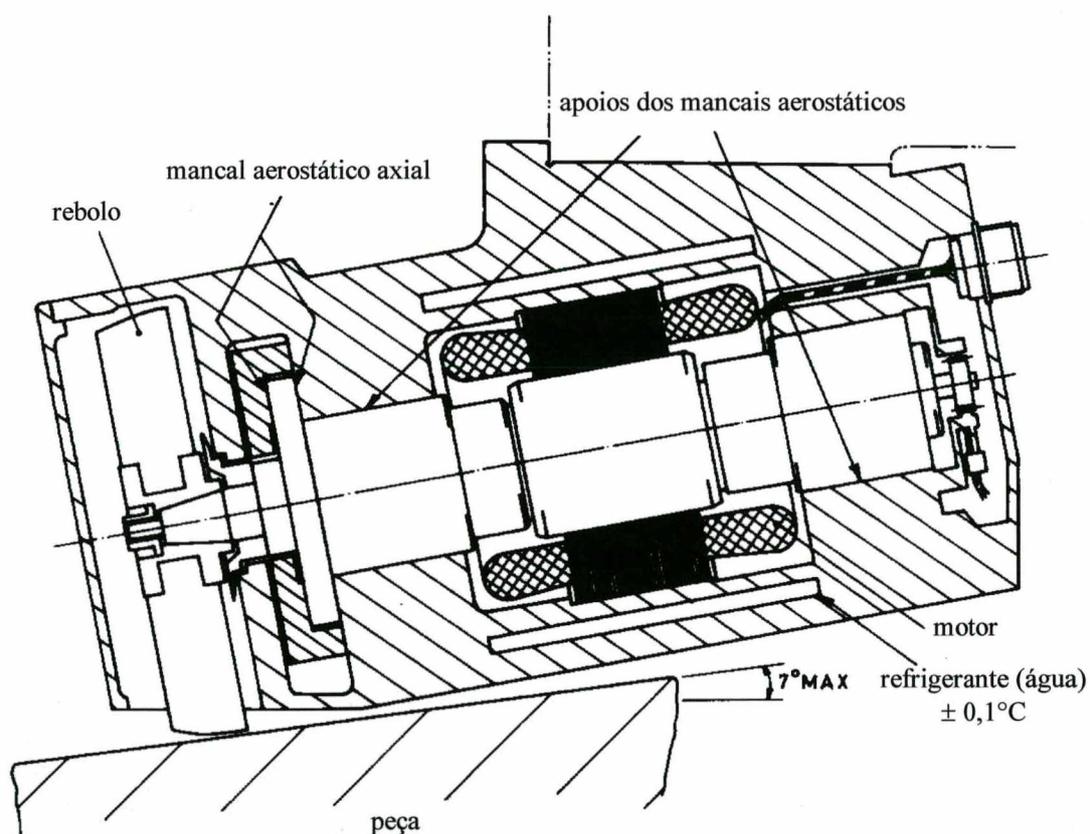


Figura 5.12 - Representação esquemática do corte da árvore de acionamento da retificadora OAGM 2500 [30].

MATRIZ DE ANÁLISE DOS TIPOS DE MANCAIS

A Tabela 5.4 apresenta um quadro comparativo entre algumas características dentre diversos tipos de mancais.

Tabela 5.4 - Matriz de análise dos mancais [32; 35].

parâmetros	mancal de rolamento	mancal magnético	mancal hidrodinâmico	mancal hidrostático	mancal aerostático
parâmetros de alta rotação					
vida					
precisão de giro					
amortecimento					
rigidez					
necessidade de lubrificação					
coeficiente de atrito					
custo					



BAIXO



MÉDIO



MÉDIO/ALTO



ALTO

ACIONAMENTOS

A correta utilização de um determinado tipo de acionamento, em uma máquina-ferramenta, depende da sua seleção, levando em consideração as necessidades dinâmicas da máquina, sem exceder às limitações de torque e de temperatura desse acionamento. O primeiro passo na seleção do motor vem com a determinação das características de carga, força, torque, velocidade e ciclo completo, que afetam sua força e sua aceleração [31].

A seguir serão descritos alguns motores elétricos e turbinas a ar utilizados em cabeçotes de precisão para máquinas-ferramentas [30]:

A) MOTOR CA DE INDUÇÃO

O estator é formado por dois enrolamentos (tipicamente), sendo que estes são alimentados com uma corrente senoidal defasada de 90° , o que causa um campo magnético rotativo. Este motor apresenta as propriedades de [30; 31; 32; 39]:

- ✓ são os mais simples e baratos;

- ✓ construção robusta e acionamento mais simples;
- ✓ facilidade de frenagem;
- ✓ não têm escovas;
- ✓ não têm enrolamento no rotor;
- ✓ praticamente livres de manutenção;
- ✓ possibilitar potência elevada;
- ✗ surgimento de vibrações torcionais causadas pelo campo girante.

B) MOTOR CA SÍNCRONO DE RELUTÂNCIA

Quando um objeto de ferro, como um bastão, é posicionado em um campo magnético, este objeto fica magnetizado. Como resultado, os dois campos tendem a se alinhar e um torque é gerado. Quando os objetos estão alinhados a relutância é mínima, e este efeito é denominado de torque de relutância. Criando-se um campo rotativo no estator, um rotor com barras de ferro em configuração radial irá seguir este campo girante. Algumas características destes motores são[30; 31; 32]:

- ✓ elevado torque a baixas velocidades;
- ✓ praticamente não necessitam de manutenção;
- ✗ necessidade de método de partida auxiliar.

C) MOTOR CA SÍNCRONO DE HISTERESE

O rotor destes motores é feito de uma peça sólida de material magneticamente duro. Gerando-se um campo magnético rotativo no enrolamento do estator, induz-se um campo magnético no rotor. Contudo, devido à histerese no rotor de ferro, seu campo persegue, com certa defasagem, o campo rotativo. O resultado é a geração de torque no rotor que tenta minimizar este atraso em relação ao campo girante. Algumas características são [30; 32]:

- ✓ baixos valores de vibração torcional;
- ✓ trabalha em faixas de velocidades muito estáveis;
- ✗ baixo torque;
- ✗ inércia bastante grande;
- ✗ grande aquecimento do rotor.

D) MOTOR CC COM ESCOVAS

Neste motor, um campo magnético estacionário é induzido no enrolamento do estator do motor com corrente contínua, e um campo rotativo é induzido na bobina rotativa, com uma corrente CC sendo transferida para o rotor do motor por escovas que fazem contato com um anel segmentado, o comutador. Algumas características deste motor são [30; 31; 32; 40]:

- ✓ não há componentes de alta frequência;
- ✓ facilidade de variação da velocidade, torque e potência disponível;
- ✓ regulação precisa da velocidade;
- ✓ velocidade constante sob carga;
- ✓ aceleração ou desaceleração controlada;
- ✓ facilidade de frenagem;
- ✗ desenvolvimento de vibrações mecânicas no comutador;
- ✗ ocorrência de faiscamento no comutador;
- ✗ as escovas exigem manutenção;
- ✗ impossibilidade de redução da inércia em função de o servomotor possuir enrolamento no rotor e estator;
- ✗ troca de calor dos enrolamentos do rotor.

E) MOTOR CC SEM ESCOVAS

No motor CC sem escovas o campo magnético do rotor é gerado por ímãs permanentes. Neste, utiliza-se um sistema de controle para criar um campo magnético rotativo no estator do motor, de modo que o conjunto de ímãs do rotor tende a seguir este campo proporcionando assim o giro do mesmo. Algumas características pertinentes a este motor são [30; 32, 41]:

- ✓ não há correntes induzidas no rotor, não havendo geração de calor;
- ✓ ótima relação tamanho/potência;
- ✓ rápida resposta dinâmica;
- ✓ baixo momento de inércia;
- ✓ manutenção reduzida, pois praticamente não há componentes eletromecânicos sujeitos ao

desgaste;

- ✓ baixo nível de ruído e vibrações;
- ✗ custo bastante elevado (unidade de controle).

F) TURBINA A AR

As turbinas a ar podem ser empregadas para acionamento de árvores de máquinas-ferramentas de precisão em casos que exigem velocidades extremas (acima de 50.000 rpm), como no caso de micro e pequenas furadeiras ou retificadoras (Figura 5.13). As turbinas de reação apresentam como desvantagens a necessidade de um balanceamento muito cuidadoso, além de baixo torque e tempos de aceleração relativamente grandes, quando comparadas com acionamentos elétricos [30]. As turbinas de deslocamento positivo são compactas e apresentam aceleração rápida. Em decorrência do atrito, entre as palhetas e a carcaça, apresentam rotação máxima limitada.

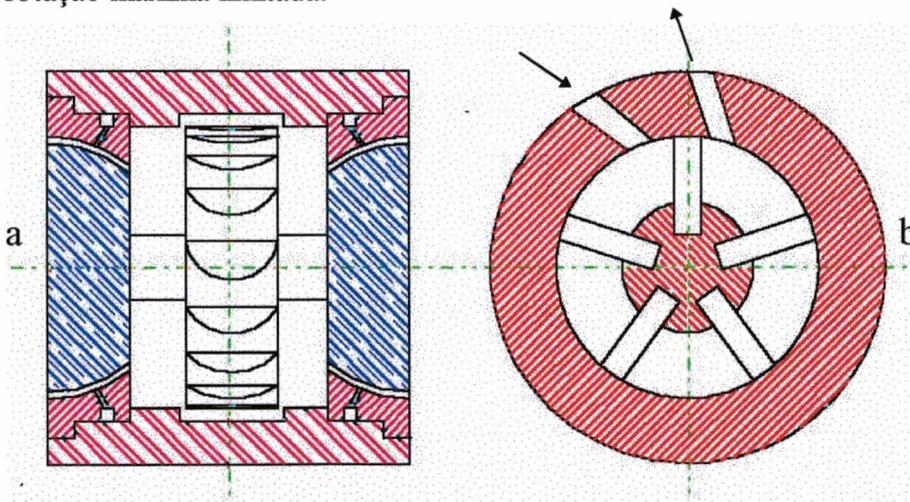


Figura 5.13 - Turbina de reação a ar com mancais aerostáticos do LMP (a) e rotor de palhetas móveis (turbina de deslocamento positivo) (b).

Os sistemas de ar comprimido possuem maior gasto de energia devido a perdas de pressão e rendimento nos dutos de ar, assim como perdas por calor na compressão do ar [42].

MATRIZ DE ANÁLISE DOS TIPOS DE ACIONAMENTO

A Tabela 5.5 apresenta a comparação entre algumas características dos cinco motores e das duas turbinas a ar.

Tabela 5.5 - Matriz de análise dos acionamentos.

parâmetros	CA de indução	CA síncrono relutância	CA síncrono de histerese	CC com escovas	CC sem escovas	turbina de reação	turbina desl. positivo
custo							
dinâmica							
torque							

 BAIXO
  MÉDIO
  MÉDIO/ALTO
  ALTO

ACOPLAMENTOS

Acoplamentos são necessários para unir eixos com desalinhamentos ou mesmo com angulações diferentes. São elementos destinados a unir eixos, compensando os erros de alinhamento e afastamento axiais, já que os comprimentos comerciais dos mesmos estão limitados pelo processo de fabricação. Muitos acoplamentos transmitem forças radiais de um eixo a outro. Ao acoplar-se um eixo de motor a uma árvore de precisão, é importante prevenir a transmissão de vibrações no eixo do motor à árvore ou ao fuso [30; 31]. Estas vibrações podem ser causadas pelo desbalanceamento do rotor, ou da assimetria das linhas do campo magnético do motor. O acoplamento pode evitar a transmissão de vibração do motor para a árvore enquanto mantém um alto grau de rigidez torcional [30].

Os acoplamentos deverão ser peças isentas de folgas, resistentes à torção e com inércia reduzida. Dependendo das necessidades podem-se utilizar os seguintes tipos: rígidos, de engate e de compensação [31].

Os acoplamentos rígidos são os mais comuns e conservam os dois eixos numa posição invariável, girando em volta do mesmo eixo geométrico. São utilizados somente quando os eixos são coincidentes e, por causa da dificuldade prática de se colocar e manter duas árvores em alinhamento exato, podem induzir tensões que acarretam falhas por fadiga e desgaste.

Os acoplamentos de engate são aqueles em que há possibilidade de conexão e desconexão com as árvores em movimento.

Já os acoplamentos de compensação permitem, dentro de certos limites, uma mudança de posição entre eixos. Este movimento pode ser axial (e), transversal (s) ou angular (a)

(Figura 5.14). Se estes deslocamentos não forem retirados poderão ocasionar um mal funcionamento de eixos, mancais, desgrenamento de rodas dentadas, etc. [31].

Existem seis tipos básicos de acoplamentos para aplicações de precisão, que podem trabalhar com torques bidirecionais [30].

- acoplamento de foles;
- acoplamento helicoidal;
- acoplamento por diafragma;
- acoplamento por correia;
- acoplamento em cadeia tipo *link*;
- acoplamento *Hooke e Cardan*.

Qualquer que seja o tipo de acoplamento escolhido, nunca deverá ser usado um parafuso fixador para prender um acoplamento a um eixo de precisão, mas sim um anel elástico que aperte o eixo [30].

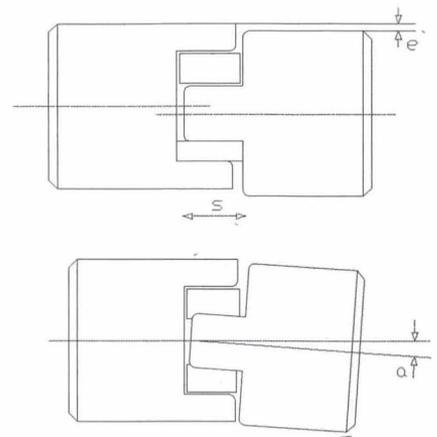


Figura 5.14 - Deslocamentos.

A) ACOPLAMENTO DE FOLES

Um acoplamento de foles é mostrado na Figura 5.14. Acoplamentos de foles fornecem, talvez, a maior ação de acoplagem de qualquer acoplamento flexível, mas tem proporcionalmente uma menor rigidez torcional. São geralmente usados em aplicações onde níveis de torque são menores do que 10 Nm. Para muitas aplicações em máquinas de precisão, as velocidades não são usualmente um fator limitante para o uso de acoplamentos de foles e, assim, podem ser ajustados para suportar milhões de ciclos sem falhar [30].

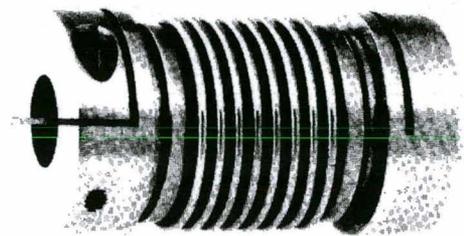
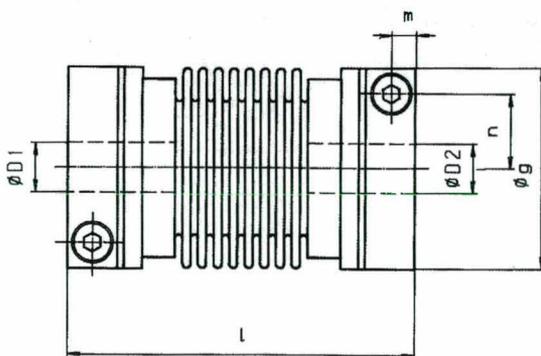


Figura 5.15 - Acoplamento de foles [43].

B) ACOPLAMENTOS HELICOIDAIS

Os acoplamentos helicoidais são compostos de molas helicoidais de seção retangular integradas às extremidades do acoplamento. Usualmente são fresadas em um cilindro com diâmetros externo e interno adequados ao torque e deslocamentos desejados. A hélice pode ser de uma, duas ou mais entradas. Os acoplamentos helicoidais possuem inércia dependente da carga, alta rigidez torcional e transmite baixas e médias cargas com precisão (Figura 5.16) [30;31].

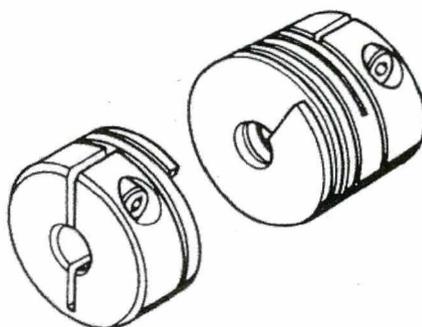


Figura 5.16 - Acoplamento helicoidal em corte [44].

Os acoplamentos helicoidais trabalham bem em muitos tipos de sistemas rotativos. Aplicações típicas incluem parafusos de avanço, *encoders*, caixas de engrenagens, bombas, sistemas de esteiras transportadoras e roletes usualmente acionados por motores elétricos. Acomodam desalinhamentos radiais e angulares. Movimentos axiais entre as duas pontas de eixos são absorvidas pelos feixes helicoidais. Eles podem ser produzidos com a especificação de rigidez torcional e com uma larga faixa de capacidades de torque. Como são acoplamentos de uma peça, não existem folgas.

Pelo projeto, o movimento rotacional na extremidade de saída do acionamento pode ser assumido como o mesmo do movimento de entrada, para velocidades constantes.

Alumínio de alta tensão é sempre usado para aplicações de acoplamento de *encoders*. Aço inoxidável de alta tensão são usualmente usados onde são necessárias altas capacidades de torque, rigidez e resistência à corrosão [30].

C) ACOPLAMENTO EM CADEIA (TIPO *LINK*)

Um acoplamento tipo *link* usa elementos flexíveis, e pode ser feito para ter grandes ações invariáveis de acoplagem do que os acoplamentos anteriores, porque os *links* podem ser

feitos de muitas peças finas de aço mola. Relembrando, grandes ações de acoplamento levam a menor rigidez torcional [30].

D) ACOPLAMENTO POR DIAFRAGMA

Acoplamentos por diafragma são mostrados na Figura 5.17. Eles geram cargas radiais três vezes menores no eixo e têm duas vezes mais rigidez torcional do que outros acoplamentos flexíveis. Como muitos tipos de acionamentos flexíveis, estes podem ser usados em diferentes rotações, contudo a limitação da velocidade depende da carga, desalinhamento, tamanho, entre outros [30].

Nestes acoplamentos o torque é transmitido através de diafragmas metálicos de contorno circular ou de forma livre. Permitem desalinhamentos angulares e radiais, as folgas podem ser nulas e a inércia dependente da carga [44].

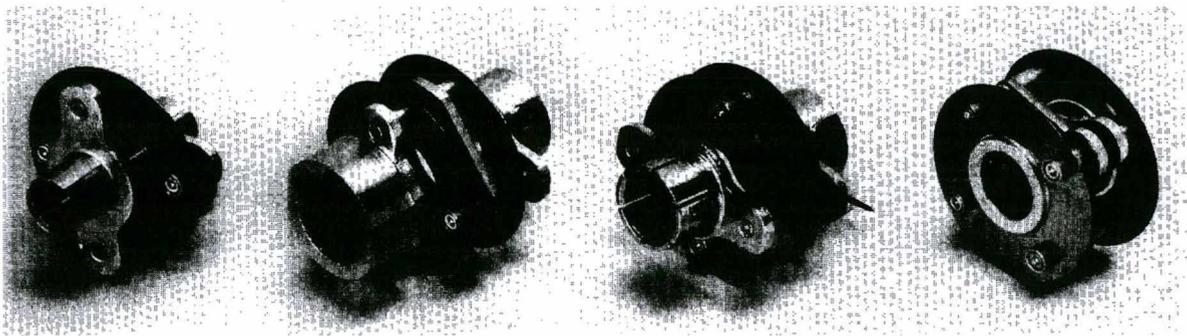


Figura 5.17 - Acoplamentos por diafragma [30].

E) ACOPLAMENTO *CARDAN* E *HOOKE*

Estes acoplamentos possuem um elemento central acoplador em forma de cruz, nos acoplamentos *Cardan*, e na forma de anel nos acoplamentos *Hooke*, e possuem dois eixos pivôs que fazem um ângulo reto com o ponto de interseção dos eixos (Figura 5.18) [45].

A Figura 5.19a é um exemplo de um acoplamento *Cardan* com elemento acoplador cilíndrico, ou tipo *Aranha*, que tem um par de parafusos como pivô. Para serviços mais leves uma esfera com um par de ranhuras pode ser usada como elemento acoplador, como mostra a Figura 5.19b. Os extremos dos quatro prolongamentos são ligeiramente curvos em torno da esfera, para prevenir qualquer desalinhamento axial [45].

Para grandes torques usam-se acoplamentos *Hooke*, que propiciam bons resultados

com o seu emprego em ângulos de inclinação menores do que 20° [46].

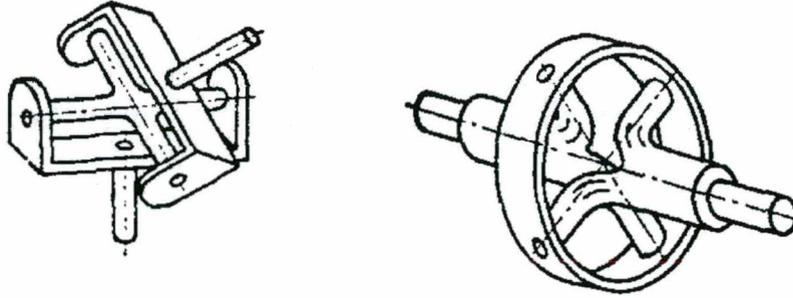


Figura 5.18 - Acoplamentos *Cardan* e *Hooke* [46].

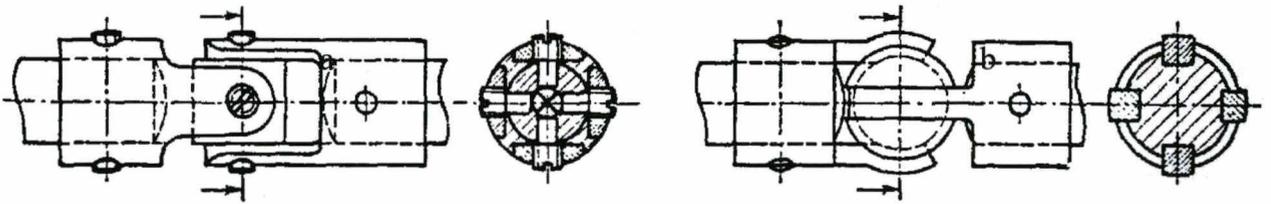


Figura 5.19 - Acoplamentos *Cardan*; (a) com elemento acoplador cilíndrico e (b) com elemento acoplador esférico [46].

F) ACOPLAMENTO POR CORREIA

Se uma longa correia elástica e contínua for usada para transmitir potência de um eixo (exemplo: eixo de motor) a outro (fuso) pequenos deslocamentos do eixo do motor afetam insignificadamente a tensão da correia. Portanto as forças de vibrações do motor não seriam transmitidas ao fuso através do dispositivo de acoplagem. Quando o comprimento da correia estiver paralelo à direção não sensível (exemplo: direção vertical em um torno T-base), o fuso não terá qualquer erro de movimentação na direção sensível causada pelo motor. É importante que a correia seja contínua, para não existirem emendas que causem erros periódicos. Uma correia chata de fibra (exemplo: fios de seda) também tem uma maior distribuição dos amortecimentos do que, por exemplo, uma correia de elastômero. A correia também serve para ajudar a isolar termicamente o fuso do motor. Como os requisitos de precisão dos fusos são na ordem dos micrometros, as assimetrias magnéticas dos motores elétricos podem causar forças que gerem níveis inaceitáveis dos movimentos assíncronos dos fusos. Portanto, ironicamente, as máquinas de precisão podem ver um retorno dos velhos dias, onde longas correias acoplavam motores aos fusos [30].

MATRIZ DE ANÁLISE DOS TIPOS DE ACOPLAMENTOS

Algumas características dos acoplamentos serão mostradas na Tabela comparativa 5.6.

Tabela 5.6 - Matriz de análise dos acoplamentos utilizados em mecânica de precisão.

parâmetros	de foles	helicoidais	diafragma	tipo link	Hooke/Cardan	por correia
ação de acoplagem						
rigidez torcional						

 BAIXO
  MÉDIO
  MÉDIO/ALTO
  ALTO

5.4.5 GUIAS

Guias são elementos estruturais que permitem a um membro deslizar ao longo de outro em um dado padrão. Em guias lineares o padrão de movimento é retilíneo e geralmente restrito a um grau de liberdade.

As guias são um dos elementos fundamentais, e constituem uma parte delicada de uma máquina-ferramenta, responsável por guiar a ferramenta na região de corte. Assim como todas as demais partes de uma máquina-ferramenta, estas devem ser construídas suficientemente rígidas, para que as variações de forma, que se originam da ação de forças estáticas e dinâmicas, assim como dos movimentos, não venham a exceder a limites estabelecidos, prejudicando tanto a exatidão geométrica quanto dimensional [33].

As deformações se manifestam em virtude das tensões e flexões, ou também em consequência de vibrações. A forma e a precisão das dimensões das peças fabricadas dependem do tipo, magnitude e direção das deformações na máquina.

Em geral, embora existam diferentes maneiras construtivas que podem ainda variar de fabricante para fabricante, as guias lineares mantêm concepções gerais, sendo as formas mais simples, as de seção transversal cilíndricas e as prismáticas [30]:

- Guias cilíndricas: são a forma mais simples de guias lineares, e encontram muitas aplicações em mecânica de precisão, tais como em unidades de disco flexíveis, impressoras e outros periféricos de computadores.

- Guias prismáticas: são amplamente utilizadas em máquinas-ferramentas durante séculos, e suas formas construtivas variam de fabricante para fabricante. Observando a evolução das máquinas-ferramentas através dos anos, podemos concluir que estas sempre se utilizaram de guias prismáticas, para a absorção de forças, independente da posição plana ou inclinada, sendo que o deslizamento entre o carro porta-ferramenta e as guias é garantido por um filme lubrificante, que tanto pode ser líquido como sólido.

O elemento móvel pode envolver completa ou parcialmente a guia, vindo daí a denominação de guias abertas ou fechadas. O envolvimento completo assegura que o elemento móvel não seja arrancado da guia quando ocorrer uma translação por meio de uma rotação indesejada (Figura 5.20). As guias podem ainda ter prevenção contra a rotação do elemento móvel em torno do eixo de translação que pode ser executada por meio de restrições internas ou externas [24; 33].

As guias podem ser classificadas segundo a maneira pelo qual ocorre o contato entre as partes móveis e fixas, e são chamadas de guias de escorregamento, guias de rolamento e guias a filme fluido.

GUIAS DE ESCORREGAMENTO

Estes sistemas de guias são os mais comuns em máquinas-ferramentas (Figura 5.21), e a movimentação ocorre pelo deslizamento entre duas superfícies (geralmente metálicas). Existem quatro tipos mais comuns destas guias, classificadas segundo suas características geométricas, que são:

- guias planas;
- guias em V;
- guias “rabo de andorinha”;
- guias cilíndricas.

Devido ao elevado atrito e *stik-slip* surgiram muitas melhorias nos sistemas de lubrificação destas guias e no grau de acabamento superficial, como a utilização de insertos de materiais com menor rugosidade superficial (*teflon*[®]) aplicado sobre uma das superfícies.

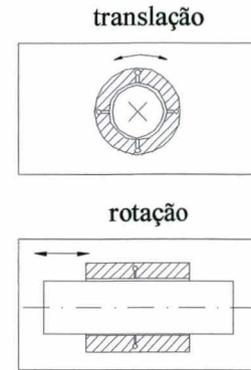


Figura 5.20 - Movimentos.

As características gerais destas guias são:

- alto coeficiente de atrito estático;
- elevada rigidez estática;
- coeficiente de atrito dinâmico crescente para velocidades elevadas.

Atualmente, devido às exigências das máquinas modernas em relação às altas velocidades de trabalho e redução da potência dos sistemas, este tipo de guias está sendo substituído por outros mais eficientes [29; 30; 33].

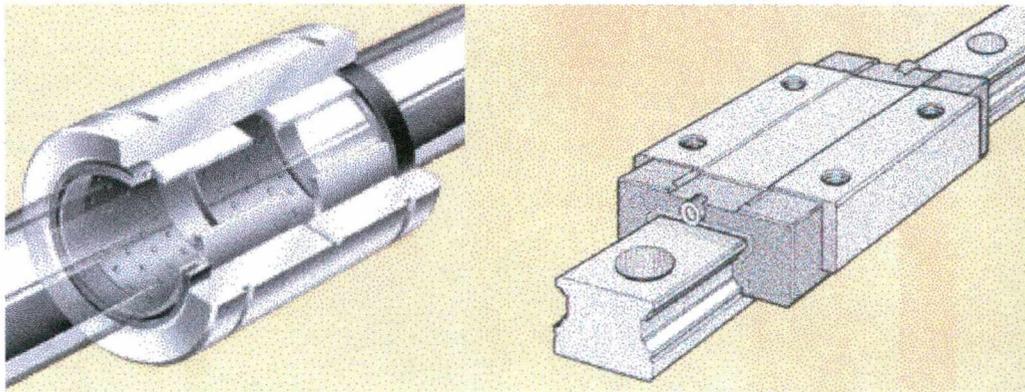


Figura 5.21 - Guias de escorregamento cilíndrica [47] e prismática [48].

GUIAS DE ROLAMENTO

Nestas ocorre o rolamento entre componentes mecânicos da parte móvel, do sistema de guias, sobre a parte fixa (Figuras 5.22 e 5.23). O primeiro sistema de guias baseado em elementos rolamentos lineares de que se tem notícias surgiu na França, em 1932. Tratava-se de uma guia com duas carreiras de esferas recirculantes montadas em um bloco que deslizava sobre um trilho com canais em forma circular. As guias de elementos rolantes, em máquinas-ferramentas, apresentam como principais vantagens:

- maior precisão de posicionamento;
- maior velocidade de avanço, permitindo um aumento de produtividade de 20 a 30%.

Os bons resultados apresentados pelas guias lineares com elementos rolantes devem-se às forças de suporte puramente elásticas, as quais são produzidas por deformação elástica de contato das esferas. Contudo, estas guias apresentam um campo de utilização limitado, tanto pela rigidez possível de se obter, quanto pelo baixo ou inexistente amortecimento, o que diminui sua precisão no deslocamento [29; 30].

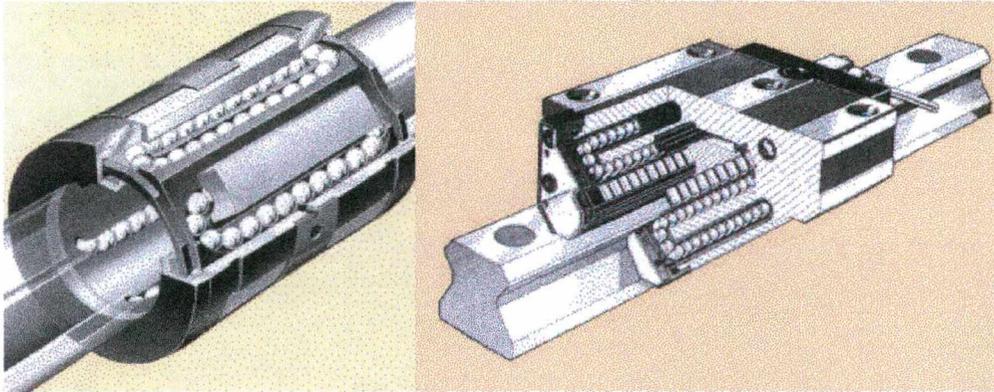


Figura 5.22 - Guias de rolamento cilíndrica [47] e prismática [48].

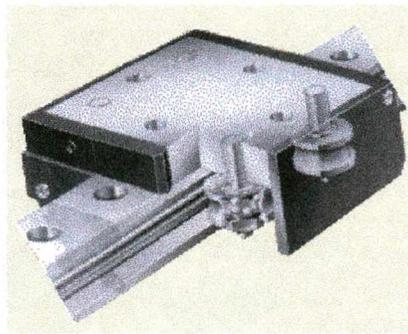


Figura 5.23 - Guia de elementos rolantes prismática [48].

GUIAS A FILME FLUIDO

Os principais fluidos em uso atualmente são óleo e ar, e apresentam as mesmas vantagens e desvantagem do seu emprego em mancais a filme fluido (hidrodinâmicos, hidrostáticos e aerostáticos). Publicações recentes apontam para o uso de água como fluido lubrificante em guias e mancais. Da demanda por maiores precisões e velocidades, e das limitações apresentadas pelas guias de escorregamento ou de elementos rolantes, foram desenvolvidas guias hidrostáticas, lubrificadas a óleo e a ar. As guias lubrificadas a filme fluido proporcionam características superiores, o que vem a se somar com as vantagens encontradas nas guias com elementos rolantes, sendo as que mais se destacam são:

- deslocamento suave, isento de *stick-slip*;
- possibilidade de deslocamentos rápidos;

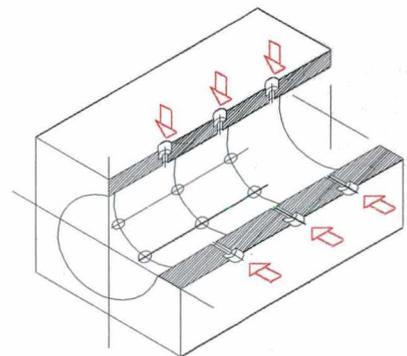


Figura 5.24 - Desenho esquemático de uma guia aerostática [33].

- capacidade de carga alta para as guias a óleo e baixa para as guias a ar;
- elevada precisão de posicionamento, devido à inexistência de atrito;
- baixo amortecimento e elevada rigidez.

Guias lubrificadas a filme fluido empregadas em máquinas-ferramentas de ultraprecisão e instrumentos de medição (Figura 5.24), requerem um projeto específico, uma fabricação apurada e, conseqüentemente, são elementos caros [29].

5.4.6 MATRIZ DE ANÁLISE DOS TIPOS DE GUIAS LINEARES

A Tabela 5.7 apresenta um comparativo de algumas propriedades das guias lineares descritas anteriormente.

Tabela 5.7 - Matriz de análise dos tipos de guias lineares.

parâmetros	guia de escorregamento		guia de rolamento		guia de elementos rolantes externos		guia a filme fluido	
	cilíndrica	prismática	cilíndrica	prismática	cilíndrica	prismática	cilíndrica	prismática
custo								
cap. de carga								
rigidez								
amortecimento								
prec. deslocam.								
desgaste								



BAIXO



MÉDIO



ALTO



MUITO ALTO

5.4.7 FUSOS

Os fusos são utilizados para transformar o movimento rotativo (por exemplo, de um motor) em movimento de translação retilínea. A seguir serão comentados os fusos de deslizamento e de esferas recirculantes.

FUSOS DE DESLIZAMENTO SIMPLES

Os fusos de deslizamento simples consistem de uma porca, também chamada de castanha, que se movimenta transversalmente sobre um parafuso que gira (Figura 5.25). O contato é de escorregamento entre duas superfícies metálicas, resultando numa eficiência baixa e elevado coeficiente de atrito. Além disto as folgas decorrentes do desgaste, que ocorre entre o parafuso e a castanha, são proporcionais ao uso e há dificuldades de se prever o tempo de vida útil. As vantagens incluem a capacidade de auto-travamento no modo de transmissão invertida, baixo custo inicial, facilidade de fabricação, grande gama de materiais que podem ser empregados e rigidez elevada [31].

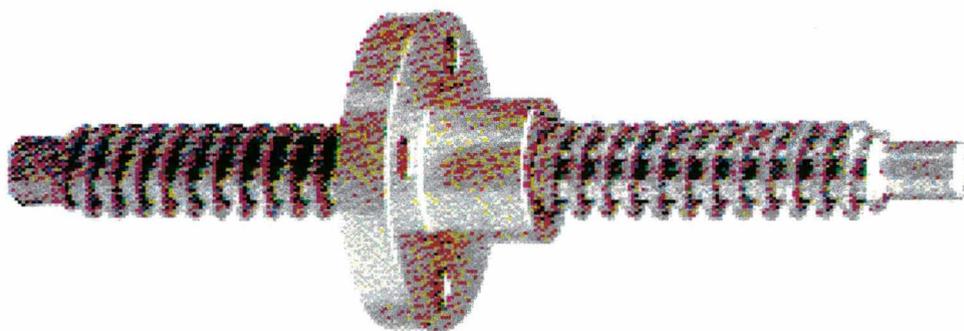


Figura 5.25 - Fuso de deslizamento simples [49].

FUSOS DE DESLIZAMENTO A FILME FLUIDO

Os fusos de deslizamento a filme fluido são iguais aos fusos de deslizamento simples e possuem a vantagem do baixo coeficiente de atrito encontrado, já que o deslizamento se dá sobre um fluido (ar ou óleo), não havendo praticamente desgaste. Podem ser dos tipos hidrostáticos e aerostáticos, e necessitam de instalações para pressurização dos fluidos. São aplicados somente em casos especiais devido ao seu elevado custo [31].

FUSOS DE ESFERAS RECIRCULANTES

Os fusos de esferas recirculantes (Figura 5.26) apresentam um funcionamento bastante semelhante aos fusos de deslizamento, tendo contudo, um ou mais circuitos de esferas localizados entre o fuso e a castanha, que executam um caminho fechado de circulação através dos dispositivos recirculantes. O maior número de partes móveis, comparado com os fusos de

deslizamento simples, provoca uma maior dificuldade de ajuste, principalmente quanto à rigidez. O fuso tem roscas com formas que permitem a condução das esferas helicoidalmente em torno do parafuso.

Para aumentar a rigidez e eliminar folgas utilizam-se dois tipos de pré-carga:

- Pré-carga de tração: onde se separam as castanhas, produzindo um esforço de tração no fuso. Neste caso, o aumento de temperatura produz uma diminuição da pré-carga (Figura 5.27);
- Pré-carga de compressão: nesta as castanhas juntam-se, produzindo um esforço de compressão no fuso. O aumento de temperatura produz um aumento da pré-carga (Figura 5.27) [27].



Figura 5.26 - Fuso de esferas recirculantes [50].

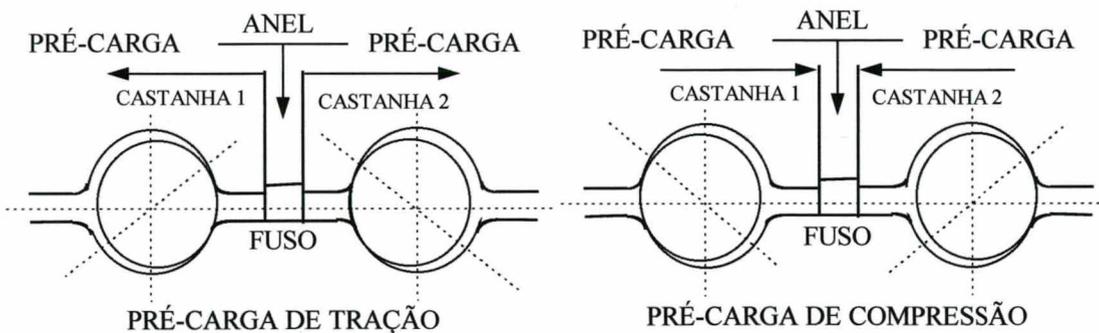


Figura 5.27 - Pré-carga de tração e pré-carga de compressão [50].

As vantagens dos fusos de esferas são a longa vida útil de serviço, devido à baixa taxa de desgaste, à alta eficiência de trabalho para qualquer modo de transmissão, e à ausência de folgas, principalmente quando se usa pré-carga entre castanha, fuso e esferas. Uma desvantagem é a limitada escolha de material para a fabricação e o alto custo relativo em relação aos fusos de deslizamento simples [31].

5.4.8 MATRIZ DE ANÁLISE DOS TIPOS DE FUSOS

Algumas características dos fusos mostradas na Tabela comparativa 5.8.

Tabela 5.8 - Matriz de análise dos fusos.

parâmetros	de deslizamento simples	de deslizamento à filme fluido	de esferas recirculantes
coeficiente de atrito			
desgaste			
precisão de deslocamento			
custo			

 BAIXO
  MÉDIO
  ALTO
  MUITO ALTO

5.4.9 SENSORES

Em máquinas-ferramentas de precisão, a resolução de posicionamento depende diretamente do sistema de medição utilizado para realimentação da posição e as técnicas convencionais de controle resultam ser insuficientes para atender as exigências de precisões geométricas e dimensionais.

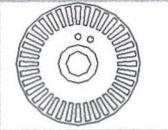
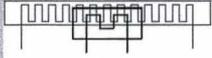
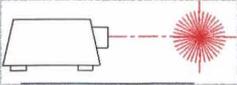
O sistema de controle em malha fechada é o mais adequado para este tipo de máquina, com a realimentação do sistema feita pelo sistema de medição.

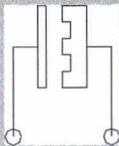
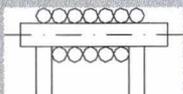
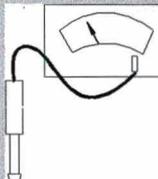
O comum é a utilização de somente um sistema de sensoramento de posição na realimentação, mas atualmente a dupla realimentação vem se mostrando mais vantajosa, pois permite um melhor controle do processo em precisão e alta precisão [29].

SENSORES DE POSIÇÃO

A Tabela 5.9 apresenta a matriz de análise dos sensores de posição rotativos e lineares.

Tabela 5.9 - Matriz de análise dos sensores de posição.

parâmetros	ROTATIVOS	LINEARES		
	ENCODER 	RÉGUA ÓPTICA 	ESCALA INDUTIVA 	LASER 
custo				
precisão				
estabilidade				
velocidade de leitura				

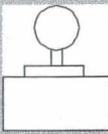
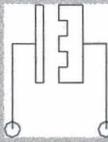
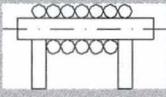
parâmetros	LINEARES			
	CAPACITIVO 	INDUTIVO 	MECÂNICO 	MECÂNICO/INDUTIVO 
custo				
precisão				
estabilidade				
velocidade de leitura				

 BAIXO
  MÉDIO
  MÉDIO/ALTO
  ALTO
  MUITO ALTO

SENSORES DE FIM DE CURSO

Os sensores de fim de curso têm por função evitar que, ante eventuais falhas do sistema de posição dos carros, os mesmos não venham a provocar danos na estrutura por choque. A Tabela 5.10 apresenta a matriz de análise dos sensores de fim de curso.

Tabela 5.10 - Matriz de análise dos sensores de fim de curso.

parâmetros	MECÂNICO-ELET.	CAPACITIVO	INDUTIVO	ÓPTICO-ELET.
				
custo				
eficiência				



BAIXO



MÉDIO

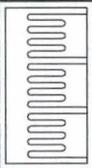


ALTO

5.4.10 FIXAÇÃO

O sucesso na fabricação de precisão pode ser extremamente dependente do sistema de fixação utilizado para suportar a peça durante a usinagem. A fixação deve ser utilizada de forma que não provoque deformações provenientes de apertos de castanhas, pinças e parafusos, sendo que os sistemas mais comuns são os dispositivos especiais (colagem, embutimento e outros), placas de vácuo, magnética e térmica. A Tabela 5.11 apresenta a matriz de análise dos sistemas de fixação.

Tabela 5.11 - Matriz de análise dos sistemas de fixação.

parâmetros	MECÂNICA				MAGNÉTICA	TÉRMICA
	PLACA	PINÇA	VÁCUO	DISPOSITIVO		
custo						
deformação peça						
sujeição						
precisão						



BAIXO



MÉDIO



ALTO



MUITO ALTO

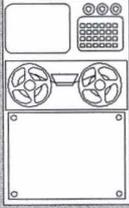
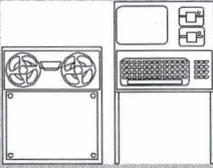
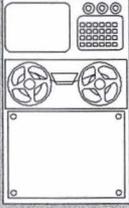
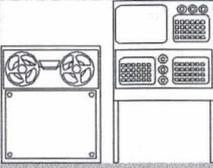
5.4.11 COMANDO NUMÉRICO

O comando numérico é considerado como o cérebro da máquina, responsável por gerenciar as ações dos movimentos e sistemas auxiliares (refrigeração, aspiração, vácuo e etc.), servindo de interface entre o usuário externo e a máquina.

Os comandos podem ser classificados como abertos, quando são adaptáveis em qualquer máquina, ou fechados, quando se deseja explorar características específicas de uma determinada máquina. Os comandos também podem ser classificados como autônomos, quando a eletrônica está contida em um pacote auto-suficiente, ou dependente, quando o comando é montado como hospedeiro em outro computador, atuando de forma semi-independente e trocando informações constantemente com este. Os comandos numéricos fornecidos para plataformas PC apresentam a vantagem de serem de arquitetura aberta, permitindo a implementação de *softwares* e *hardwares* específicos para melhora do controle [29].

A Tabela 5.12 apresenta a matriz de análise dos comandos, relacionando os tipos com a forma de avaliação dos comandos.

Tabela 5.12 - Matriz de análise dos comandos numéricos.

TIPO	Aberto		Fechado	
	Autônomo	Dependente	Autônomo	Dependente
				
custo				
resolução de interpretação				
facilidade de programação				
flexibilidade de hardware				
capacidade de armazenamento				
velocidade de processamento				



5.5 CONCEPÇÃO DA MÁQUINA-FERRAMENTA

A seguir são apresentadas as diferentes estruturas de funções dos três subsistemas básicos, ferramenta, peça e meio descritos na Seção 5.3, os elementos funcionais da máquina, bem como suas relações para a solução escolhida dentre as várias possibilidades pesquisadas através das matrizes de análise e que seriam viáveis para a concepção e construção da máquina. Para a escolha dos componentes deve-se levar em consideração a classificação das especificações de projeto (Tabela 5.1) e exigências da máquina-ferramenta (Seção 5.2).

A Figura 5.28 mostra a descrição do subsistema ferramenta, assim como os componentes escolhidos.

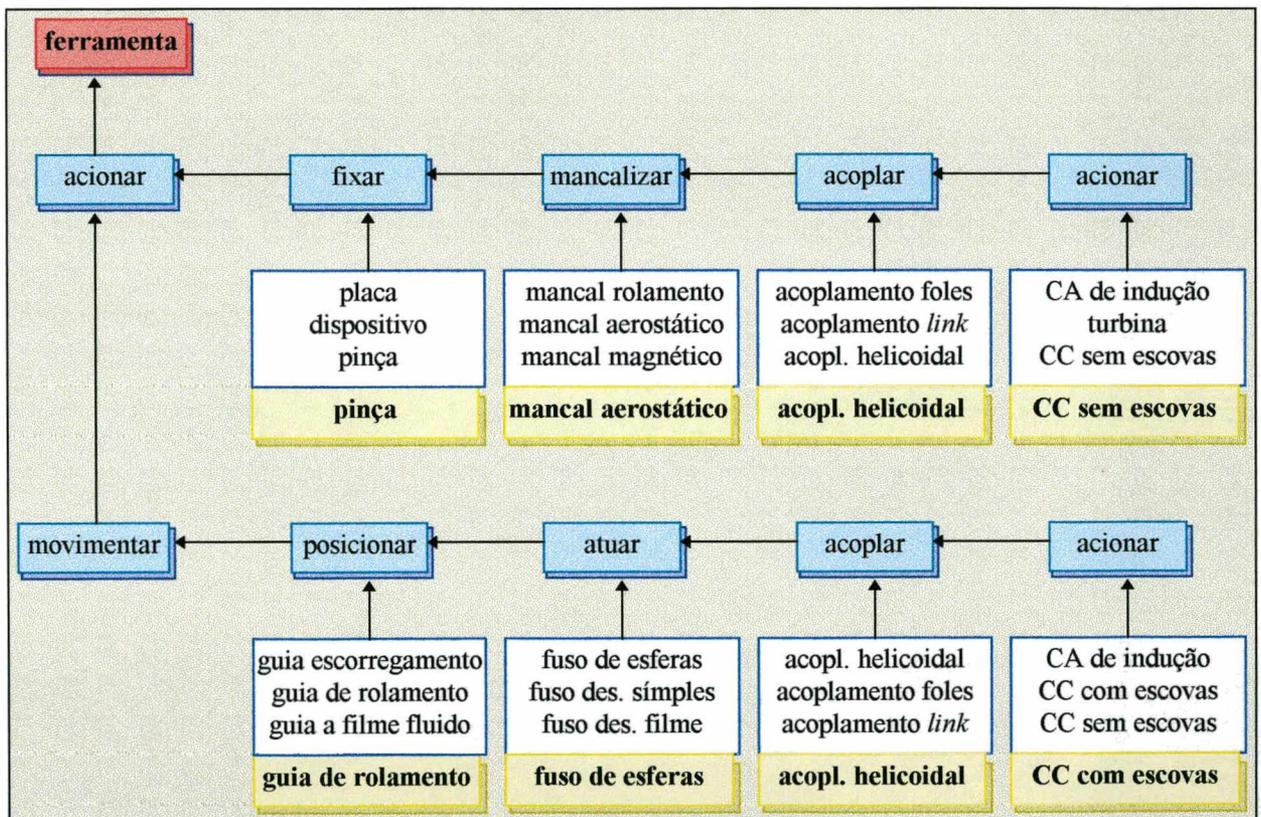


Figura 5.28 - Função parcial, subsistema ferramenta.

A escolha dos componentes apresentados na Figura 5.28 deve-se às seguintes características:

- pinça: baixo custo, alta precisão, média deformação da peça, diâmetro de aperto de 0 a 1 mm;

- mancal aerostático: médio custo, alta precisão de giro, alta rotação (até 100.000 rpm), alta vida, pode ser fabricado no LMP;
- acoplamento helicoidal: alta rigidez torcional, material aço inoxidável;
- motor CC sem escovas: alta dinâmica, alto torque, baixo nível de vibrações, rotação até 100.000 rpm;
- guia de rolamento cilíndrica: médio custo, alta rigidez, alta precisão de giro, curso mínimo 40 mm;
- fuso de esferas recirculantes: médio custo, alta rigidez, alta precisão de deslocamento, ausência de folgas, curso mínimo 40 mm.
- motor CC com escovas: médio a alto torque, média a alta dinâmica, regulagem precisa da velocidade, facilidade de frenagem.

A Figura 5.29 apresenta a descrição do subsistema peça assim como os elementos escolhidos.

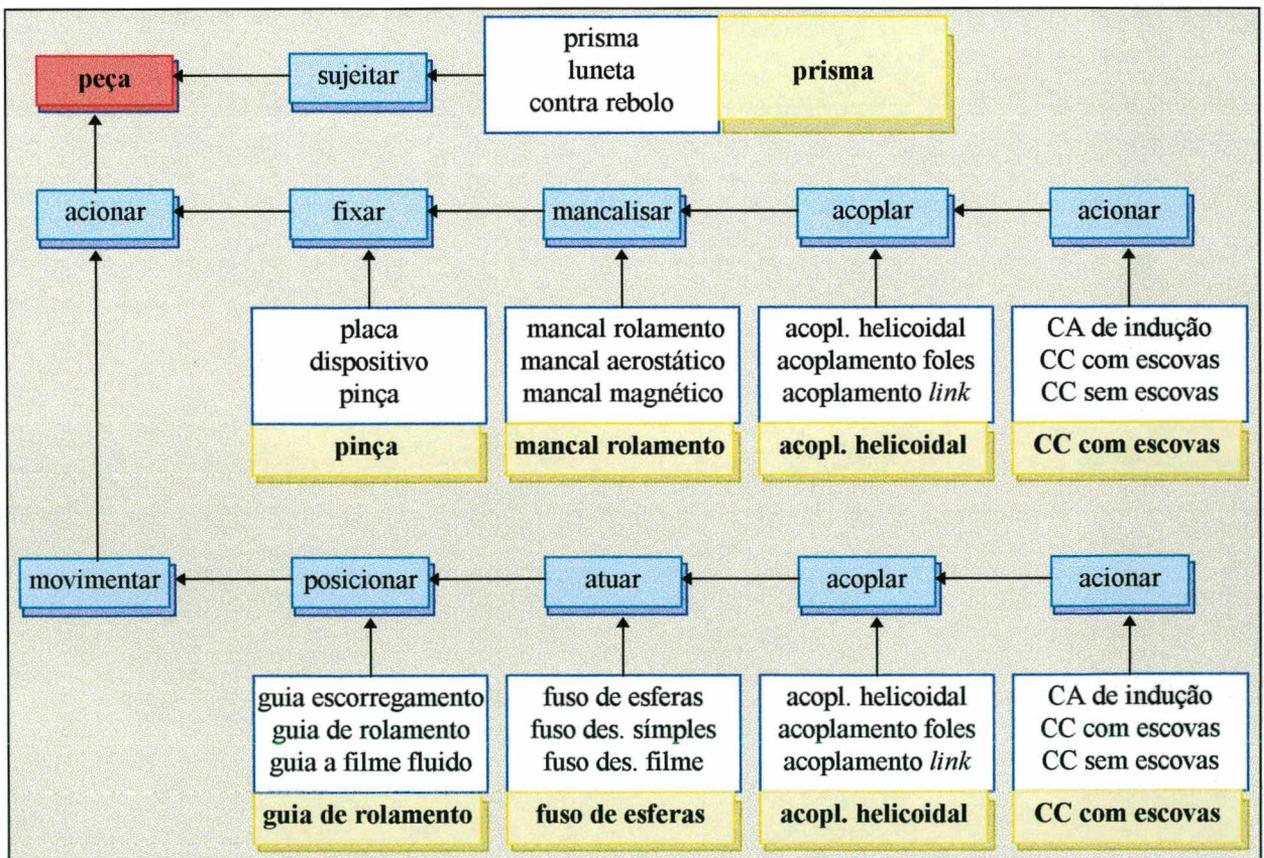


Figura 5.29 - Função parcial, subsistema peça.

A escolha dos componentes apresentados na Figura 5.29 deve-se às seguintes características:

- mancal de rolamento: baixo custo, média a alta precisão de giro;
- sujeição por prisma: facilidade de fabricação, durabilidade;
- demais componentes: vide Figura 5.28.

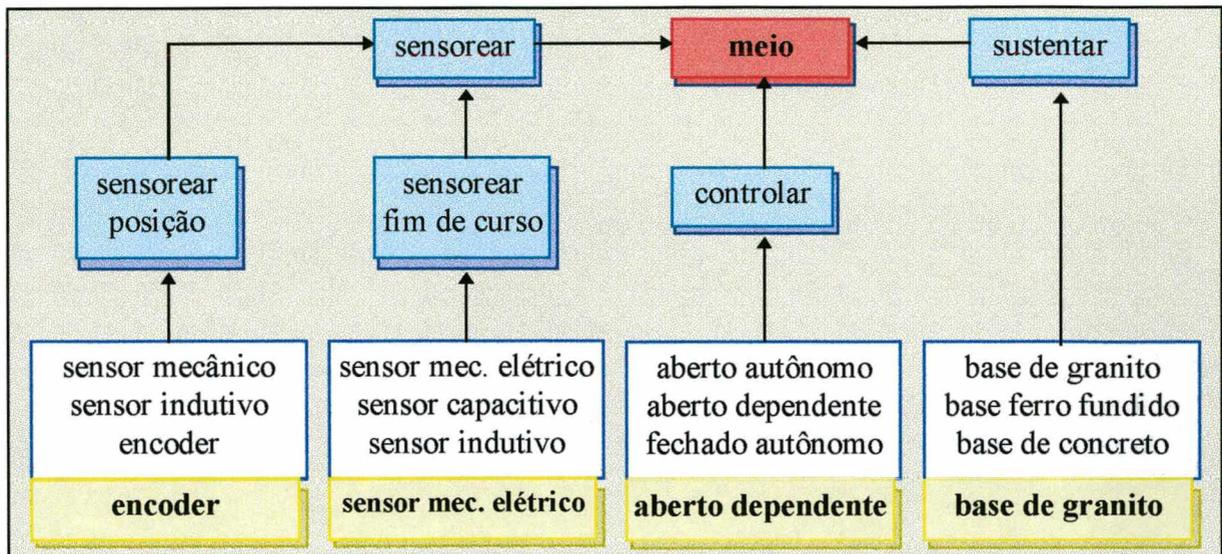


Figura 5.30 - Função parcial, subsistema meio.

Os componentes mostrados na Figura 5.30 apresentam as seguintes características:

- *encoder*: baixo custo, média a alta precisão;
- sensor mecânico elétrico: baixo custo, alta eficiência;
- controle aberto dependente (baseado em microcomputador), tecnologia em desenvolvimento no LMP;
- base de granito: alta rigidez, alta estabilidade dimensional.

A interrelação destes três subsistemas distintos, ferramenta, peça e meio, de acordo com as funções pré-definidas, propiciam a correta integração e funcionamento da máquina, o que pode ser melhor visualizado através da Figura 5.31. Esta apresenta uma concepção da máquina-ferramenta onde a ferramenta (rebolo) é dotada de movimentos na direção Z, com a peça montada sobre uma mesa de guias cruzadas nas direções XY.

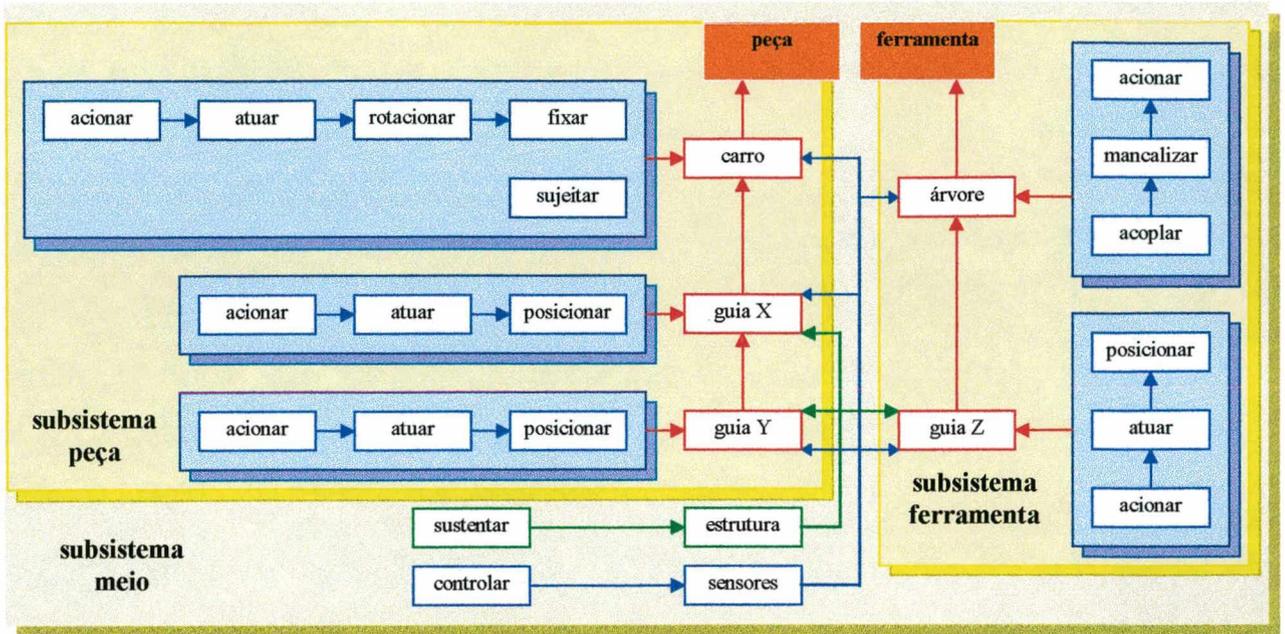


Figura 5.31 - Interrelação dos três subsistemas (peça, ferramenta e meio).

O próximo passo é uma pesquisa mercadológica das variações dos componentes escolhidos para esta máquina, como custos, dimensões, disponibilidade, intercambialidade, etc., assim como uma busca de recursos em órgãos de financiamento (CNPq, CAPES, PATME), ou na iniciativa privada para a concretização desse projeto.

O capítulo que segue apresenta uma avaliação do projeto para a comprovação do processo de obtenção das limas Hedström escolhido. Para isso desenvolveu-se um modelo funcional da máquina-ferramenta com uma concepção mais simples, com elementos de baixos custos ou que se encontravam disponíveis no LMP, mas que satisfazem as especificações básicas do projeto.

CAPÍTULO 6

PROTÓTIPO DA MÁQUINA RETIFICADORA PARA A CONFECCÃO DE LIMAS HEDSTRÖEM

Por que esta magnífica tecnologia que economiza trabalho e torna nossas vidas mais fáceis não nos traz um pouco de felicidade? A resposta é simples: porque ainda não aprendemos a usá-la com discernimento.

Albert Einstein (1879-1955).

6.1 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

O principal objetivo do protótipo é demonstrar que o processo de retificação para a obtenção das limas Hedström é adequado para as pequenas dimensões da peça a ser fabricada (Figura 6.1). Este protótipo foi concebido contemplando as disponibilidades do LMP. Este é o caso da estrutura em ferro-fundido, que serve de base para a máquina, o que também acontece com as guias de escorregamento XY, que fazem parte de uma mesa de acionamento manual, que dispõem ainda da possibilidade de rotação em Z. A guia de escorregamento Z com possibilidade de rotação em Y, também de acionamento manual, foi projetada e construída no LMP.

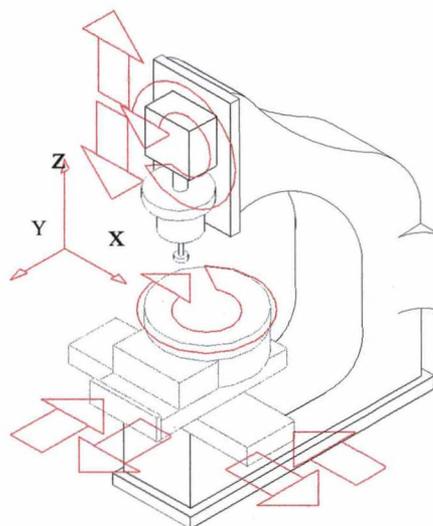


Figura 6.1 - Arranjo selecionado para o protótipo.

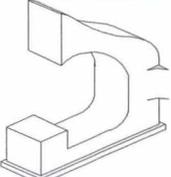
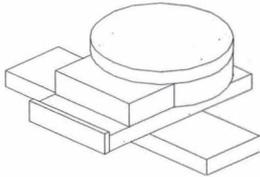
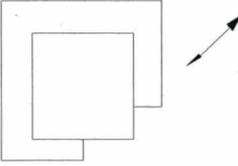
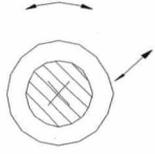
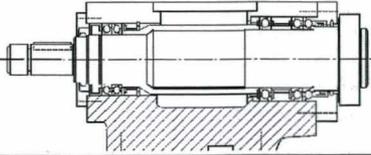
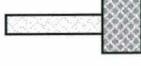
Para o acionamento dos rebolos adquiriu-se um cabeçote com acionamento pneumático de alta rotação (até 70.000 rpm) que foi montado no carro do eixo Z.

Também foi projetado e construído um sistema para fixação, sujeição e movimentação

da peça a ser usinada, denominado de castelo, montado sobre a mesa XY.

A Tabela 6.1 apresenta algumas características e configurações dos elementos apropriados para a obtenção do modelo funcional.

Tabela 6.1 - Escolha dos elementos mais apropriados.

componente	característica	configuração
base <ul style="list-style-type: none"> ferro-fundido coluna em C 	<ul style="list-style-type: none"> disponível no LMP baixo custo 	
mesa X e Y <ul style="list-style-type: none"> guias prismáticas de escorregamento fuso de deslizamento simples acionamento manual 	<ul style="list-style-type: none"> disponível no LMP baixo custo alta rigidez alta capacidade de carga 	
guias Y <ul style="list-style-type: none"> guia de escorregamento fuso de deslizamento simples acionamento manual 	<ul style="list-style-type: none"> fácil fabricação baixo custo alta rigidez 	
castelo <ul style="list-style-type: none"> movimentação por fuso de deslizamento simples acionamento manual fixação por pinça sujeição por prisma 	<ul style="list-style-type: none"> baixo custo fácil fabricação alta rigidez 	
árvore <ul style="list-style-type: none"> mancais de rolamento acionamento por turbina a ar acoplamento rígido (eixo direto) fixação do rebolo por pinça 	<ul style="list-style-type: none"> médio custo alta rotação (até 70.000 rpm) fácil instalação 	
ferramenta <ul style="list-style-type: none"> rebolo de CBN 	<ul style="list-style-type: none"> baixo desgaste alta velocidade de corte 	
peça <ul style="list-style-type: none"> aço H13 nitretado 	<ul style="list-style-type: none"> alta dureza (70 Rc) disponibilidade de varetas de 1 mm de diâmetro 	

6.2 SOLUÇÃO ADOTADA

As Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam de forma esquemática a solução adotada, que consiste em uma base de ferro fundido com estrutura em C ① para apoio da guia de escorregamento prismática ②, a qual possibilita um movimento de translação de 150 mm do cabeçote retificador ③, segundo eixo Z, assim como, através de um dispositivo ④, a rotação de 360° em Y.

A estrutura ① apoia também uma mesa ⑤ com guias de escorregamento prismáticas ⑥, as quais permitem movimentos de translação de 180 mm nas direções X e Y, assim como um dispositivo de rosca sem fim ⑦ que transmite a rotação de 360° no eixo Z.

Sobre esta mesa é apoiado o castelo ⑧. Neste castelo é fixo, além da peça a ser retificada, um eixo que confere à peça movimentos de rotação e translação. Esse eixo é acionado por um motor CC, 12V, com escovas, acoplado por uma correia plana e polias.

O cabeçote de retificação ③ é responsável pelo movimento de rotação da ferramenta (rebolo) ⑨, sustentado por mancais de rolamento de precisão e acionada por uma turbina a ar.

O posicionamento das guias X, Y e Z é realizado por atuadores ⑩, os quais consistem de fusos de deslizamento simples acionados manualmente.

No sensoramento da posição dos eixos X, Y e Z são empregados relógios comparadores.

Para o controle da velocidade do cabeçote de retificação utiliza-se um regulador e um manômetro.

Para o controle do motor de acionamento do eixo do castelo utiliza-se uma fonte controladora de tensão.

O Anexo 2 apresenta algumas fotos do protótipo.

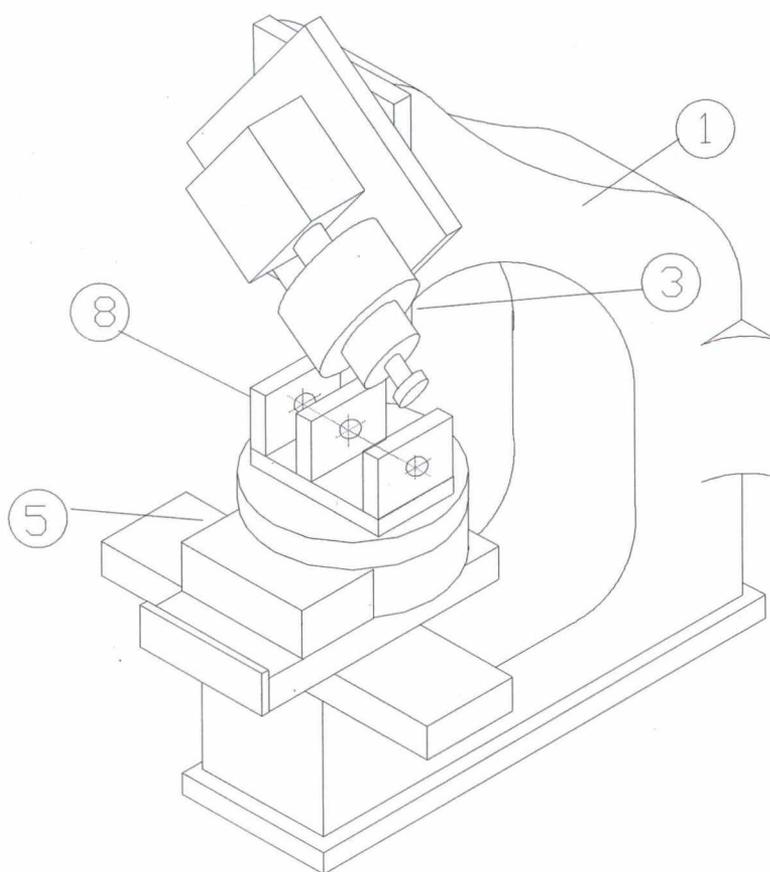


Figura 6.2 - Protótipo.

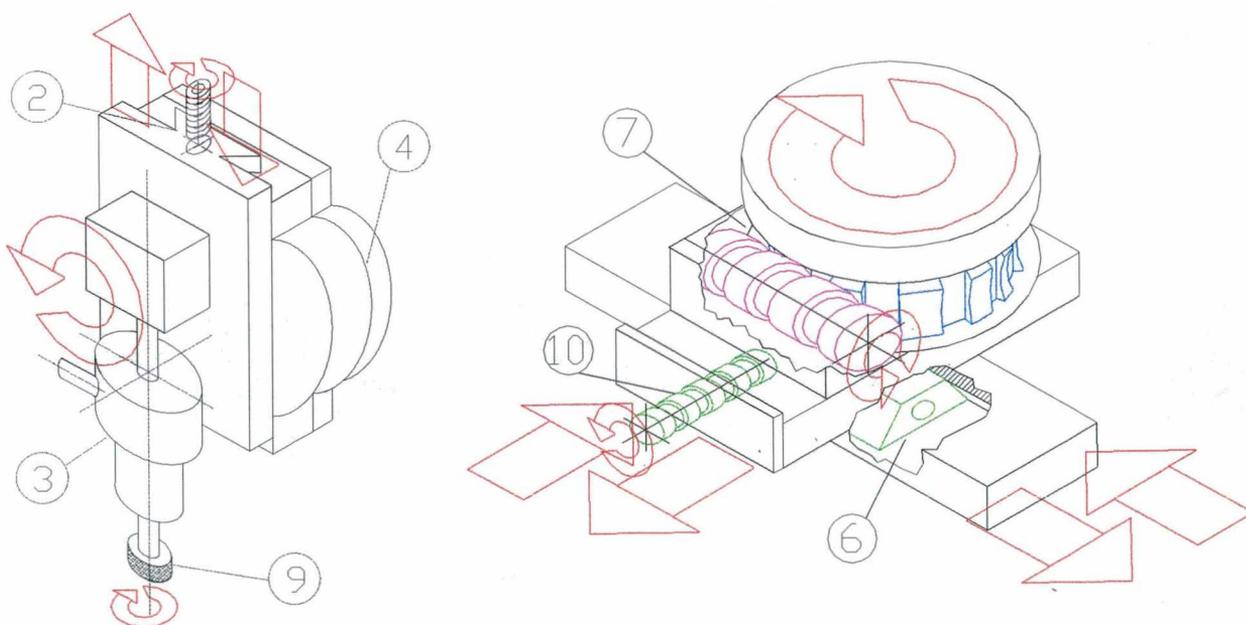


Figura 6.3 e 6.4 - Cabeçote retificador e mesa.

6.2.1 O CASTELO

No castelo ⑧, localizado sobre a mesa ⑤, são executadas as funções de fixação, sujeição e movimentação da peça. A seguir são descritas estas funções.

SISTEMA DE FIXAÇÃO

A fixação deve ser feita de forma a não induzir na peça deformações provenientes de apertos, além de prover ao conjunto um balanceamento adequado. O sistema de pinça empregado distribui as tensões homogeneizando as deformações. Visto que, após a usinagem, será colocado um cabo na parte da lima que está em contato com a pinça, este sistema é plenamente justificável. A Figura 6.5 mostra o desenho da pinça utilizada no sistema de fixação.

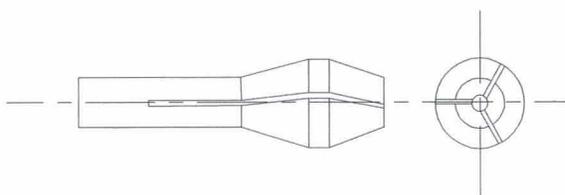


Figura 6.5 - Pinça.

A Figura abaixo apresenta os elementos constituintes do sistema de fixação.

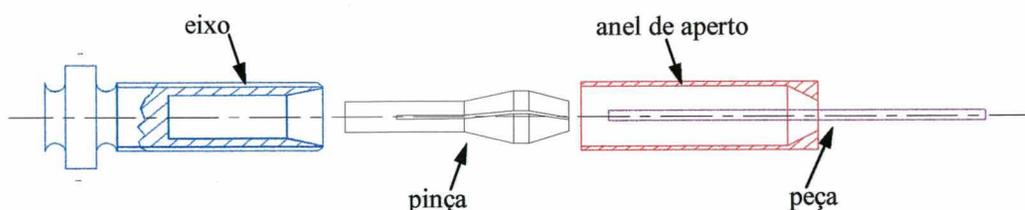


Figura 6.6 - Sistema de fixação da peça.

SISTEMA DE SUJEIÇÃO

Como a peça a ser usinada é muito fina, mesmo as baixas forças de corte, provenientes da retificação, causam deformações. Para solucionar este problema fez-se uso de um sistema de sujeição (Figura 6.7), o qual é composto por um prisma que executa o apoio da peça (Figura 6.8). O prisma é de aço nitretado (camada de 15 a 20 μm) para que seu desgaste seja minimizado.

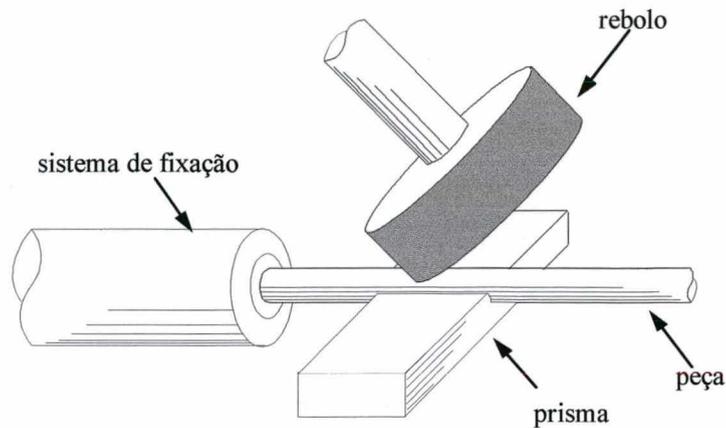


Figura 6.7 - Sistema de sujeição.

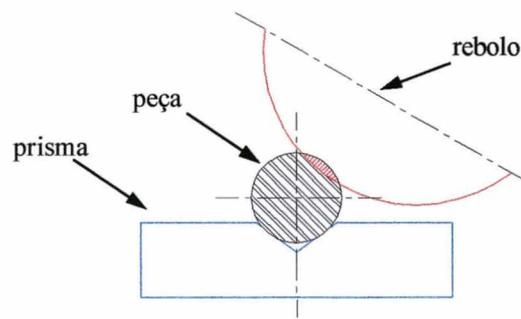


Figura 6.8 - Vista frontal das sistema de sujeição.

SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO

A movimentação da peça é realizada através de um eixo, o qual é composto de um fuso de deslizamento simples e de uma guia de escorregamento cilíndrica. Deste modo pode-se obter o passo característico da helicóide da lima (1 mm) tipo hedström nº 70, série 2, cor verde.

O acionamento é executado por um motor de CC com escovas, 12 V, com um redutor, sendo que a transmissão do movimento do motor para o eixo é feita por uma correia plana de borracha e sobre polias planas. A rotação do motor, e assim o avanço e a rotação da peça, é regulada por um controlador de tensão. A Figura 6.9 mostra os elementos constituintes deste sistema que gera os movimentos mencionados.

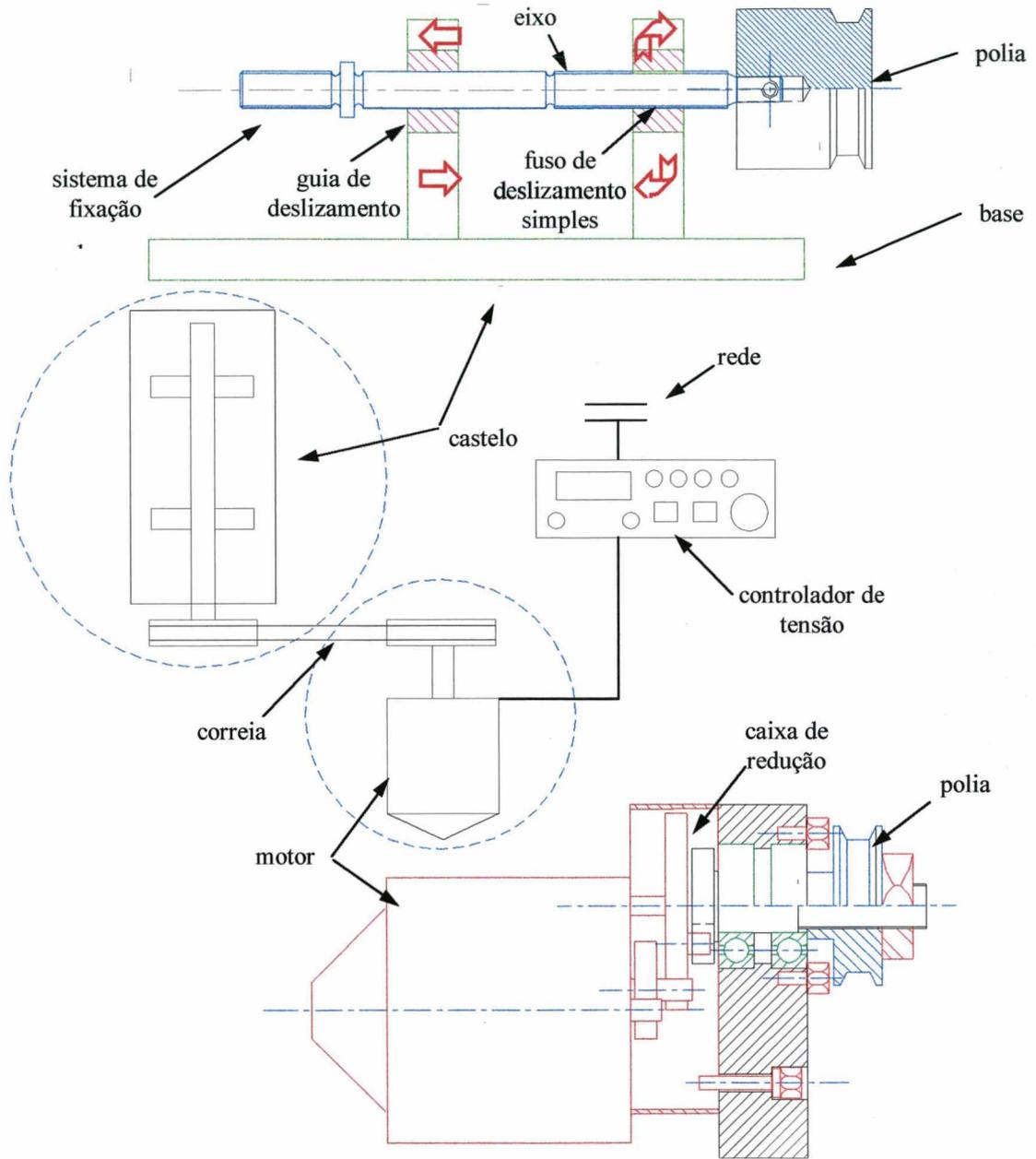


Figura 6.9 - Sistema de movimentação da peça.

6.2.2 O CABEÇOTE RETIFICADOR (ÁRVORE)

O cabeçote retificador, marca FAÉ Matrizes e Dispositivos Ltda. modelo F-70-089, consiste de uma turbina a ar montada entre mancais de rolamento de alta precisão, sendo este conjunto dinamicamente balanceado em uma classe de qualidade G 0,4 [51].

Seus principais dados descritivos são:

- acionamento: ar comprimido;
- pressão do ar: 2 a 4 kg/cm² (30 a 60 psi);
- consumo de ar: 210 l/min a 4 kg/cm²;
- rotação: 70.000 rpm a 4 kg/cm², e 50.000 rpm a 2 kg/cm²;
- potência de saída: 540 W a 70.000 rpm;
- peso: 1,5 kg;
- pinça: 4, 6 e 8 mm.

A Figura 6.10 apresenta uma vista frontal do cabeçote retificador.

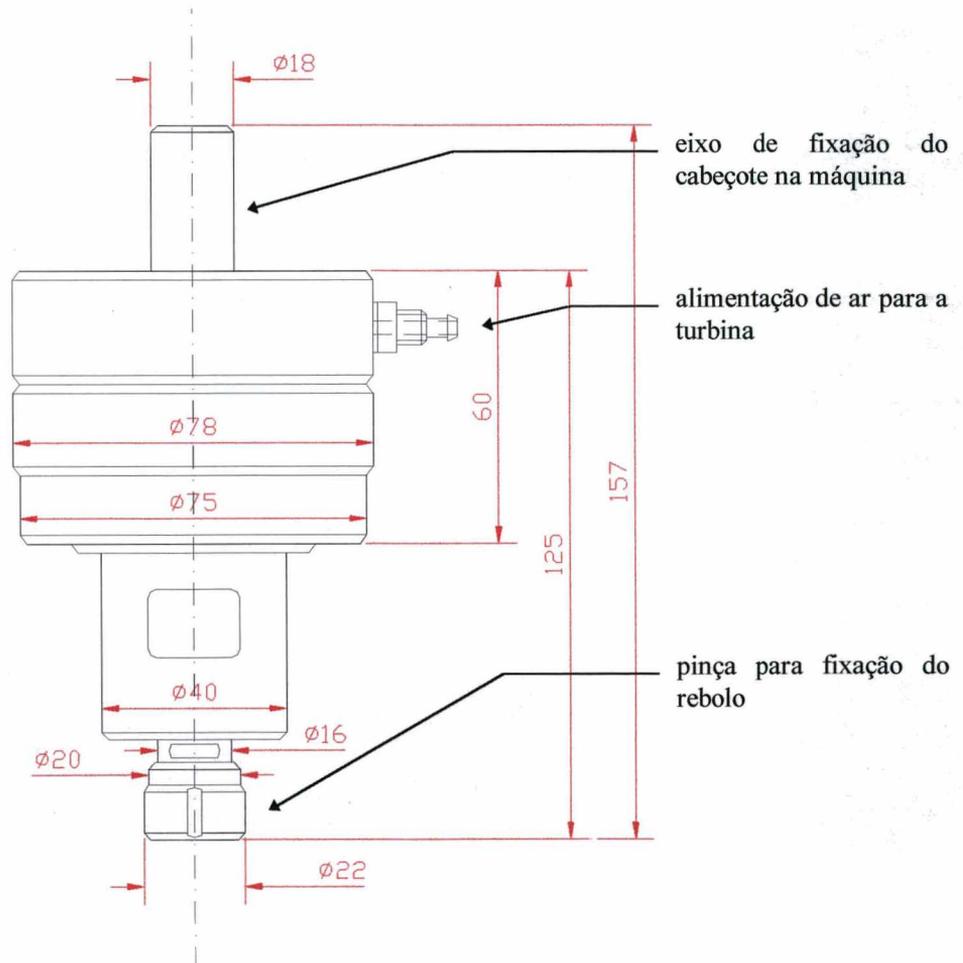


Figura 6.10 - Vista frontal do cabeçote retificador. Unidade: (mm).

6.2.3 REDE DE AR COMPRIMIDO

Antes de entrar no cabeçote, o ar deve fluir através de uma série de quatro dispositivos (conforme fabricante [51]):

- um filtro decantador de água e impurezas;
- um regulador de pressão com manômetro;
- um lubrificador que mistura e dosa o óleo;
- uma válvula abre/fecha.

A máquina foi instalada na sala climatizada do LMP que dispunha de um compressor, com pressão máxima de 12 bar, um secador, com condensação a 2 °C, um pulmão e filtros de ar.

A Figura 6.11 apresenta a rede de ar comprimido utilizada para o acionamento do cabeçote retificador.

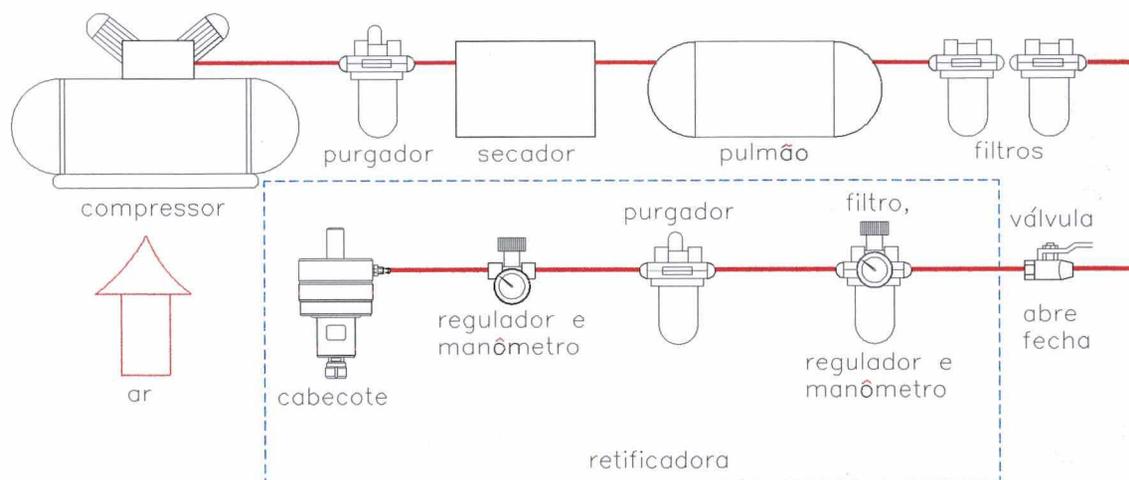


Figura 6.11 - Rede de ar comprimido.

CAPÍTULO 7

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO

Cada fracasso ensina ao homem algo mais que ele precisava aprender.

Charles Dickens (1812-1870).

Os erros dimensionais, erros de posicionamento, erros de forma e rugosidade que surgem durante o processo de usinagem são gerados tanto pela tecnologia de usinagem envolvida quanto pelas propriedades da máquina utilizadas. Erros de usinagem causados pela máquina-ferramenta são devidos a movimentos relativos não intencionais entre a ferramenta e a peça, que se refletem como rugosidade, erros de forma e independentes de sua dinâmica e sua direção de usinagem.

Através de suas propriedades, o cabeçote de uma máquina é um fator determinante da qualidade atingível em uma peça durante um determinado processo de usinagem.

Uma propriedade essencial a um cabeçote ideal é a capacidade de reter sua posição relativa a um sistema fixo de coordenadas espacial, independente do carregamento devido à velocidade, força de usinagem, vibração, influências térmicas, etc.. Um cabeçote com capacidade de manter sua posição espacial fixa obviamente não existe. Na verdade, ocorre que o rotor do cabeçote muda sua posição espacial constantemente. Isto é causado pelas propriedades estáticas, dinâmicas, geométricas e térmicas do cabeçote e sua interdependência com os valores da carga aplicada [32; 35].

Neste capítulo os fatores de comportamento dinâmico e geométrico serão analisados com mais detalhes.

7.1 COMPORTAMENTO DINÂMICO

Com o ensaio dinâmico pretende-se comprovar ou não que este mancal tem condições de operar na faixa de 70.000 rpm dentro de uma qualidade de balanceamento G 0,4, conforme fabricante FAÉ.

7.1.1 ESTRUTURA DO ENSAIO

As vibrações provenientes do cabeçote são medidas utilizando-se uma balanceadora *Schenk Vibrolancer 41*, a qual dispõe de um programa de aquisição de dados, de um acelerômetro AS-20 e de um sensor óptico P-84. O equipamento foi montado junto a retificadora como mostra a Figura 7.1.

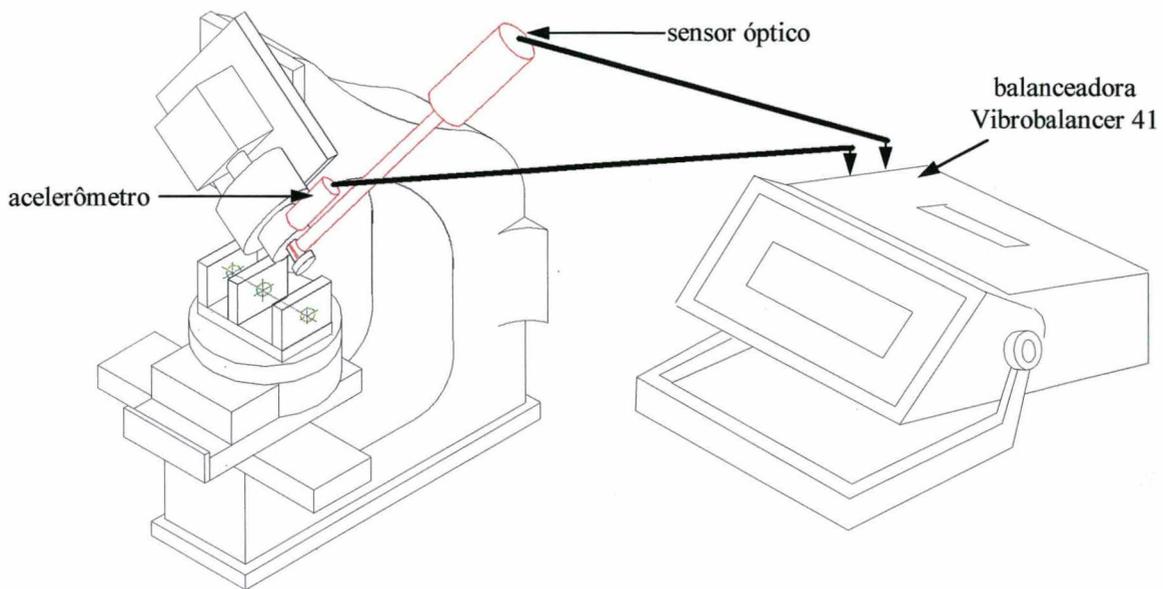


Figura 7.1 - Representação esquemática da montagem do equipamento para medição das vibrações do cabeçote.

Deste modo pode-se obter a velocidade de desbalanceamento $v(\omega)$ e, através da Equação 7.2, o deslocamento máximo ou a amplitude da onda senoidal (X_m).

$$\omega = \frac{2\pi}{n} \quad (7.1)$$

$$v = \omega \cdot X_m \cdot \cos(-K) \quad (7.2)$$

Com o deslocamento máximo (X_m) pode-se obter a qualidade de balanceamento dinâmico.

7.1.2 RESULTADO E CONCLUSÃO

As vibrações do cabeçote foram ensaiadas na faixa de rotações nominais do cabeçote, de 20.000 a 73.000 rpm. A Figura 7.2 mostra o comportamento das vibrações como função da

rotação. A Figura 7.3 mostra as classes de desbalanceamento para eixos rotativos.

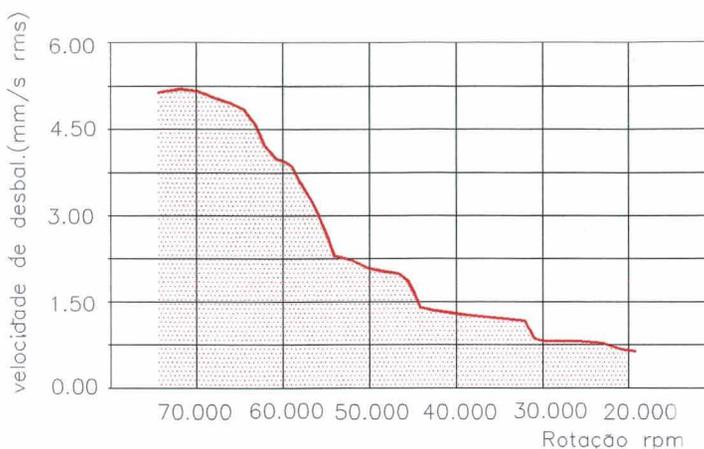
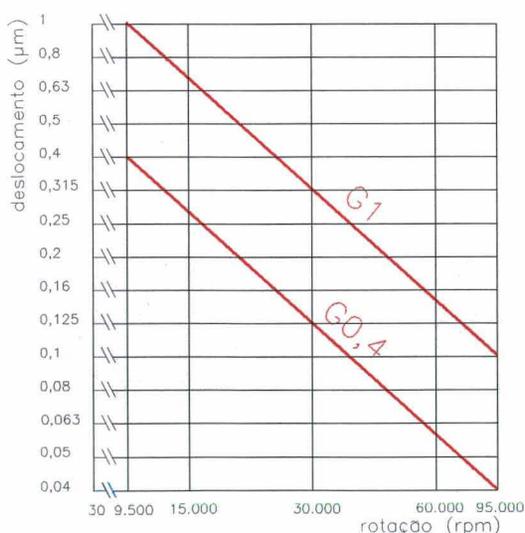


Figura 7.2 - Ensaio de vibração.

Através da Figura e da Equação 7.2 obteve-se os seguintes resultados:

- para 70.000 rpm; $X_m = 0,071 \mu\text{m}$ (RMS);
- para 50.000 rpm; $X_m = 0,038 \mu\text{m}$ (RMS).

Comparando estes dados com a Figura 7.3 (classes de qualidade para balanceamento de rotores rígidos) com recomendação NBR 8008, VDI 2060.



<i>Classe</i>	<i>Faixas de qualidade</i>
G 1	Acionamentos de gravadores e de retíficas, induzido de motores pequenos para aplicações especiais.
G 0,4	Induzido-eixos e discos de retíficas de precisão e giroscópios.

Figura 7.3 - Classes de qualidade para balanceamento de rotores rígidos.

O valor $0,038 \mu\text{m}$ (RMS) para 50.000 rpm mostra-se excelente para uma classe G 04, mas o valor $0,071 \mu\text{m}$ (RMS) para 70.000 rpm apresenta-se na faixa da classe G 1 próximo a G 0,4.

7.2 COMPORTAMENTO GEOMÉTRICO

O ensaio de comportamento geométrico visa determinar dois erros provenientes da rotação do mancal: imprecisão total de giro e deslocamento axial.

7.2.1 IMPRECISÃO TOTAL DE GIRO

A medida de imprecisão total de giro engloba:

1. Erro devido à concentricidade do eixo (distância entre a intersecção do eixo de rotação e o eixo geométrico com o plano perpendicular ao eixo de rotação);
2. Erro de circularidade do componente (definido como sendo a diferença entre o diâmetro da circunferência circunscrita e o menor diâmetro mensurável do eixo);
3. Erro dos mancais (nos rolamentos, a gaiola e os elementos rolantes giram com velocidades diferentes, em relação ao eixo; a repetição do erro de rotação do eixo pode ocorrer somente depois de alguma voltas) [52].

7.2.2 DESLOCAMENTO AXIAL

Deslocamento axial é a amplitude de movimento alternativo na direção do eixo de uma peça rotativa, quando girada [52].

7.2.3 ESTRUTURA DO ENSAIO

Antes de efetuar os ensaios pôs-se a árvore em funcionamento por 10 min para garantir a estabilidade térmica e uma lubrificação em regime permanente, durante o ensaio [52].

Para o ensaio de imprecisão de giro, apoia-se o apalpador do transdutor indutivo de deslocamento AE-1A sobre a superfície do eixo do cabeçote e anotam-se as indicações do transdutor enquanto a árvore gira lentamente três vezes [52].

Para o ensaio de deslocamento axial, apoia-se o apalpador do transdutor indutivo de deslocamento AE-1A na face frontal do cabeçote paralelamente ao eixo de rotação. As leituras são feitas enquanto gira-se lentamente o eixo [52].

Por não se dispor de uma infra-estrutura adequada para a realização das medições de

forma dinâmica, fez-se uma medição discreta dos erros em posições angulares definidas.

7.2.4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

A Figura 7.4 apresenta o valor médio do erro de imprecisão de giro e a Figura 7.5 o valor médio do erro de deslocamento axial do cabeçote retificador.

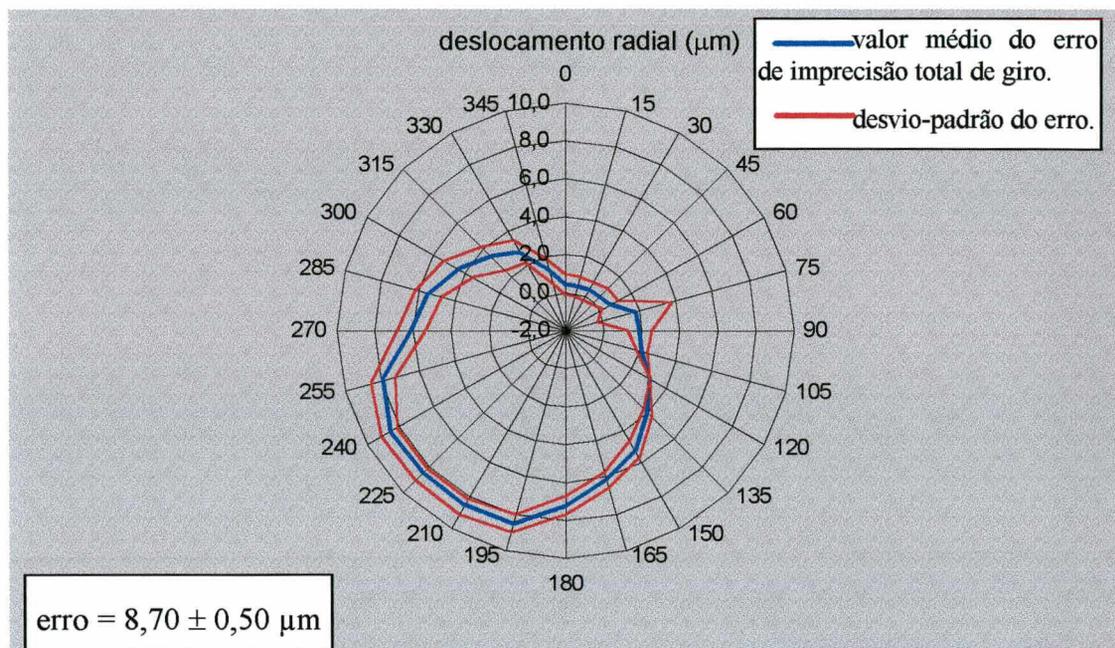


Figura 7.4 - Ensaio de imprecisão total de giro.

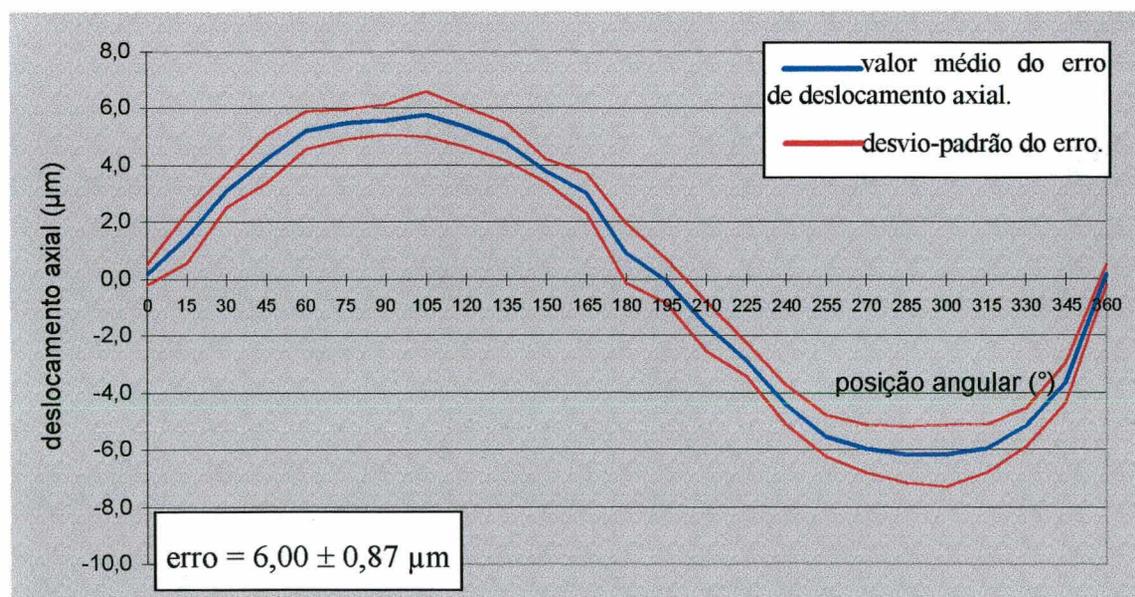


Figura 7.5 - Ensaio de deslocamento axial.

Das figuras anteriores obtêm-se os valores máximos dos erros dos ensaios, sendo:

- erro de imprecisão total de giro = $8,70 \pm 0,50 \mu\text{m}$;
- erro de deslocamento axial = $6,00 \pm 0,87 \mu\text{m}$.

Os resultados apresentam-se satisfatórios para a dimensão a ser usinada ($a_p = 0,28 \text{ mm}$), sendo ainda que duas parcelas do erro de imprecisão total de giro, concentricidade do eixo e circularidade do componente, podem ser minimizadas em função de um dressamento do rebolo no próprio cabeçote retificador.

CAPÍTULO 8

ENSAIOS

Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende.

João Guimarães Rosa (1908-1967).

8.1 INTRODUÇÃO

Os ensaios para a comprovação do processo de retificação para obtenção das limas Hedström, foram realizados com o protótipo, empregando-se rebolos de CBN em aço-ferramenta para trabalho a quente.

No planejamento dos ensaios utilizou-se o projeto fatorial 2^k , ou seja, k fatores envolvidos sendo cada um deles a dois níveis.

Os resultados são mostrados na forma de tabelas para uma comparação entre as taxas de retificação. Também são mostradas micrografias eletrônicas das peças ensaiadas para uma melhor visualização dos resultados do processo.

8.2 ESPECIFICAÇÃO DA FERRAMENTA

A ferramenta utilizada para usinagem é um rebolo de CBN com as seguintes especificações:

- fabricante: WINTER do Brasil;
- abrasivo: CBN;
- tamanho de grão: 210 a 270 mesh ou B151;
- dureza do rebolo: R;
- tipo de ligante: vitrificado;
- espessura de revestimento: 2 mm;
- forma do rebolo: 1A1W;
- dimensões do rebolo: Figura 8.1.

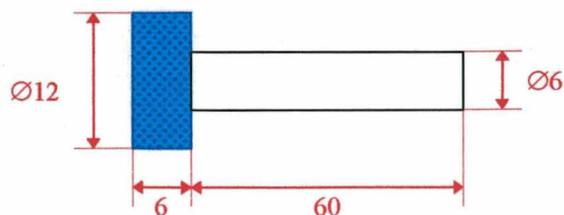


Figura 8.1 - Dimensões do rebolo.
Unidade (mm).

8.3 ESPECIFICAÇÕES DA PEÇA BRUTA

Devido à impossibilidade de se encontrar corpos de prova de aço inoxidável martensítico na forma de barras (varetas) de 1 mm de diâmetro ou menos, buscou-se um material com dureza similar, em torno de 65 HRC, e que pudesse ser adquirido no diâmetro desejado. A seguir descreve-se as especificações do aço utilizado:

- classificação: ABNT H13, DIN X 40 CrMoV 5 1 e;
- composição química: C = 0,40% - Si = 1,00% - Cr = 5,00% - Mo = 1,50% - V=1,00%;
- dureza: 70 HRC;
- diâmetro da vareta: 1 mm;
- comprimento 124 mm;
- características gerais: aço cromo-molibdênio-vanádio para trabalho a quente **nitretado**, com excelentes propriedades mecânicas em temperaturas elevadas e grande estabilidade dimensional no tratamento térmico. Superfície com alta dureza e de grande resistência à abrasão, entretanto convém lembrar que a camada nitretada é frágil e pode romper-se ou desprender-se quando exposta a choques térmicos ou mecânicos [53].

8.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM

Parâmetros de usinagem são dados de entrada, função do processo de usinagem, máquina-ferramenta, do tipo de material a ser usinado e da ferramenta de corte utilizada. Os parâmetros de corte relacionados com o processo de usinagem e a máquina-ferramenta são a velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e fluido de corte. Para a ferramenta de corte os parâmetros são material, forma e geometria da ferramenta, e para o material a ser usinado a composição química, dureza e tipo de tratamento superficial. Com a combinação entre estes parâmetros avalia-se em tempo real como comporta-se a operação de usinagem, colhendo dados que direcionam a possíveis melhorias na tecnologia da operação [54].

Para o ensaio utilizou-se apenas a variação dos parâmetros do processo de usinagem e da máquina-ferramenta, pois desejava-se uma verificação do próprio processo de usinagem e também do modelo funcional. Os parâmetros de corte utilizados são os valores máximos e mínimos que poderiam ser obtidos no modelo funcional. Deve ser salientado que estas condições estão dentro

da faixa de valores usuais para o processo.

- velocidade do rebolo (v_r): 2.639 m/min (44 m/s)
1.885 m/min (31,5 m/s);
- velocidade da peça (v_p): 0,19 m/min (3,23 mm/s)
0,09 m/min (1,50 mm/s);
- profundidade de corte (a_p): 0,28 mm
0,20 mm;
- ângulo de direção do gume (χ_r): 65°
60°.

Empregou-se óleo lubrificante como fluido de corte na forma de *spray*, proveniente da alimentação da turbina (lubrificação dos mancais de rolamento) do cabeçote retificador.

8.5 CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS

Para a avaliação dos ensaios utilizaram-se dois critérios:

1. Critério acabamento superficial e qualidade do gume da lima;
2. Critério taxa de retificação.

8.5.1 CRITÉRIO ACABAMENTO SUPERFICIAL E QUALIDADE DO GUME

A rugosidade das superfícies usinadas pode ser atribuída a duas causas primordiais: raias ou marcas de avanço, decorrentes da ferramenta e fragmentos de cavacos acamados na peça durante o processo de retificação. A melhoria do acabamento superficial depende, pois, de todos os fatores capazes de diminuir a altura das raias ou as dimensões desses fragmentos [55].

Para a avaliação do acabamento superficial e da qualidade do gume utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura com aumentos de 30 e 120 vezes.

8.5.2 CRITÉRIO TAXA DE RETIFICAÇÃO (Z)

A taxa de retificação (Z) é definida como sendo o volume retificado na unidade de tempo (mm^3/s) e a taxa de retificação específica com o volume retificado na unidade de tempo por mm de largura do rebolo ($\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ ou mm^2/s).

As taxas de retificação são de interesse geral e podem ser usadas como ponto de partida na determinação de parâmetros de retificação, mas é importante frisar que elas podem variar substancialmente para o mesmo material, dependendo do tipo de operação de retificação, condições do material e parâmetros de sistema [10].

8.6 METODOLOGIA DE ENSAIO

Para a análise do critério de acabamento superficial e qualidade do gume da peça, em função da impossibilidade de aquisição de dados quantitativos, optou-se por uma análise qualitativa do processo. Para o planejamento dos ensaios utilizou-se o procedimento de um projeto fatorial 2^k , que é especialmente útil nos estágios iniciais de um trabalho experimental, quando há muitos fatores a serem investigados. Ele oferece o menor número de combinações de tratamento que permite o estudo de k fatores em um arranjo fatorial completo. Como há somente dois níveis para cada fator, deve-se supor que a resposta é aproximadamente linear dentro do intervalo escolhido para os níveis dos fatores [56].

A nível de entendimento o modelo estatístico correspondente ao projeto 2^k inclui k efeitos principais ($k/2$) interações de dois fatores, ($k/3$) interações de três fatores, etc., uma interação de k fatores. O modelo completo contém $(2^k - 1)$ efeitos calculados a partir de 2^k combinações de tratamento. As combinações de tratamento são escritas na ordem padrão introduzindo-se os fatores um de cada vez, cada novo fator sendo sucessivamente combinado com todos os anteriores [56].

Assim, para o ensaio utilizou-se um projeto fatorial (2^4), com quatro repetições e com quatro fatores (velocidade do rebolo (A), taxa de remoção (B), profundidade de corte (C) e ângulo de direção do gume (D)) com dois níveis cada (alto (+) ou baixo (-)). A ordem padrão é: (1), a, b, ab, c, ac, bc, abc, d, ad, bd, abd, cd, acd, bcd, abcd. Nessa notação, por exemplo bd denota a combinação de tratamentos onde B e D estão em seus níveis altos enquanto A e C estão em seus níveis baixos [56].

Para a análise do critério taxa de retificação utilizou-se o processo de projeto fatorial 2^k confundido em blocos. Este processo é utilizado em situações na qual a aleatorização, por algum motivo, fica restringida. No caso a decisão por esta restrição, na qual a informação a ser

sacrificada, foi a velocidade do rebolo, pois a mesma não exerce influência na taxa de retificação.

Nos ensaios também foram anotados os tempos (s) e os comprimentos de usinagem (mm).

8.7 RESULTADOS DOS ENSAIOS

8.7.1 CRITÉRIO ACABAMENTO SUPERFICIAL E QUALIDADE DO GUME

As micrografias eletrônicas que seguem apresentam os resultados das peças ensaiadas no modelo funcional.

Ao analisar-se as micrografias eletrônicas das Figuras 8.2 e 8.3, observa-se que estas apresentam o melhor acabamento superficial. As ranhuras oriundas do processo de retificação são de baixa altura, possuindo além disto um gume bem formado, mais uniforme e contínuo, podendo apresentar um bom desempenho quando em uso.

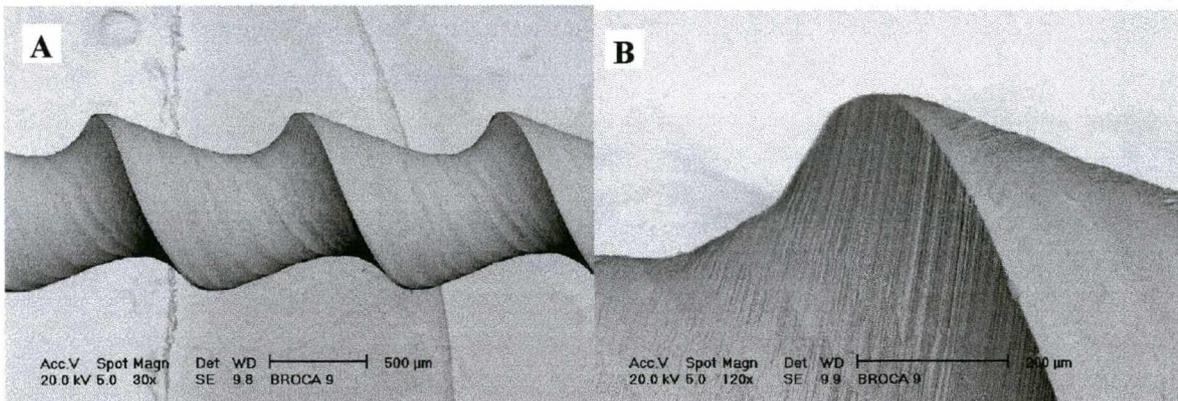


Figura 8.2 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 9; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ m/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 65^\circ$).

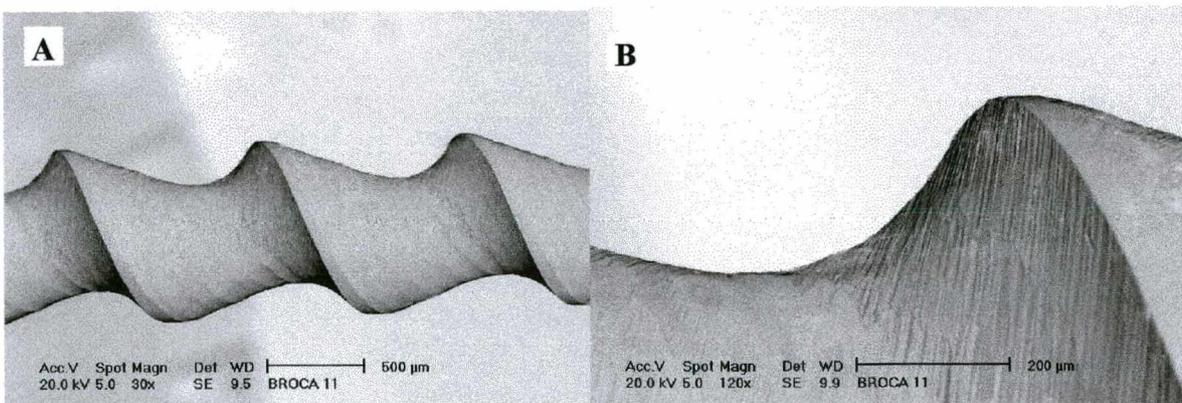


Figura 8.3 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 11; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ m/s, $v_p = 0,19$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 65^\circ$).

As Figuras 8.4, 8.5 e 8.6 mostram uma superfície com altura das raiais mais protusas, apresentando algumas marcas de deformações plásticas em certas seções da peça, possuindo também um gume da lima muito ranhurado. Apresentam um acabamento superficial e qualidade do gume muito inferiores às das demais peças ensaiadas.

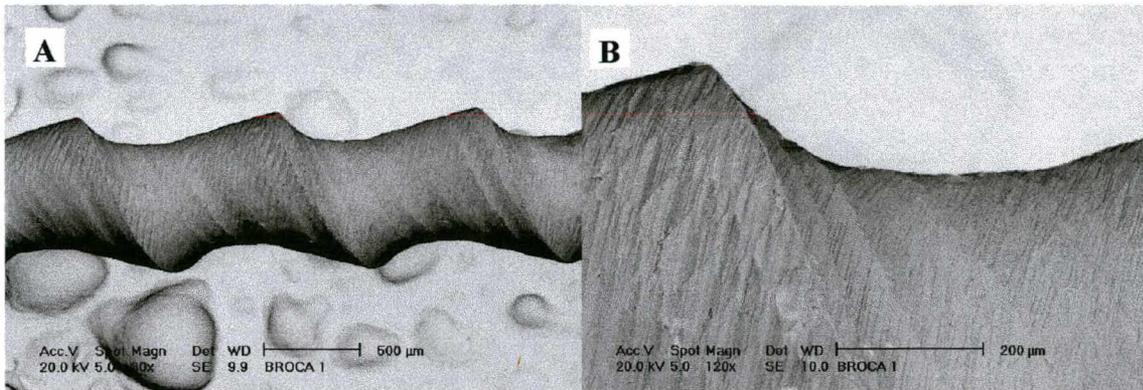


Figura 8.4 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 1; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ m/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 60^\circ$).

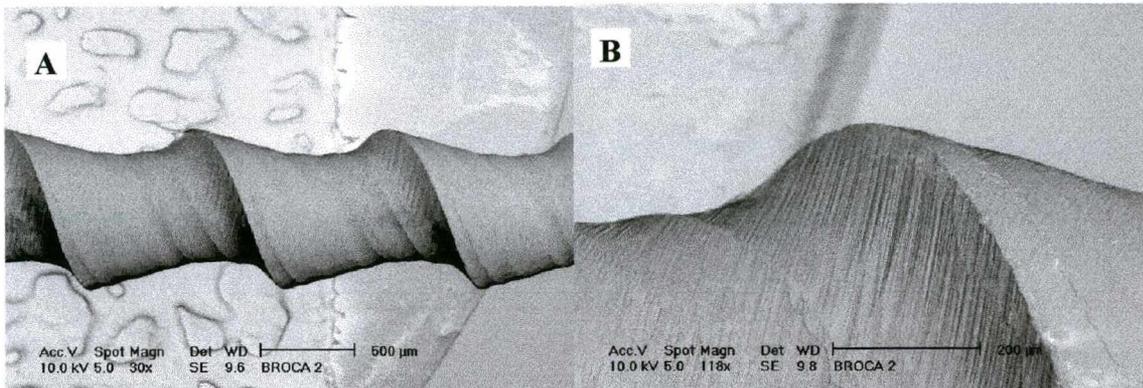


Figura 8.5 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 2; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 44$ m/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 60^\circ$).

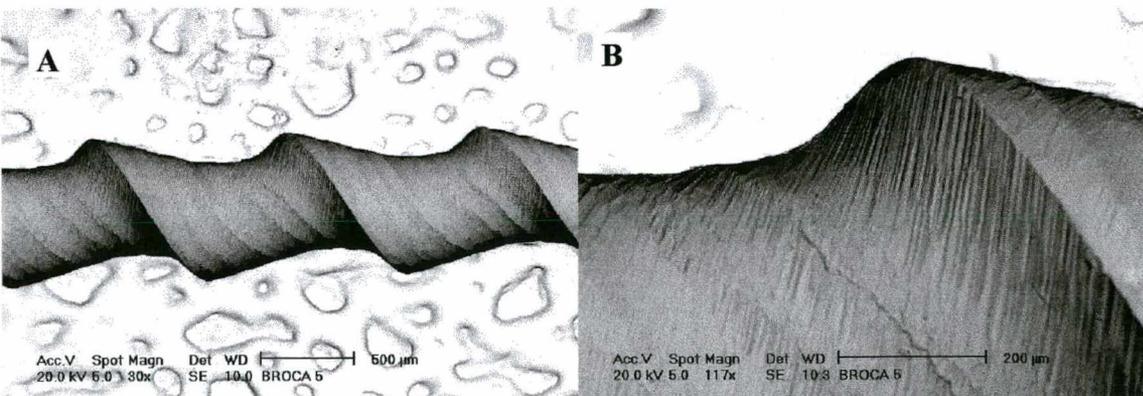


Figura 8.6 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 5; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ m/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,28$ mm, $\chi_r = 60^\circ$).

Nas Figuras 8.7, 8.8 e 8.9 observa-se um grau de acabamento superficial e qualidade do gume intermediário entre as demais.

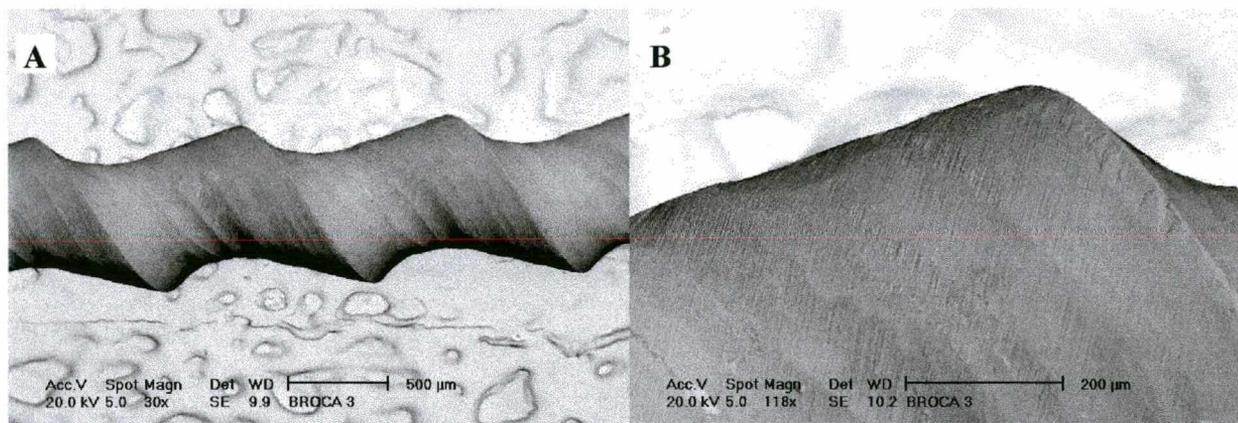


Figura 8.7 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 3; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ m/s, $v_p = 0,19$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 60^\circ$).

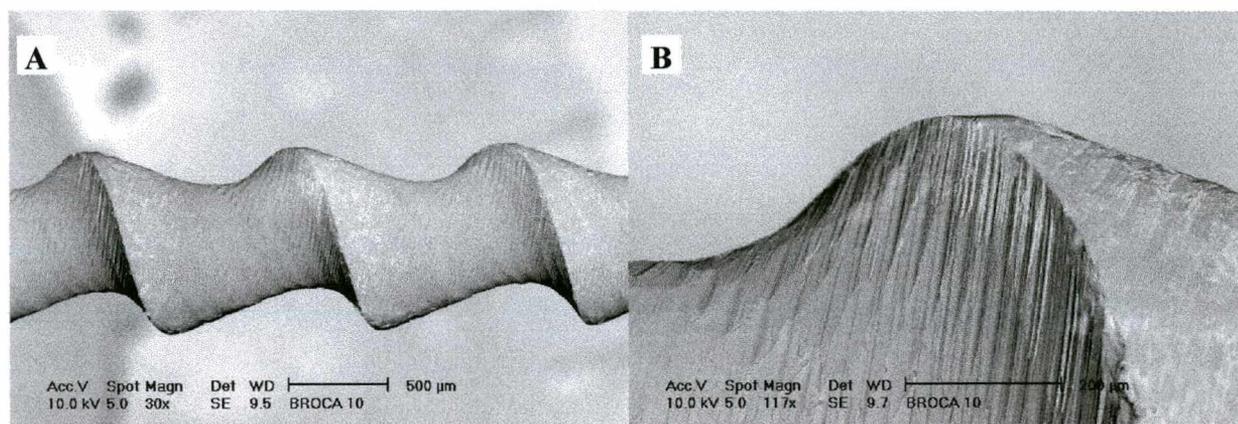


Figura 8.8 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 10; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 44$ m/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,20$ mm, $\chi_r = 65^\circ$).

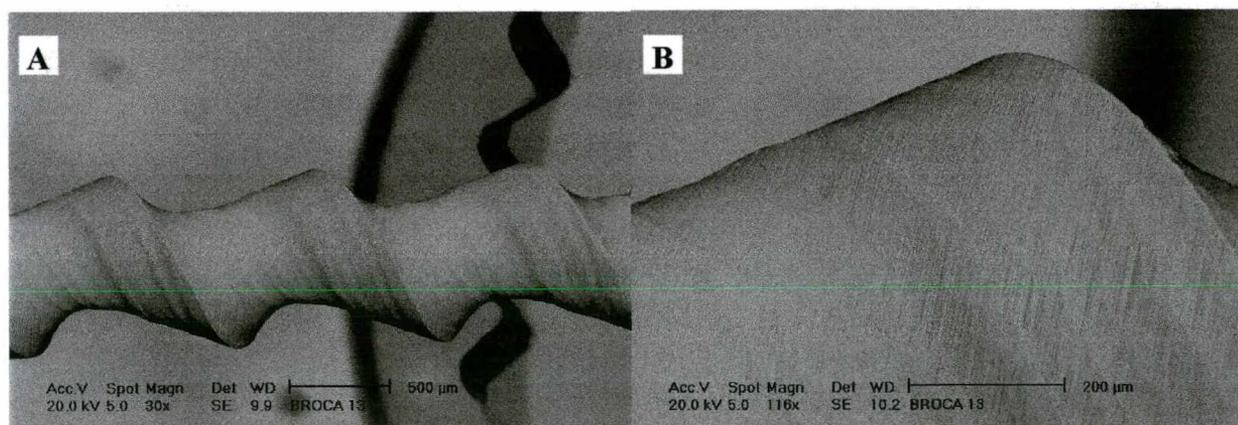


Figura 8.9 - Micrografia eletrônica da peça ensaiada nº 13; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ m/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,28$ mm, $\chi_r = 65^\circ$).

Fazendo-se uma análise qualitativa, o parâmetro que apresenta uma influência mais significativa, tanto a nível de acabamento superficial quanto a qualidade do gume, foi o ângulo de direção do gume do rebolo χ_r , que para valores de 60° apresentou resultados piores, enquanto que para valores de 65° apresentou os melhores resultados.

As Figuras 8.10 e 8.11 apresentam a seção longitudinal de duas peças ensaiadas.

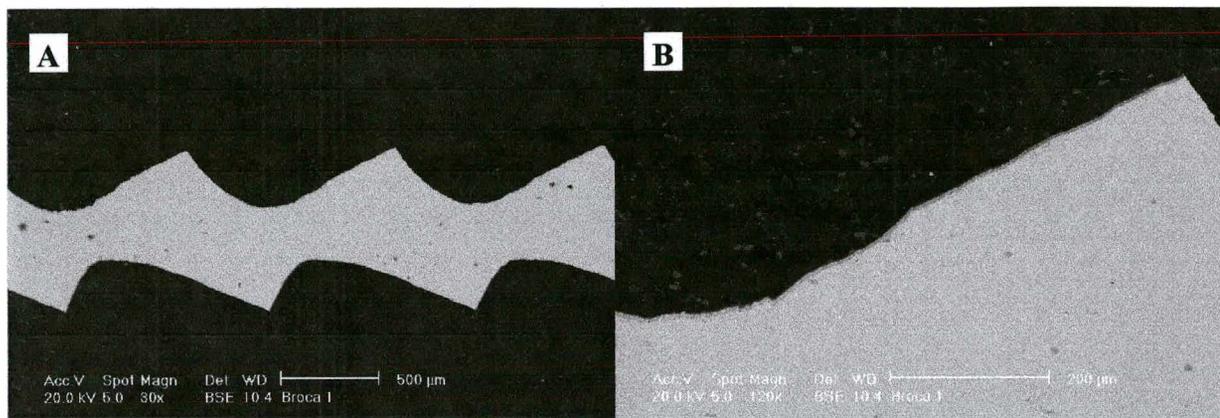


Figura 8.10 - Micrografia eletrônica da seção longitudinal da peça ensaiada nº 13; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ m/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,28$ mm, $\chi_r = 65^\circ$).

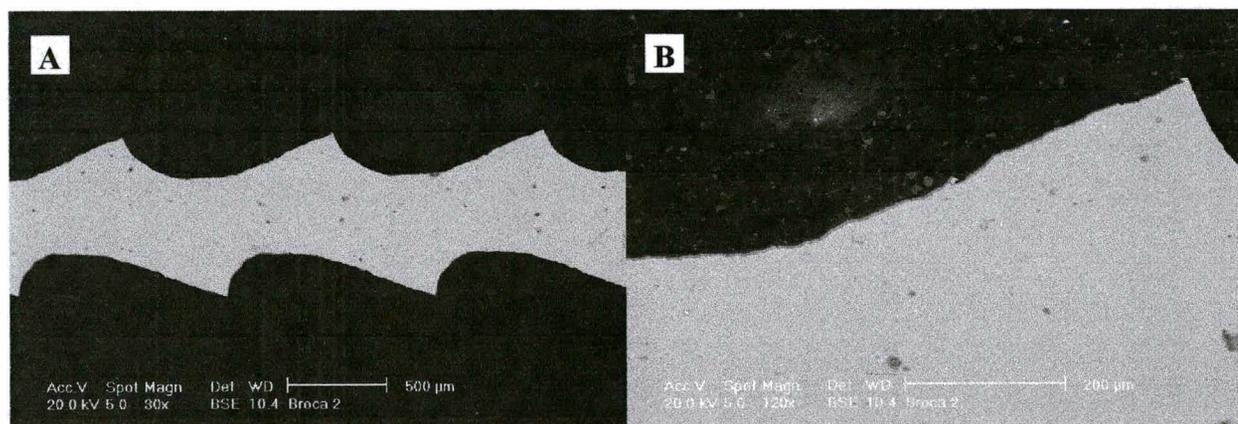


Figura 8.11 - Micrografia eletrônica da seção longitudinal da peça ensaiada nº 13; (a) aumento de 30x e (b) aumento de 120x ($v_r = 31,5$ m/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,28$ mm, $\chi_r = 60^\circ$).

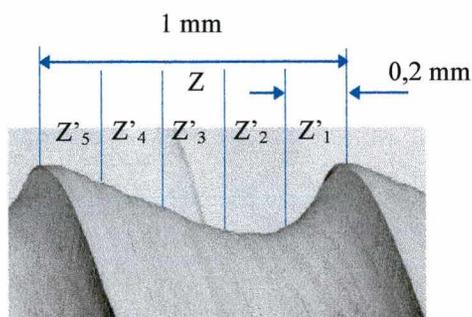
Observa-se nas Figuras 8.10 e 8.11 que mesmo mudando o valor do ângulo de direção do gume (χ_r), as peças (limas usinadas) apresentam um ângulo de incidência (α) alto e um ângulo de saída (γ) negativo e não linear; isto é, aumenta na medida em que se afasta do gume de corte. Com isso o ângulo de cunha (β) sempre apresenta valores próximos de 90° , sendo muito resistente a quebras.

8.7.2 CRITÉRIO TAXA DE RETIFICAÇÃO

A Tabela 8.1 mostra a taxa de retificação (Z) em mm^3/s e as taxas de retificação específicas (Z'_i) em $\text{mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$. A Figura 8.12 apresenta as regiões das taxas de retificação e as condições dos ensaios, relacionadas a Tabela 8.1.

Tabela 8.1 - Taxas de retificação (Z) em mm^3/s e taxas de retificação específicas (Z') em $\text{mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$.

ensaio	Z'_1	Z'_2	Z'_3	Z'_4	Z'_5	Z'	Z	tempo (s)
1 (1)	0,15	0,21	0,20	0,15	0,10	0,16	0,16	19,03
3 (b)	0,32	0,45	0,44	0,34	0,22	0,35	0,35	8,82
5 (c)	0,18	0,23	0,22	0,18	0,13	0,19	0,19	19,16
7 (bc)	0,44	0,59	0,57	0,48	0,37	0,49	0,49	9,27
9 (d)	0,11	0,21	0,20	0,14	0,06	0,14	0,14	19,25
11 (bd)	0,21	0,39	0,36	0,25	0,12	0,26	0,26	8,88
13 (cd)	0,14	0,22	0,21	0,14	0,07	0,16	0,16	19,28
15 (bcd)	0,41	0,53	0,51	0,41	0,27	0,43	0,43	8,81



ensaio	v_r (m/s)	v_p (m/min)	a_p (mm)	χ_r (°)
1	31,5	0,09	0,20	60
3	31,5	0,19	0,20	60
5	31,5	0,09	0,28	60
7	31,5	0,19	0,28	60
9	31,5	0,09	0,20	65
11	31,5	0,19	0,20	65
13	31,5	0,09	0,28	65
15	31,5	0,19	0,28	65

Figura 8.12 - Regiões das taxas de retificação e condições dos ensaios

Observa-se que a peça ensaiada 7 ($v_r = 31,5$ m/s, $v_p = 0,19$ m/min, $a_p = 0,28$ mm e $\chi_r = 60^\circ$) apresenta a maior taxa de retificação (Z) sendo 3,5 vezes maior do que a menor taxa de retificação obtida, que corresponde à peça ensaiada nº 9 ($v_r = 31,5$ m/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,20$ mm e $\chi_r = 65^\circ$).

Na comparação entre as taxas de retificação específicas observa-se que a região 2 (Z'_2), seguida pela região 3 (Z'_3), apresenta os maiores valores. Esta região representa a zona de corte da quina do rebolo, sendo um ponto crítico e apresentando o maior desgaste do rebolo.

A Figura 8.13 mostra um corte da seção transversal de uma peça ensaiada. Observa-se na linha (a) a seção transversal da peça bruta de diâmetro 1 mm. A linha (b) mostra o diâmetro máximo da peça ensaiada, que equivale a aproximadamente 0,85 mm.

Condições do ensaio: $v_r = 31,5$ m/s, $v_p = 0,09$ m/min, $a_p = 0,20$ mm e $\chi_r = 65^\circ$.

A peça ensaiada apresenta uma tendência de formato em vírgula, chegando muito próximo da seção transversal esperada (como apresentada no capítulo 3).

A peça mostrada na Figura 8.13 sofreu uma redução substancial da seção transversal em relação à matéria bruta de aproximadamente 40% em área.

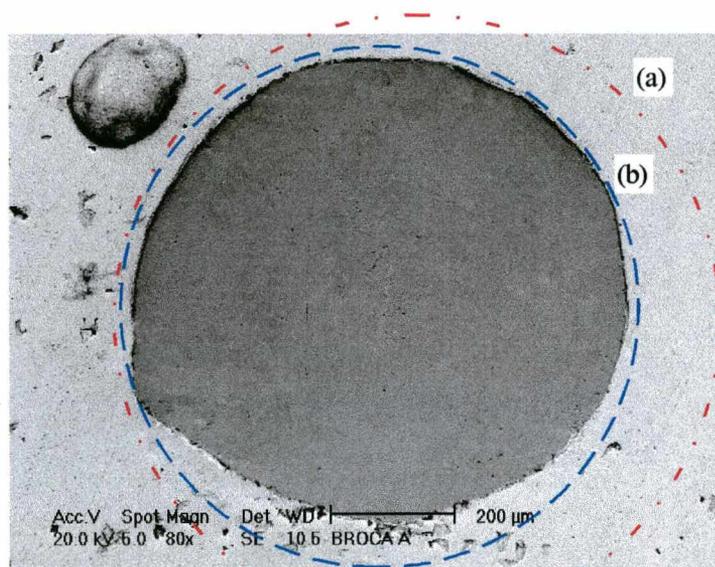


Figura 8.13 - Micrografia eletrônica da seção transversal da peça ensaiada: (a) diâmetro da peça bruta, (b) diâmetro da peça usinada.

A Tabela 8.2 apresenta o percentual de volume total removido em relação à matéria bruta, podendo ter remoções de 40 a 65%. Acima de 65% as peças apresentam sinais de queima e abaixo de 40% não se obteve o perfil desejado das limas Hedström, para os parâmetros usados.

Tabela 8.2 - Percentual de volume removido em relação à matéria bruta

ensaio	v_r (m/s)	v_p (m/min)	a_p (mm)	χ_r (°)	V_{rem} mm^3	V_{total} mm^3	V_{rem}/V_{total} (%)
1	31,5	0,09	0,20	60	3,11	6,32	49
3	31,5	0,19	0,20	60	3,12	6,52	48
5	31,5	0,09	0,28	60	3,61	6,34	57
7	31,5	0,19	0,28	60	4,56	7,01	65
9	31,5	0,09	0,20	65	2,75	6,31	44
11	31,5	0,19	0,20	65	2,35	6,40	37
13	31,5	0,09	0,28	65	3,03	6,37	48
15	31,5	0,19	0,28	65	3,75	6,40	59

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

A descoberta de uma nova iguaria faz mais pela felicidade humana que a descoberta de uma nova estrela.

Anthelme Brillat-Savarin (1755-1826).

É possível a obtenção de limas Hedström pelo processo de retificação tipo *creep-feed*, com rebolos de CBN, proposto e executado neste trabalho (método de fabricação por usinagem), assim como outras limas com seções transversais diversas.

Não se conseguiu obter a seção transversal nas peças ensaiadas próxima da seção transversal de uma lima Hedström. Mesmo assim, a peça ensaiada possui uma característica muito importante e superior às limas Hedström, ou seja, não apresenta a tendência de cravar nem de cortar uma quantidade de dentina muito grande em relação ao seu corpo, o que poderia provocar a fratura e o travamento da lima no interior do canal.

O protótipo cumpriu o seu objetivo inicial, que é de demonstrar que o processo de retificação para obtenção das limas Hedström é adequado para as pequenas dimensões da peça a ser fabricada, mesmo com limitações na execução da parte ativa da lima de forma cilíndrica, isto é, a impossibilidade de obter a conicidade da lima e nem a guia de penetração.

O êxito obtido com os testes no protótipo vem provar que toda a concepção proposta da máquina retificadora empregada neste trabalho, desde a fase de identificação das necessidades e definição das especificações até, finalmente, a concepção da máquina, é plenamente justificável e viável.

Com esta comprovação pode-se ainda passar para a fase de detalhamento do projeto, ou seja, uma pesquisa mercadológica das variações dos componentes escolhidos para a máquina-ferramenta como custos, dimensões, disponibilidade, intercambialidade, etc..

Mesmo não utilizando o material indicado às limas Hedström (aço inoxidável martensítico 440) não se diminuiu a complexidade do processo de retificação, nem a

veracidade das conclusões quanto a este processo. A seguir descreve-se os pontos fundamentais do processo de obtenção das limas obtidas através do emprego do protótipo.

- A peça a ser retificada não pode fletir para que se obtenha um perfil bem homogêneo. Deve-se ter um bom alinhamento entre o rebolo, a peça e o prisma de sujeição.
- A movimentação da peça mostrou-se um elemento crucial no processo de obtenção das limas, visto que qualquer erro de movimentação ou vibrações neste sistema são repassados para o perfil das limas.
- O rebolo (ponta montada) junto com o cabeçote retificador apresentam uma menor parcela de erros, pois pode-se, quando necessário, executar um dressamento deste conjunto de uma só vez. Não se deve esquecer que, entretanto, o cabeçote retificador deve estar balanceado na classe de precisão G 0,4.
- Há a necessidade de utilizar-se um rebolo que garanta seu perfil de quina por um longo período de tempo, pois a taxa de retificação específica (Z') é muito maior nesta região do que nas demais, ocasionando um grande desgaste nesta área.
- Deve-se procurar empregar velocidades de corte mais elevadas (acima da utilizada 44 m/s) para garantir uma alta vida do rebolo.
- O perfil do rebolo utilizado mostrou-se não muito adequado para a obtenção de uma seção transversal na forma de vírgula. Todavia perfis com ângulos menores do que 90° poderiam causar um maior desgaste da quina do rebolo por fragilidade.
- Um fator que aparentemente mostrou-se importante foi o ângulo de direção do gume (χ_r) que, para valores de 65° , apresentou melhores resultados quanto ao acabamento superficial e à qualidade da quina. Uma comprovação destes resultados dependem, entretanto, de um maior número de ensaios.
- Observou-se que mesmo mudando o valor do ângulo de direção do gume, as peças ensaiadas apresentam uma ângulo de incidência alto e um ângulo de saída negativo e não linear, aumentando na medida em que se afasta do gume de corte. Com isso o ângulo de cunha apresenta valores próximos de 90° , sendo muito resistente à

quebras.

- Verificou-se que a faixa de remoção ótima, entre o volume removido e o volume total (da matéria bruta), é de 40 a 65%. Onde abaixo de 40% de remoção as peças ensaiadas não apresentaram o perfil desejado e acima de 60% de remoção ocorreu a queima das peças. Novamente uma comprovação destes resultados dependem de um maior número de ensaios.

Alguns trabalhos que poderão dar continuidade a esta área são descritos a seguir:

1. Construção da máquina-ferramenta com cinco eixos comandados numericamente;
2. Ensaios em diferentes materiais, como ligas de titânio e com as ligas de aço inoxidável martensítico (440 ou 420);
3. Ensaios de diferentes geometrias de instrumentos endodônticos;
4. Comparação entre instrumentos produzidos e os obtidos comercialmente;
5. Otimização do processo, envolvendo mais variáveis e ensaios mais numerosos;
6. Análise de custos (viabilidade econômica);
7. Confecção de novas geometrias da parte ativa e da guia de penetração de limas endodônticas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] HARTY, F.J.; SONDOOZY, A.E. A situação dos instrumentos endodônticos padronizados, **Journal of the Endodontic Society**, 1972.
- [2] FAVA, L.R.G. Estandarização em endodontia: ficção ou realidade. **ARS CVRANDI em odontologia**, jan. 1980.
- [3] BERBET, A.; BRAMANTE, C.M.; BERNARDINELI, N. **Endodontia Prática**, São Paulo, 1^oed., Sarvier, 1980.
- [4] DE DEUS, Q.D. **Endodontia**, Rio de Janeiro, 3^oed., Medsi, 1982.
- [5] STENMAN, E.; SPÅNGBERG, L.E.W. Root canal instruments are poorly standardized, **Jornal of Endodontics**, v.19, n^o7, july 1993.
- [6] **JADA**, New American Dental Association Specification n^o 28 for Endodontic Files and Reamers; Report of Councils and Bureaus; v. 93, oct. 1976.
- [7] INGLE, J.I.; LEVINE, M.A. The need for uniformity of endodontic instruments, equipments and filling materials. **Transactions of the second international conference on endodontics**, Philadelphia University, Grassman, L.I. editor, Philadelphia, 1958.
- [8] **MACHINE AND TOOL BLUE BOOK**, Machining Stainless Steels, mar. 1986.
- [9] CURTIS Jr, A.; FICHMAN, D.M.; ROSSETINI, S.M.O. Estudo da eficiência de limas endodônticas submetidas à esterilização pelo calor, **ARS CVRANDI em odontologia**, jan. 1980.
- [10] WICK, C. Precision Grinding Stainless Steels and Superalloys, **Manufacturing Engineering**, june 1980.
- [11] CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, 6^a ed. ABM, São Paulo, 1992.
- [12] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren Band 1 - Drehen, Fraesen und Bohren**, Düsseldorf: VDI. v.1, 1981.

- [13] BORK, C. A. S. **Otimização das variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico** DIN 1.4541, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) UFSC, 1995.
- [14] ASM INTERNATIONAL **Metals Handbook: machining**, Ohio: Metals Park, 1989. v.19.
- [15] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren: Schleifen, Honen und Läppen**. 3 Aufl. Düsseldorf: VDI. v.2, 1989.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR METALS **Metals Handbook: Machining**. Ohio, USA, sept. 1992.
- [17] PERES, R. M. **Caracterização do processo e verificação das grandezas de entrada no brunimento de curso longo do tipo "precidor"**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) UFSC, set. 1994.
- [18] NUSSBAUM, G. C. **Rebolos e Abrasivos: tecnologia básica**. Ed. Ícone, São Paulo, 1988.
- [19] BIANCHI, E.C.; VIEIRA JÚNIOR, M.; et al. A otimização da agressividade de rebolos pelas condições de usinagem e dressagem. **Máquinas e Metais**. maio 1996.
- [20] STOKES, R. J.; COOLEY, B. A. Ultrahard abrasive selection for grinding of stainless steels. **DeBeers Industrial Diamond Div. Ltd**. Ascot, England.
- [21] STEMMER, C.E. **Ferramentas de corte II**, Florianópolis: Ed. da UFSC, 1992.
- [22] SME TMEH - **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**: v.1, Machining. 40 ed., Michigan, USA, 1983.
- [23] WHITEHOUSE, D.J. **Handbook of Surface Metrology**. 199-.
- [24] PEREIRA, M.; PERES, R.M.; STOETERAU, R.L.; et al, **Retificadora para Blocos Padrão: partes I, II e III**, CPGEM-UFSC (Disciplina de projeto conceitual), Florianópolis, 1996.
- [25] BACK, N.; PERES, R.M. **Uma nova visão no modelamento de funções**, CPGEM-UFSC (Disciplina de projeto conceitual), Florianópolis, 1996.
- [26] SVENDESEN, K.H.; HANSEN, C.T. **Decomposition of Mechanical Systems and Breakdown of Specifications**, **Proceedings ICED 93**, The Hague, 1993.

- [27] **EGROJ INDÚSTRIA MECÂNICA** Ltda. Fusos de esferas, São Paulo. Catálogo.
- [28] WEINGAERTNER, W. L.; SANTOS, I. Usinagem de Ultraprecisão, **II CREEM**, UFRJ, ago. 1995.
- [29] STOETERAU, R. L. **Desenvolvimento de uma máquina-ferramenta CNC para usinagem de ultra-precisão**, Qualificação (Doutorado em Engenharia Mecânica), UFSC, 1996.
- [30] SLOCUM, A.H. **Precision Machine Design**. Prentice Hall: Cambridge, 1991.
- [31] BELTRÃO, P.A.C. **Furadeira de coordenadas com comando numérico para placas de circuito impresso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFSC, 1991.
- [32] MÜLLER, L.A. **Desenvolvimento de um cabeçote de precisão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFSC, 1994.
- [33] STOTERAU, R.L. **Comportamento estático e dinâmico de guias aerostáticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFSC, 1994.
- [34] ROCHA, A.S. **Contribuição para a fabricação de mancais aerostáticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UFSC, 1993.
- [35] WECK, M., et al. High Precision Spindle Technology. **Tutorial 6th IPES/UME 2**, IPT-Aachen, may 1991.
- [36] SIMON, A.T. Fusos de alta velocidade que usam mancais magnéticos. **Máquinas e Metais**, abril 1991.
- [37] CARLISLE, K.; SHORE, P. Experiences in the development of ultra stiff CNC aspheric generating machine tools for ductile regime grinding of brittle materials, **Progress in Precision Engineering**, Springer-Verlag, Braunschweig, Germany, may 1991.
- [38] OLIVEIRA, P.M. **Projeto, fabricação e qualificação de um mancal aerostático duplo-esférico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFSC, 1994.
- [39] SIEMENS. Simovert P: inversor de frequência por modulação de largura de pulsos (PWM) 1,0 a 56 kVA. Série 6SE21. Catálogo. ASI, jun. 1994.
- [40] WEG. WEG Máquinas S.A. Catálogo.

- [41] WEG. Servomotor trifásico imã permanente, Catálogo.1988.
- [42] C.& E. FEIN GmbH&Co., Warun Hochfrequenz - Elektrowerkzeuge ?, Stuttgart, Catálogo.
- [43] JACOB, L. Torsion Resistant Flexible Couplings. Catálogo.
- [44] JACOB, L. Applications of torcionally rigid, flexible couplings. Kleinwallstadt. JACOB Maschinenteile.
- [45] KRAUSE, W. **Konstruktionselemente der Feinmechanik**, VEB Verlag Technik Berlin.
- [46] DAVIDSON, A. **Handbook of precision engineering**, v.6 Mechanical Design Applications. McGraw-Hill, 1972.
- [47] INA **Lineartechnik oHG**. Profilschienenführungen, Homburg, Germany, april 1994. Catálogo.
- [48] INA **Lineartechnik oHG**. Application examples linear guidance systems. Homburg, Germany. jan. 1993. Catálogo.
- [49] DUFF-NORTON **INDUSTRIAL COMPONENTS DIVISION**, Metric Actuator Product Guide. Charlotte, USA.
- [50] IPIRANGA S.A. Husillos a bolas, Madrid - Irún, España. Catálogo.
- [51] FAÉ **MATRIZES E DISPOSITIVOS Ltda**. Manual de instrução - Cabeçote retificador planetário F-70, maio 1996.
- [52] SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL, MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO (MIC/STI), **Máquinas-ferramentas: Recomendações para Ensaio de Precisão Geométrica**. STI/IPT, maio de 1993 - março de 1974.
- [53] AÇOS VILLARES S.A. Aços para Ferramentas: Aços para Trabalho a Quente. São Paulo, SP.
- [54] GOMES, J.M.O. **Influência da variação metalúrgica sobre a usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos SAE 304 e SAE 316**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) UFSC, 1996.
- [55] STEMMER, C.E. **Ferramentas de corte I**, Florianópolis: Ed. da UFSC, 1987.

- [56] NANI, L.F., RIBEIRO, J.L., **Planejamento e Avaliação de Experimentos. Caderno de Engenharia.** 2a ed. Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre RS, jan. 1992.

OUTRAS BIBLIOGRAFIAS UTILIZADAS

- [57] BACK, N., **Projeto de Produtos Industriais: Projeto Conceitual.** Apostila CPGEM, Florianópolis, 1997.
- [58] WEINGAERTNER, W. L., **Desenvolvimentos na Usinagem de Ultraprecisão,** Monografia, UFSC, Florianópolis, out. 1992.
- [59] SLOCUN, A. H., **Short course in Precision Machine Design,** 1989.
- [60] **MACHINING DATA HANDBOOK,** v.2,
- [61] **SCHENK DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO Ltda,** Balanceamento: Atualidades. São Paulo, dez. 1987.
- [62] **SCHENK DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO Ltda,** Técnicas de Balanceamento Dinâmico II. São Paulo, abril 1987.
- [63] **MUNDO MECÂNICO,** Desenvolvimento: Técnicas de Balanceamento Consideradas no Projeto. ago. 1982.
- [64] **WEG.** Manual de motores elétricos WEG. Kingraf, Curitiba, out. 1978.

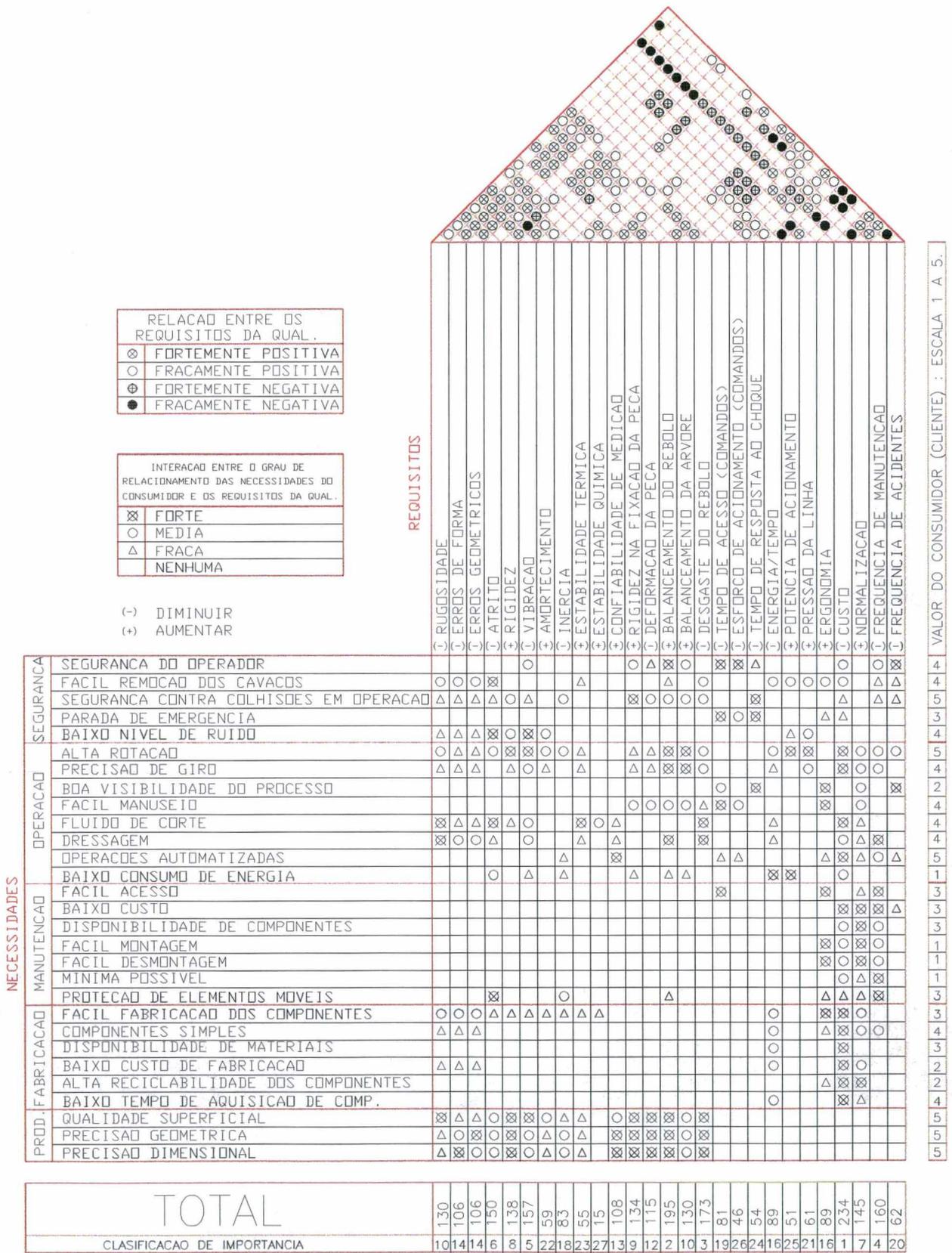


Figura A1.2 - Matriz de relação entre as necessidades dos clientes e os requisitos da retificadora, ou Casa da Qualidade.

ANEXO 2

Este anexo mostra fotos do protótipo apresentado neste trabalho, salientando-se os principais elementos constituintes.

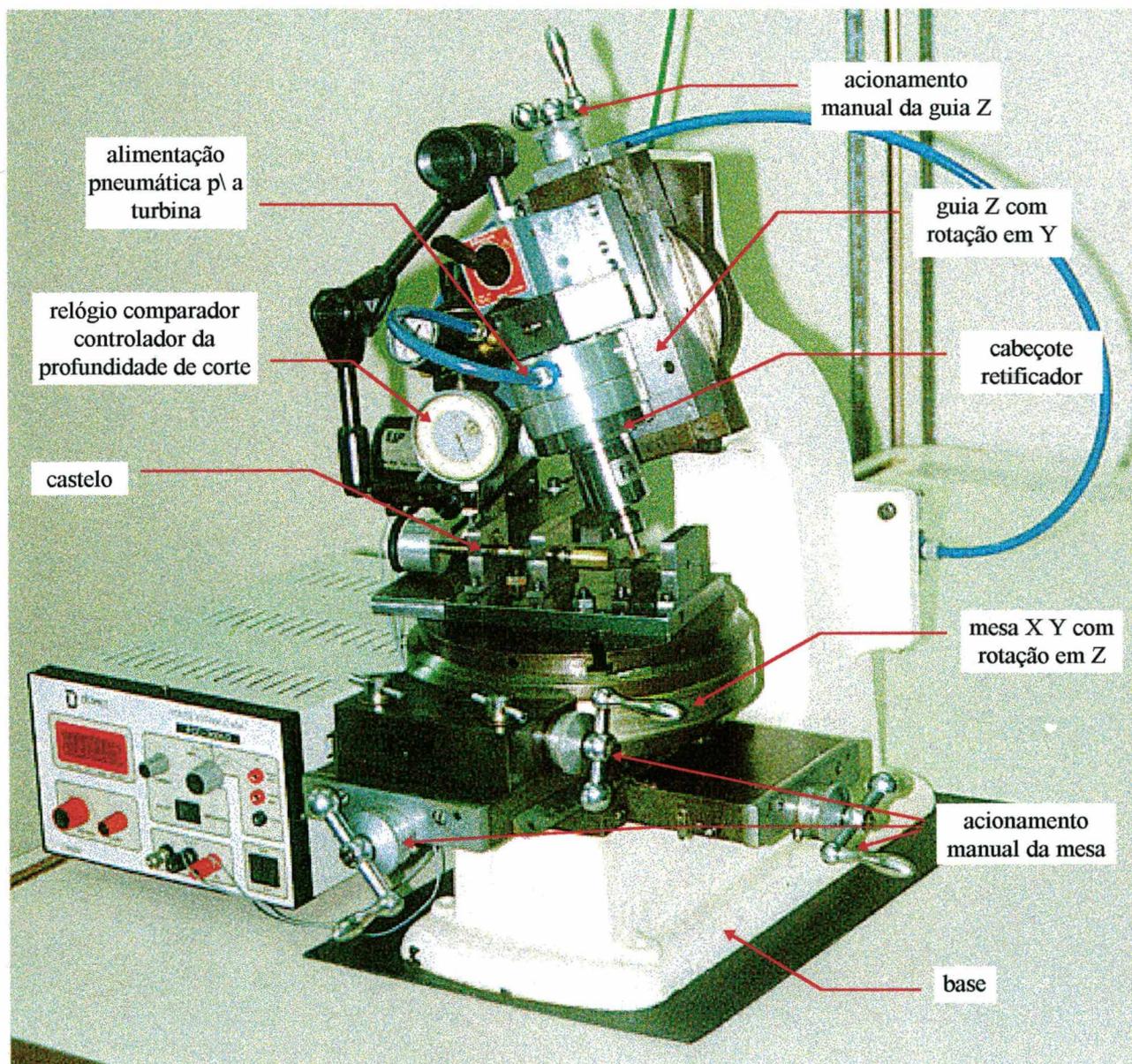


Figura A2.1 - Vista geral do protótipo.

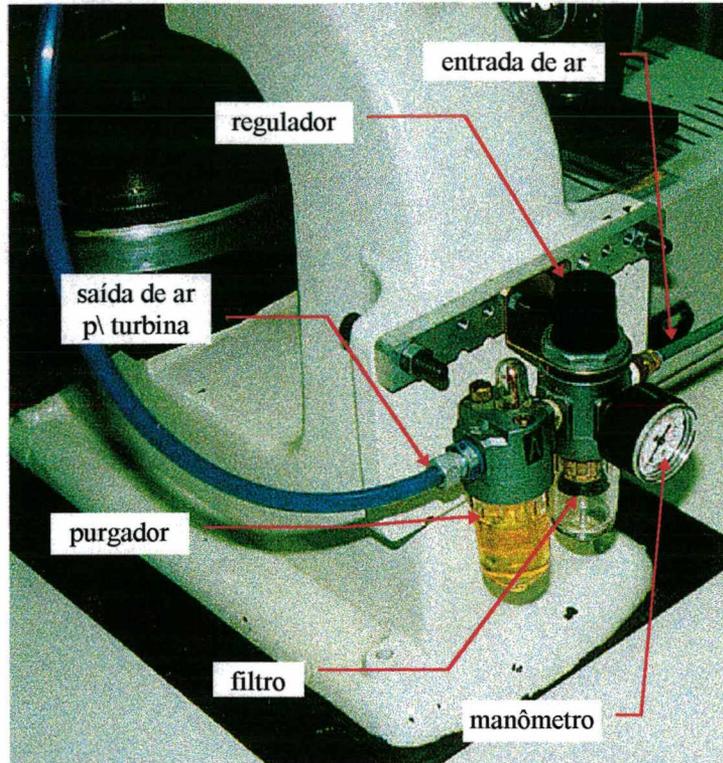


Figura A2.2 - Vista traseira do protótipo, mostrando o sistema controlador de ar.

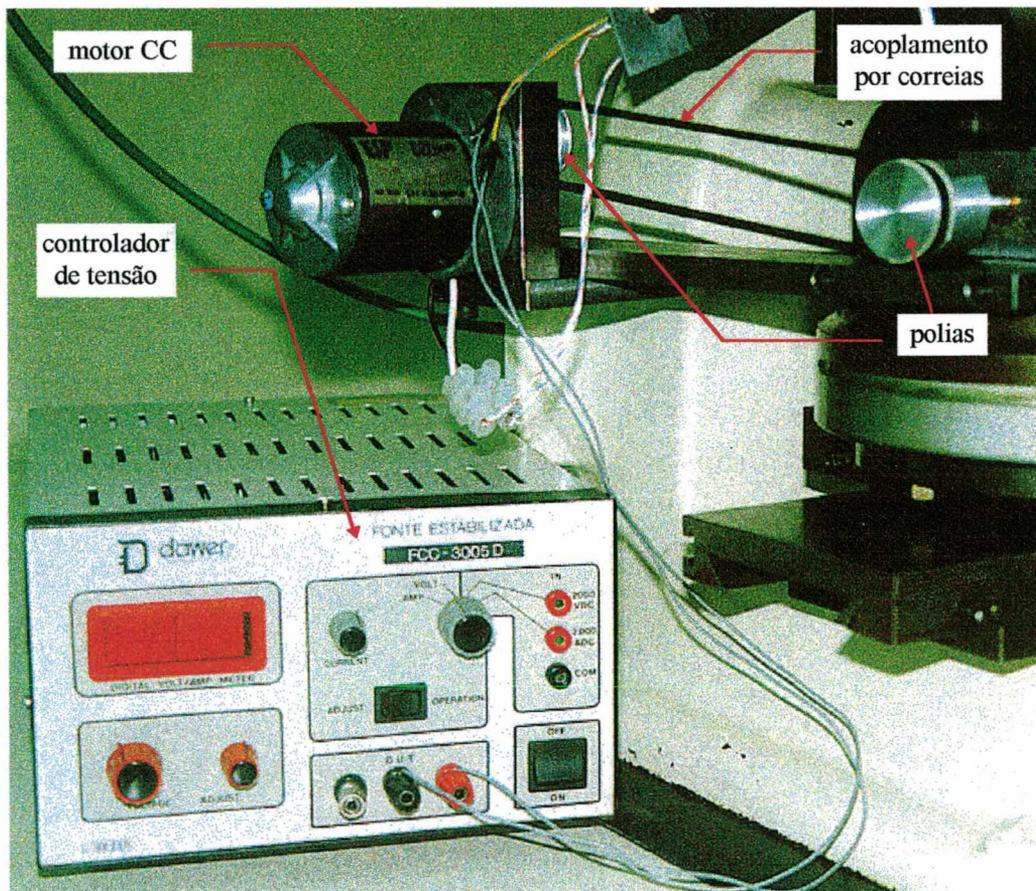


Figura A2.3 - Vista lateral do protótipo, mostrando o sistema de controle e movimentação da peça.

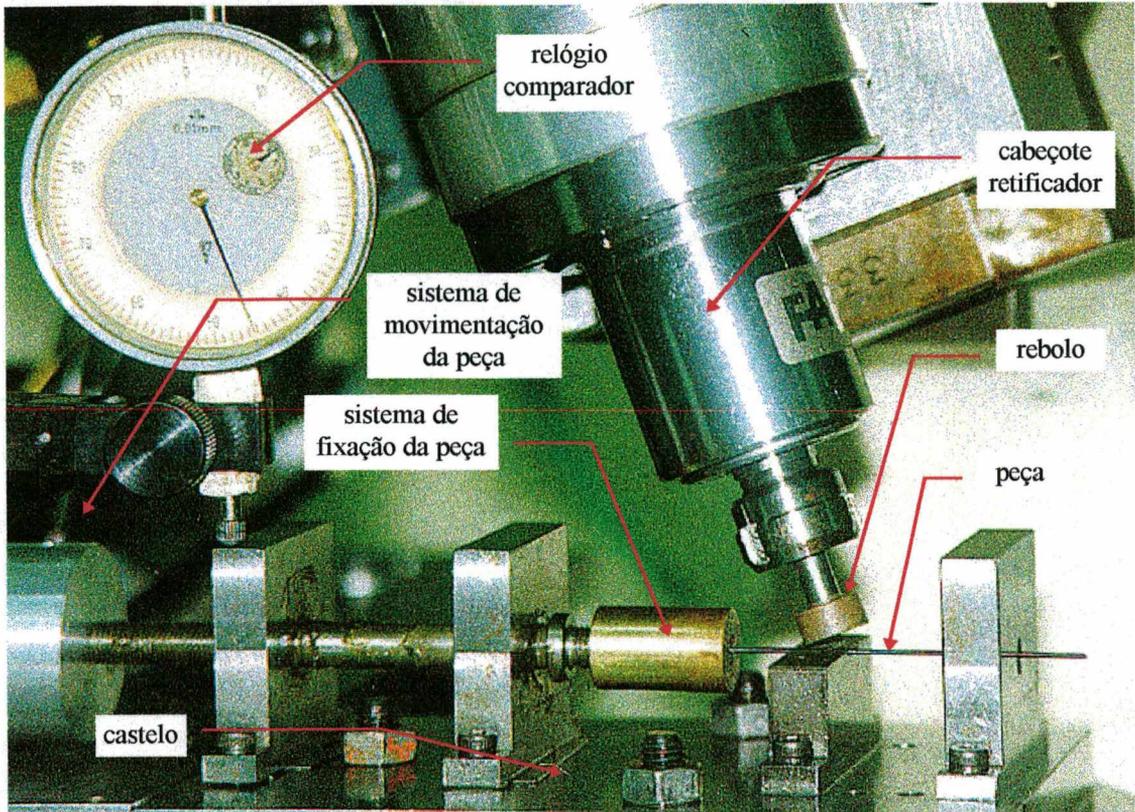


Figura A2.4 - Vista detalhada evidenciando o processo.

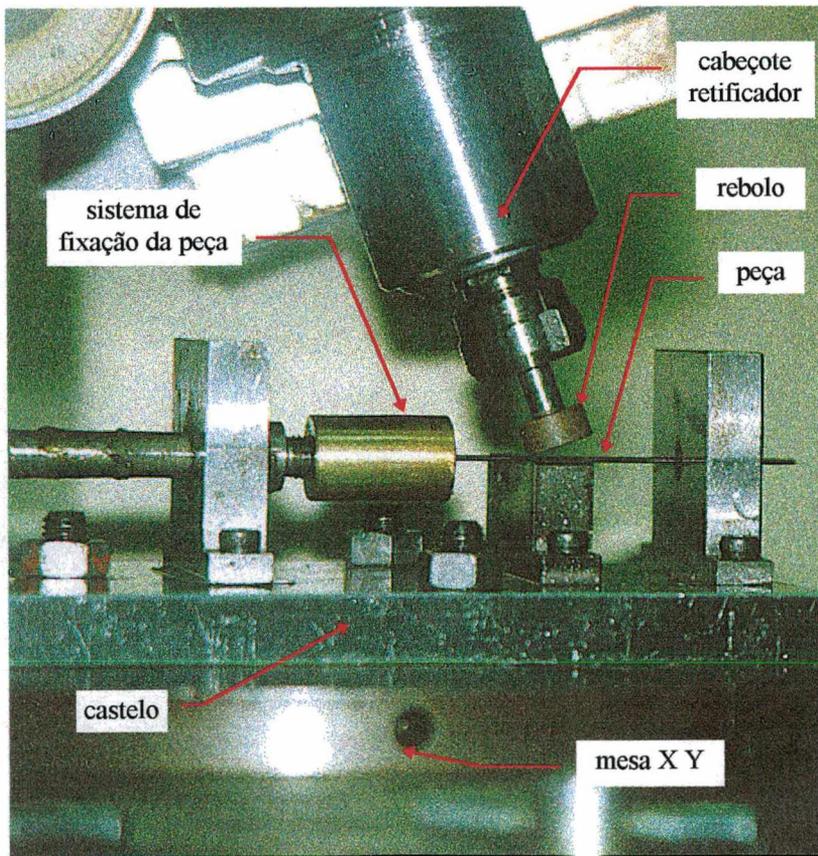


Figura A2.5 - Vista detalhada do processo.