

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

FRESAMENTO PERIFÉRICO DO AÇO AISI-SAE D6 TEMPERADO E REVENIDO
UTILIZANDO FRESAS DE METAL-DURO

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

LUIZ CARLOS DE CESARO CAVALER

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 2003

FRESAMENTO PERIFÉRICO DO AÇO AISI-SAE D6 TEMPERADO E REVENIDO
UTILIZANDO FRESAS DE METAL-DURO

LUIZ CARLOS DE CESARO CAVALER

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.

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

Jefferson de Oliveira Gomes, Dr. Eng.
Co-orientador

Prof. José A. Bellini da Cunha Neto, Dr.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

A minha esposa Ana Lúcia e ao meu filho Lucas pela paciência, a quem dedico o esforço na elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A minha Mãe Maria de Lourdes pela educação e exemplo de vida.

Ao meu pai Glaudino pelo carinho, incentivo, determinação e exemplo de persistência na sua vida.

A minha madrasta Tita pela ajuda na formação da minha personalidade.

A toda a minha família e da minha esposa, especialmente a minha sogra Silésia pelas palavras de conforto nas horas difíceis.

A minha irmã Eliane, ao meu tio Lúcio e a minha tia Maria Zélia pela moradia em Florianópolis.

Ao professor Walter pelo aval no mestrado, ao professor Jefferson pela co-orientação e ao professor Lourival pela cessão do espaço e infra-estrutura de trabalho.

Aos amigos formados no GRUCON-USICON: Delmonte, Fabiano, Xavier, P. Steidel e Pedro.

A todos os funcionários da ICON S.A. ESTAMPOS & MOLDES pela oportunidade de reentrar na Engenharia Mecânica pela porta da frente, em especial as seguintes pessoas: Álvaro, Lima, Ronaldo, Scotti, Losso, Sasso, Eli, Themines, Jorge, Donato, Carlinhos, Hélio, Fabio, Valter, Marinelson, Sidnei, Lourival, Everton, Nápoli, Osmar, Adilson, Ubiratan, Renilto, Geonini, Carlos, Fernando, Sérgio, Charles, Fabrício, Eder, Valmer, Renato, Frelô , Alípio, Silva, Toninho, Vera e Iolanda.

As empresas METALBEZ (UOP), GÜHRING, TITEX, MTB (WIRTH), REPATRI (SANDVIK), KENNATECH (Kennametal), TAMURU (ISCAR) e Rubens Moreira Ltda. (BARDAHL) pelo fornecimento dos insumos necessários à realização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver ferramentas, métodos e parâmetros de corte, que possam ser aplicados na usinagem por fresamento periférico de matrizes montadas, com insertos curvilíneos de aço AISI-SAE D6 temperado e revenido com dureza de 60-62 HRC. Nestes insertos utilizaram-se fresas inteiriças de metal-duro revestidas, nos diâmetros de 9 e 10 mm com 3, 4 e 6 gumes. Para alcançar o objetivo acima executou-se a primeira fase de ensaios propostos pelos fabricantes de ferramentas, com fresas revestidas de diâmetros de 8, 10 e 12 mm e 3, 4, 5, 6 e 12 gumes, no fresamento periférico de desbaste em corpos de prova retilíneos também em aço D6 (60-62 HRC). Na busca de maiores informações sobre os metais-duros empregados nas fresas destes ensaios, efetuou-se uma análise metalográfica. Os parâmetros de rugosidade R_a e R_t obtidos nos corpos de prova retilíneos de aço D6 foram comparados com normas, em desbaste (fresamento e retificação) e acabamento (retificação). A avaliação dos resultados obtidos mostrou que a melhor ferramenta testada para desbaste do aço D6 foi, diâmetro de 10 mm, 6 gumes, ângulo de hélice de 45° e ângulo de saída ortogonal de -10° , considerando os critérios: volume de material removido, vida da ferramenta e taxa de usinagem. A mesma ferramenta teve também um bom resultado no acabamento de insertos curvilíneos montados em um corpo de matriz, considerando os parâmetros verticais de rugosidade R_a e R_t .

Palavras-chave: Ferramentas, Fresamento, Aço D6.

ABSTRACT

The objective of this work was to develop tools, methods and cutting parameters, that will can to be applied in machining by peripheral milling of mounted dies, with curvilinear inserts of AISI-SAE D6 steel quenched and tempered with hardness of 60-62 HRC. Solid carbide end mills coated were used in these inserts, in the diameters 9 e10 mm and with 3, 4, 6 cutting edges. For to succesful in the objective above was made the first phase of tests intended by manufacturers of tools, with end mills coated with diameters of 8, 10 and 12 mm and 3, 4, 5, 6 and 12 cutting edges, in the roughing peripheral milling in rectilinear test worhpieces also in D6 steel (60-62 HRC). In order to obtain larger informations about the hard-metals used in end mills in these tests was made a metalographic analysis. The roughness parameters R_a and R_t obtained in the rectilinear test worhpieces of D6 steel were compared with standards, in roughing (milling and grinding) and finishing (grinding). The evaluation of the obtained results showed that the best tested tool for the roughing of the D6 steel was, diameter 10 mm, 6 cutting edges, helix angle of 45° and orthogonal rake angle of -10° considering the criteria: machined volume, tool life and removal rate. The same tool also had the good result in the finishing of curvilinear inserts mounted in a die considering the roughness vertical parameters R_a and R_t .

Keywords: Tools, Milling, D6 steel.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE REDUÇÕES	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1 Fatores Determinantes no Processo de Fresamento	8
2.2 Fluido de Corte para Fresamento	11
2.3 Máquina-Ferramenta para Fresamento de Aços Endurecidos	13
2.4. Ferramenta	15
2.4.1 Terminologia	15
2.4.2 Direção da Hélice em Relação ao Corte	18
2.4.3 Formatos do Gume Principal.....	19
2.4.4 Configuração das Cunhas das Partes Cortantes da Fresa	20
2.4.5 Seleção da Fresa Quanto ao Número de Gumes	20
2.4.6 Materiais das Ferramentas.....	22
2.4.7 Revestimentos das Ferramentas.....	24
2.5 Vida da Ferramenta	26
2.5.1 Reafiação das Fresas de Topo	29
2.6 Sistemas de Fixação da Ferramenta ao Cone.....	31
2.7 Sistemas de Fixação do Cone na Árvore da Máquina.....	36
2.8 Avaliação da Usinabilidade.....	38
2.9 Propriedades e Usinabilidade do Material para Matriz	42
2.9.1 Aço-Ferramenta para Trabalho a Frio D6	42
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 Infraestrutura de Ensaio.....	44
3.1.1 Máquina-Ferramenta.....	45

3.1.2 Unidade de Aferição de Ferramentas.....	45
3.1.3 Dispositivo para Medição do Batimento	46
3.1.4 Equipamento para Avaliação de Desgaste da Ferramenta.....	46
3.1.5 Equipamento para Medição da Rugosidade	48
3.1.6 Equipamento para Medição de Dureza.....	53
3.1.7 Fluido de Corte.....	54
3.2 Material dos Corpos de Prova	54
3.3 Ferramentas	55
3.3.1 Ensaio Metalográfico com as Ferramentas de Corte	56
3.4 Metodologia dos Ensaios.....	57
3.4.1 Ensaio de Desbaste no Corpo de Prova Retilíneo	58
3.4.2 Ensaio de Acabamento no Corpo de Prova Retilíneo	59
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
4.1 Ensaio no Corpo de Prova Retilíneo.....	61
4.1.1 Ensaio de Desbaste no Corpo de Prova Retilíneo	61
4.1.2 Ensaio de Acabamento no Corpo de Prova Retilíneo	71
4.2 Análise Metalográfica das Ferramentas de Corte.....	72
5. ESTUDO DE CASO	74
5.1 Insetos Curvilíneos de D6 Montado à Matriz.....	74
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	83
6.1 Conclusões	83
6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos.....	85
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
8. ANEXOS	94
8.1 Máquina-Ferramenta	94
8.2 Equipamento de Aferição de Ferramentas	94
8.3 Equipamento para Avaliação do Desgaste	95
8.4 Equipamento para Medição da Rugosidade	95
8.5 Microscópio para Análise Metalográfica	95

8.6 Equipamento para Medição de Dureza.....	95
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Grandezas de penetração no fresamento periférico [45, 67].	3
Figura 2.2 - Fresamento periférico : a - discordante , b - concordante [16].	6
Figura 2.3 - Estrutura tipo pórtico fixo [58].	14
Figura 2.4 - Termos da fresa helicoidal de topo reta de haste cilíndrica [19].	16
Figura 2.5 - Sentido de corte e da hélice [16].	18
Figura 2.6 - Gume com quebra-cavaco plano [16].	19
Figura 2.7 - Tipos de alívio [16].	20
Figura 2.8 - Comparação do número de gumes [16].	21
Figura 2.9 - Revestimento multicamada [37].	25
Figura 2.10 - Desgaste de flanco na cunha de corte.	28
Figura 2.11 - Excentricidade do mandril <i>Weldon</i> [42].	32
Figura 2.12 - Esquema de funcionamento do mandril hidráulico [42].	33
Figura 2.13 - Distribuição das temperaturas no sistema por indução [44].	34
Figura 2.14 - Esquema de funcionamento do mandril hidro-mecânico [41].	35
Figura 2.15 - Cone flange V [42].	36
Figura 2.16 - Cone HSK [42].	36
Figura 2.17 - Representação esquemática do comportamento da vida da ferramenta de corte em função da velocidade de corte ($\log T \times \log v_c$) [74].	39
Figura 2.18 - Fatores influentes sobre a qualidade da superfície usinada [64].	40
Figura 3.1 - Montagem básica dos corpos de prova na máquina-ferramenta.	44
Figura 3.2 - Aferidor de ferramentas WOTAN.	45
Figura 3.3 - Equipamento para avaliação digital do desgaste.	47
Figura 3.4 - Equipamento para medição da rugosidade.	48
Figura 3.5 - Comparação entre as capacidades de penetração de uma sonda óptica com a mecânica [12].	49
Figura 3.6 - Caracterização do parâmetro R_a [12].	49
Figura 3.7 - Caracterização do parâmetro R_t [12].	50
Figura 3.8 - Regiões de medição de rugosidade no CP retilíneo.	51
Figura 3.9 - Esquema para ensaio de dureza Rockwell [70].	53
Figura 3.10 - Montagem do CP retilíneo à mesa da máquina-ferramenta.	55

Figura 4.1 - Cegamento do gume da fresa de topo.....	62
Figura 4.2 - Formas de cavaco: a - início do ensaio, b - meio do ensaio, c - fim de ensaio.	63
Figura 4.3 - Lascamentos do gume principal.....	63
Figura 4.4 - Cavaco azulado com forma de fita helicoidal curta.	65
Figura 4.5 - Aspecto da qualidade da superfície usinada.....	66
Figura 4.6 - Amostras de fresa analisadas: a - fabricante. Nº 5, b - fabricante Nº 7, c - fabricante Nº 3, d - fabricante Nº 8 (aumento de 8000x).....	72
Figura 5.1 - Montagem dos insertos curvilíneos em um corpo de matriz.	75
Figura 5.2 - Detalhe da montagem desencontrada dos insertos curvilíneos junto à matriz.	75
Figura 5.3 - Ferramenta para o desbaste.....	76
Figura 5.4 - Ferramenta para o acabamento.....	76
Figura 5.5 - Interpolação de desbaste para alívio de cantos.....	80
Figura 8.1 - Centro de Usinagem Vertical HAAS VF-3.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Geometria de fresas de topo de metal-duro para aços endurecidos [26, 27, 76, 23].	17
Tabela 2.2 - Características de fabricantes de fresas de topo MD com micro-grão [30, 27, 32, 31, 33].	24
Tabela 2.3 - Classificação dos grãos de MD [77].	24
Tabela 2.4 - Propriedades dos tipos de revestimentos de TiAlN [37].	25
Tabela 2.5 - Recomendações para reafiação [16, 28, 23, 33, 40].	29
Tabela 2.6 - Tolerâncias de batimento para fresa de topo reto [16].	31
Tabela 2.7 - Comparação de transmissão de torque [41].	35
Tabela 2.8 - Batimentos de diferentes sistemas de fixação [42].	37
Tabela 3.1 - Sistematização para a medição da rugosidade R_a e R_t nos CP.	51
Tabela 3.2 – Características do material de trabalho.	54
Tabela 3.3 - Relação de ferramentas empregadas nos corpos de prova retilíneos.	56
Tabela 3.4 - Parâmetros de fresamento do CP retilíneo em desbaste.	59
Tabela 3.5 - Parâmetros de retificação do CP retilíneo em acabamento.	60
Tabela 4.1 - Resultados de fresamento do CP retilíneo em desbaste.	67
Tabela 4.2 - Comparação de desempenho na usinagem do aço AISI-SAE D6 e do aço DIN 1.2083.	69
Tabela 4.3 - Rugosidades dos CP retilíneos fresados e retificados em desbaste.	70
Tabela 4.4 - Rugosidades dos CP retilíneos retificados em acabamento.	71
Tabela 5.1 - Ferramentas de corte dos ensaios N ^{os} 29 e 42.	78
Tabela 5.2 - Batimento nos gumes das ferramentas T01, T02 e T03.	79
Tabela 5.3 - Parâmetros de corte e resultados dos ensaios N ^{os} 29 e 42.	80
Tabela 5.4 - Rugosidades dos insertos fresados em acabamento montados à matriz.	81

Tabela 6.1 - Rugosidades obtidas nos CP de aço D6 com 60-62 HRC.	85
---	----

LISTA DE REDUÇÕES

ABREVIATURAS

et al. ___ Mais de 3 autores

SIGLAS

ABNT	___	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	___	American Iron and Steel Institute
CBN	___	Nitreto de Boro Cúbico
CNC	___	Comando Numérico Computadorizado
CP	___	Corpo de Prova
CVD	___	Chemical Vapour Deposition
DIN	___	Deutsches Institut für Normung
DNC	___	Direct Numerical Control
HB	___	Hardness Brinell
HRC	___	Hardness Rockwell C
HSC	___	High Speed Cutting
HV	___	Hardness Vickers
IPT	___	Institut für Produktionstechnologien
LMP	___	Laboratório de Mecânica de Precisão
MD	___	Metal-Duro
MDI	___	Manual Data Input
MEV	___	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQFC	___	Mínima Quantidade de Fluido de Corte
PVD	___	Physical Vapour Deposition
SAE	___	Society of Automotive Engineers
UFRGS	___	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC		Universidade Federal de Santa Catarina

SÍMBOLOS

α'_{p1}	[°]	1º Âng. de Incidência Passivo do Gume Secundário
α'_{p2}	[°]	2º Âng. de Incidência Passivo do Gume Secundário
α_{o1}	[°]	1º Âng. de Incidência Ortogonal do Gume Principal
α_{o2}	[°]	2º Âng. de Incidência Ortogonal do Gume Principal
γ_o	[°]	Ângulo de Saída Ortogonal do Gume Principal
κ'_r	[°]	Ângulo de Direção do Gume Secundário
λ	[°]	Ângulo de Hélice do Gume Principal
φ_c	[°]	Ângulo de Engajamento
$1-m_c$	—	Expoente de Kienzle
a_e	[mm]	Profundidade de Corte Radial
a_{er}	[mm]	Penetração na Superfície de Trabalho (Retificação)
a_p	[mm]	Profundidade de Corte Axial
a_{pr}	[mm]	Penetração Normal da Superfície (Retificação)
AT	—	Amplitude Total
C	—	Carbono
Co	—	Cobalto
Cr	—	Cromo
CV	[%]	Coefficiente de Variação
C_v	—	Constante
D_1	[mm]	Diâmetro Nominal do Cone HSK
d_1	[mm]	Diâmetro de Corte Medido sobre os Gumes (Diâmetro dos Gumes)
d_2	[mm]	Diâmetro da Haste
F_c	[N]	Força de Corte
f_z	[mm]	Avanço por Gume
h	[mm]	Espessura de Usinagem
h_m	[mm]	Espessura Média de Usinagem
$h_{m\acute{a}x}$	[mm]	Espessura Máxima de Usinagem
k	—	Coefficiente Angular da Curva da Vida
$K_{c1.1}$	[N/mm ²]	Força Específica de Corte

l_1	[mm]	Comprimento Total
l_2	[mm]	Comprimento dos Gumes
l_3	[mm]	Comprimento da Haste
l_m	[mm]	Comprimento de Amostragem
n	[min ⁻¹]	Frequência de Rotação da Fresa
N	—	Número de Valores
P	[kW]	Potência de Corte
Q	[mm ³ /min]	Taxa de Usinagem
R_a	[μm]	Rugosidade Média Aritmética
R_t	[μm]	Rugosidade Máxima entre Cumes (Inferior e Superior)
s	—	Desvio Padrão
SV_γ	[mm]	Deslocamento do Gume Medido sobre a Face da Ferramenta
SV_α	[mm]	Deslocamento do Gume Medido sobre o Flanco da Ferramenta
T	[min]	Vida da Ferramenta
TaC	—	Carboneto de Tântalo
TiAlN	—	Nitreto de Titânio e Alumínio
TiC	—	Carboneto de Titânio
VB	[mm]	Desgaste Médio de Flanco
VB _{máx}	[mm]	Desgaste Máximo de Flanco
v_c	[m/min]	Velocidade de Corte
v_f	[mm/min]	Velocidade de Avanço de Mesa
v_s	[m/s]	Velocidade de Corte (Retificação)
v_w	[m/s]	Velocidade da Peça (Retificação)
V	—	Vanádio
W	—	Tungstênio
WC	—	Carboneto de Tungstênio
\bar{x}	—	Média Aritmética
x_i	—	Valores da Variável
z	—	Número de Gumes
z_{ei}	—	Número de Gumes em Ação

1. INTRODUÇÃO

A fabricação de pisos cerâmicos enfrenta, cada vez mais, uma competição globalizada na qual a sobrevivência do fabricante de pisos depende da qualidade de seu produto e da rapidez com que consegue atender seus clientes com novos produtos. Nisto, a fabricação das matrizes de compactação de pós cerâmicos tem uma grande importância, pois é uma limitante para os produtos que podem ser oferecidos ao mercado.

Nos últimos anos, além do crescente tamanho das peças cerâmicas produzidas, as formas dos contornos dos pisos têm variado muito e, no extremo, tem apresentado contornos curvilíneos. Além da fabricação das matrizes, a manutenção das mesmas exige uma infra-estrutura de fabricação compatível com os formatos e projetos das matrizes específicas.

O parque de fabricação de matrizes que se instalou em torno do pólo de produção de pisos cerâmicos, no sul do estado de Santa Catarina, tem sido bastante limitado em atender a demanda de matrizes para a indústria cerâmica e tem procurado atender seus clientes dentro das limitações tecnológicas disponíveis.

Particularmente, um fabricante de matrizes para a indústria cerâmica (ICON S.A. ESTAMPOS E MOLDES), reconhecendo a sua defasagem tecnológica em relação ao estado da arte, principalmente no que se refere à tecnologia de usinagem de materiais endurecidos, procurou a UFSC para desenvolver novas soluções aplicáveis à seu parque de máquinas-ferramentas.

A avaliação da tecnologia de fabricação atual das matrizes deste fabricante mostrou que o principal processo de fabricação era o fresamento e que os componentes das matrizes fabricadas em aço-ferramenta eram usinadas em regime de desbaste e de semi-acabamento no estado recozido. Os compactadores com deposição dura martensítica, montados nas matrizes, eram usinados com dificuldade e possuíam tempos de fabricação longos, especialmente os fabricados pelo processo de retificação.

O Laboratório de Mecânica de Precisão, LMP, em cooperação com o "*Institut für Produktionstechnologien - IPT*" (Instituto de Tecnologias de Produção - IPT) da Fundação Fraunhofer de Aachen, Alemanha, há alguns anos vem abordando a temática da usinagem de materiais endurecidos e propôs a implantação da

tecnologia de fresamento de materiais endurecidos para o fabricante de matrizes em questão.

Como a implementação do fresamento de materiais endurecidos depende fortemente da máquina-ferramenta, dos dispositivos de fixação das ferramentas de corte bem como das ferramentas de corte, foi proposto que o desenvolvimento dos ensaios devesse ser realizado na infra-estrutura do fabricante de matrizes, pois os resultados obtidos em condição de ensaio em outra máquina-ferramenta exigiriam a elaboração de um modelo de transferência de informações para as máquinas de produção, uma tecnologia muito questionável.

Baseado no conhecimento tecnológico dos profissionais do LMP, do IPT bem como de informação da literatura, de catálogos técnicos e da Internet, buscou-se a sensibilização dos fabricantes de fresas de metal-duro para participarem da implementação da tecnologia de fresamento de aço endurecido, no fabricante de matrizes de ferramentas de compactação de pós cerâmicos de pisos e revestimentos.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver ferramentas, métodos e parâmetros de corte, que possam ser aplicados na usinagem por fresamento periférico de matrizes montadas, com insertos curvilíneos de aço AISI-SAE D6 temperado e revenido com dureza de 60 a 62 HRC.

Na seqüência, no capítulo 2 são apresentados o estado da arte na área de fresamento, abrangendo o processo de fresamento, a máquina-ferramenta, a fresa e seu respectivo comportamento em uso, bem como as formas de sua reafiação e os sistemas de fixação das fresas, abrangendo tanto a interface: ferramenta-sistema de fixação como a interface: sistema de fixação máquina-ferramenta. Além disto, apresenta-se uma síntese da avaliação de usinabilidade e dos materiais empregados na fabricação de matrizes. No capítulo 3, são apresentadas a infra-estrutura disponibilizada e a metodologia para os ensaios. Nos capítulos 4 e 5, são apresentados e discutidos os resultados. No capítulo 6, são apresentadas as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros. As referências bibliográficas e os anexos constam dos capítulos 7 e 8, respectivamente.

2. ESTADO DA ARTE

O fresamento é um processo de usinagem no qual a remoção de material da peça se realiza de forma intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta, geralmente multicortante, gerando-se superfícies das mais variadas formas. Normalmente, a peça efetua o movimento de avanço, enquanto que a ferramenta realiza o movimento de corte, mantendo o eixo de giro numa posição fixa [13, 45, 46, 47]. A versatilidade deste processo se deve ao fato de haver movimentos relativos entre a peça e a ferramenta independentes ou combinados [13] e a ferramenta (fresa) apresentar formas variadas [45, 46]. Praticamente, toda a operação de fresamento consiste em corte interrompido, onde cada gume atua num tempo inferior à metade do necessário para a ferramenta completar uma revolução. Em consequência do duplo movimento, rotação da fresa e avanço da peça, a espessura do cavaco é variável [48].

A figura 2.1 mostra uma representação esquemática, das grandezas de penetração do gume no fresamento periférico.

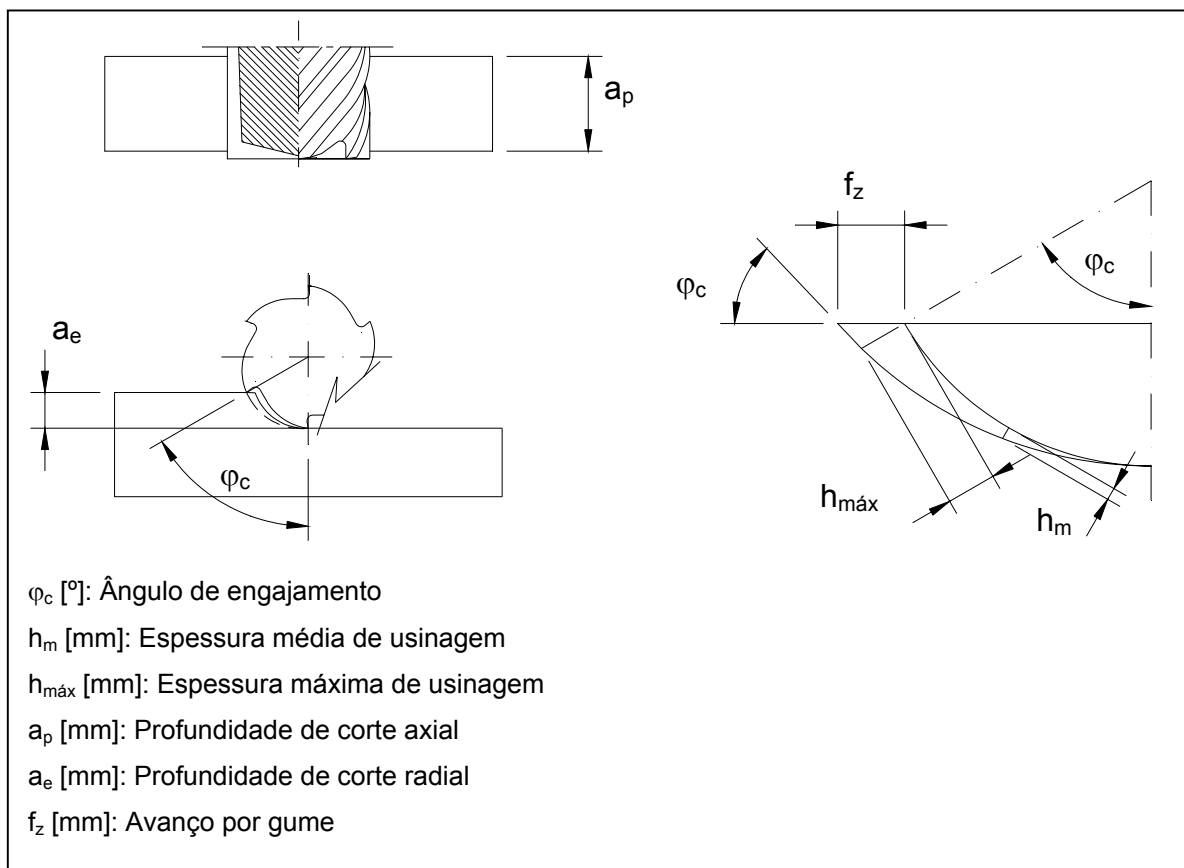


Figura 2.1 - Grandezas de penetração no fresamento periférico [45, 67].

As vantagens mais importantes do fresamento são a alta taxa de remoção de material, a capacidade de produção de superfícies complexas, e uma ampla quantidade de tipos de ferramentas disponíveis [13, 47].

Os métodos de fresamento podem ser divididos em dois grupos principais: periférico ou tangencial e frontal [13, 45, 46, 47]. No fresamento periférico ou tangencial, a superfície usinada da peça, gerada por dentes (gumes principais) localizados na periferia do corpo da ferramenta, situa-se, de modo geral, num plano paralelo ao eixo da fresa [4, 13, 47]. No fresamento frontal, a superfície usinada resulta da ação combinada dos gumes localizados na periferia e na face frontal da fresa, esta geralmente em ângulo reto ao eixo da ferramenta. A superfície fresada é plana, sem qualquer relação com o contorno dos dentes [13, 47].

As seguintes equações são importantes para o entendimento do processo de fresamento.

A velocidade de corte tem relação com a vida da ferramenta. O aumento da velocidade de corte produz um efeito maior que o aumento do avanço por gume f_z e a profundidade de corte na vida da ferramenta [29]. Assim como no torneamento, a velocidade de corte é dada por:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (1)$$

onde

v_c [m/min]: Velocidade de corte

d_1 [mm]: Diâmetro de corte medido sobre os gumes (diâmetro dos gumes)

n [min^{-1}]: Freqüência de rotação da fresa

A velocidade de avanço influencia na espessura do cavaco gerado. É limitada pela potência disponível da máquina, resistência da peça, ferramenta (gumes, canais para cavacos) e pela qualidade da superfície [13]. A velocidade de avanço é determinada por:

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z \quad [\text{mm/min}] \quad (2)$$

onde

v_f [mm/min]: Velocidade de avanço de mesa

z : Número de gumes

f_z [mm]: Avanço por gume

A taxa de usinagem é determinada em função da velocidade de avanço v_f e das profundidades de corte axial a_p e radial a_e . As condições limítrofes para estes valores são: a carga máxima suportada pela ferramenta de corte, a rotação máxima da máquina-ferramenta e a potência máxima de acionamento [71]. A taxa de usinagem quantifica o volume de cavaco removido por unidade de tempo e é dada por:

$$Q = a_p \cdot a_e \cdot v_f \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (3)$$

onde

Q [mm³/min]: Taxa de usinagem

a_p [mm]: Profundidade de corte axial

a_e [mm]: Profundidade de corte radial

Com objetivo de prevenir a quebra da ferramenta, deve-se considerar a espessura máxima de usinagem quando seleciona-se o avanço por gume f_z [69]. A espessura máxima de usinagem é dada por:

$$h_{m\acute{a}x} = f_z \cdot 2 \sqrt{\frac{a_e}{d_1} - \left(\frac{a_e}{d_1}\right)^2} \quad [13, 45] \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

onde

$h_{m\acute{a}x}$ [mm]: Espessura máxima do usinagem

f_z [mm]: Avanço por gume

a_e [mm]: Profundidade de corte radial

d_1 [mm]: Diâmetro dos gumes

De acordo com a direção de corte e de avanço, distingue-se fresamento concordante e fresamento discordante, considerando-se um sistema de referência, onde o vetor velocidade de avanço v_f está na mesa/peça e o vetor velocidade de corte v_c está na ferramenta. No fresamento concordante, figura 2.2 (b), os movimentos de corte (ferramenta) e de avanço (peça) têm, em média, o mesmo sentido, iniciando-se o corte com espessura máxima do cavaco. No fresamento discordante, os movimentos de corte e avanço têm, em média, sentidos opostos, iniciando-se o corte com a espessura mínima do cavaco [13, 47, 69] de acordo com a figura 2.2 (a).

Fresamento discordante e concordante existem na forma pura somente quando o eixo da fresa não intercepta a peça [47].

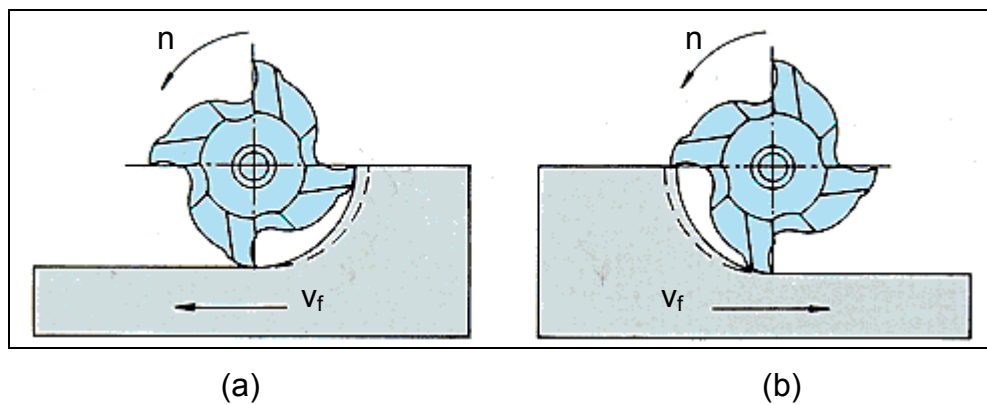


Figura 2.2 - Fresamento periférico : a - discordante , b - concordante [16].

No fresamento discordante, o processo inicia-se pela parte mais fina do cavaco. Nesta região, o material da peça é encruado pela compressão da ferramenta. Na seqüência, a espessura de corte atinge um valor mínimo e superadas as deformações elásticas, é que se inicia efetivamente o corte do cavaco. Como resultado, o gume da ferramenta escorrega sobre a peça, provocando desgaste abrasivo. O material na região de contato do dente com a peça é mais duro, pelo encruamento do dente precedente. Isto determina uma vida menor dos gumes no fresamento discordante [13, 16, 65] e também tendência de soldagem dos cavacos nos gumes.

No fresamento concordante, a remoção do cavaco inicia-se da espessura de cavaco máximo terminando com a mínima. Teoricamente, no final do corte de um gume, este não exerce pressão na peça, aliviando-se assim o fresamento [16, 65].

As vantagens do fresamento concordante são [13, 47, 65]:

- A força de corte entra na peça forçando-a contra a mesa, enquanto que no discordante a força tende a levantar a peça possibilitando vibrações;
- Menor desgaste devido ao tipo de fresamento e a menor trajetória percorrida pelo gume com conseqüente aumento da vida da ferramenta [69];
- Melhor qualidade da superfície obtida;
- Menor força e potência de avanço.

Apesar das várias vantagens do fresamento concordante, existem casos em que este não pode ser utilizado [13, 47]:

- Quando existem folgas no fuso da mesa da máquina-ferramenta;
- Quando a superfície da peça contém resíduo de areia de fundição, carepa de fundição, forjamento e sobremetal muito irregular.

A pior situação de fresamento ocorre quando o corte é interrompido no momento em que o gume absorve um esforço máximo de compressão (corte discordante) e sofre abruptamente esforços de tração causados pela espessura de usinagem ($h > 0$) na saída da ferramenta [41, 14]. Como conseqüência disso, ocorrem microlascamentos ao longo da periferia do gume, que são propagados com o aumento do percurso de usinagem [18]. Estes esforços de tração são atribuídos tanto ao prolongamento do plano de cisalhamento do gume da ferramenta no corte, quanto ao fato das ferramentas de metal-duro serem projetadas para resistirem, sobretudo, a tensões de compressão (típico de corte concordante) [18].

Quando a profundidade de corte radial a_e é maior do que a metade do diâmetro dos gumes, o impacto de entrada do dente na peça é absorvido pela face. Porém, devido ao maior volume a ser removido, a vida da ferramenta é prejudicada pelo aumento da temperatura na zona de corte [41].

Para relações a_e/d_1 menores que 0,5 ocorrem lascamentos ao longo do gume [41], pois quando o centro da ferramenta está posicionado fora da peça (figura 2.1), o impacto inicial é em grande parte absorvido pela ponta do gume, que apresenta menor resistência do que a face, originando lascamentos [41, 63]. A vida da ferramenta encontra seu valor ótimo para relações a_e/d_1 em torno de 0,5 [63].

2.1 Fatores Determinantes no Processo de Fresamento

O processo de fresamento é influenciado por 3 grupos de fatores [13]:

- Característica da peça: Forma, tipo de sujeição, acabamento da superfície usinada, material;
- Condições de trabalho: Profundidade de corte axial a_p , profundidade de corte radial a_e , velocidade de avanço v_f , velocidade de corte v_c e fluido de corte;
- Dados construtivos da fresa: Diâmetro dos gumes d_1 , diâmetro da haste d_2 , número de gumes z , ângulo de hélice λ , ângulo de saída ortogonal γ_0 e material da ferramenta.

A mais importante função de qualquer acessório de fixação é locar a peça de modo que a superfície a ser usinada seja submetida adequadamente à ferramenta de corte e, ao mesmo tempo, usinada com dimensões precisas em relação a outras superfícies descritas pelo desenho da peça [47]. Bons equipamentos de fixação economizam tempo por facilitar o carregamento, fixação e descarregamento da máquina e ainda melhoram a segurança. Também, quando rígidos *setups* são supridos, maiores velocidades de corte e avanços podem ser utilizados sem causar vibrações. A ação intermitente em fresamento, freqüentemente, gera altas forças que requerem dispositivos de fixação robustos.

A seleção da velocidade de avanço depende do acabamento da superfície desejada, o qual depende do diâmetro dos gumes e da rotação de trabalho. A relação do parâmetro R_t (profundidade de rugosidade) para o fresamento periférico é expressa por [46]:

$$R_t = \frac{f_z^2}{4.d_1} \quad [\mu\text{m}] \quad (5)$$

onde

f_z [mm]: Avanço por gume

d_1 [mm]: Diâmetro dos gumes

No fresamento periférico, a textura da superfície irá depender do batimento radial da fresa, da relação diâmetro dos gumes/balanço, do avanço por gume da

fresa e de sua respectiva fixação. O pior acabamento é alcançado quando somente um gume gera o acabamento[75].

Para poder explicar sobre as influências dos parâmetros de corte (a_p , a_e , v_f e v_c) sobre o processo de fresamento, deve-se conceituar potência de corte, a qual é dada pela seguinte relação:

$$P_c = F_c \cdot v_c \frac{1}{60.000} \quad [\text{kW}] \quad (6)$$

onde

P [kW]: Potência de corte

F_c [N]: Força de corte

v_c [m/min]: Velocidade de corte

O cálculo da força de corte F_c é obtido através da equação modificada de Kienzle [21, 4] conforme equação 7. Neste caso, as grandezas empíricas $k_{c1.1}$ e $1-m_c$ devem ser conhecidas. Estes valores podem ser encontrados na literatura, em tabelas, de acordo com o tipo de material usinado ou experimentalmente.

$$F_c = a_p \cdot z_{ie} \cdot h_m^{1-m_c} \cdot k_{c1.1} \quad [\text{N}] \quad (7)$$

onde

a_p [mm]: Profundidade de corte axial

z_{ej} : Número de gumes em ação

h_m [mm]: Espessura média do cavaco

$1-m_c$: Expoente de Kienzle

$k_{c1.1}$ [N/mm²]: Força específica de corte

Nesta equação $a_p \cdot z_{ie}$ é o comprimento total em ação de todos os gumes que estão atuando simultaneamente. As equações 6 e 7 são válidas somente para fresa de topo reto.

De acordo com a equação 6 a potência de corte é proporcional à velocidade de corte, resultando que a potência de corte é bem menor em velocidades de corte baixas do que em altas [13]. Para um aproveitamento econômico da máquina-

ferramenta deve-se preferir o trabalho em baixas velocidades de corte, respeitando a velocidade de corte mínima do material da ferramenta. Entretanto, o uso de baixas velocidades é limitado por [13]:

1. Forças muito grandes podem sobrecarregar o mandril da fresadora, provocando flexão com lascamentos do gume, superfícies ásperas etc;
2. O acabamento da superfície piora à medida que a velocidade de corte diminui.

A potência de corte cresce em proporção menor do que a velocidade de avanço, pois a pressão específica de corte cai com a espessura do cavaco [13]. Pela equação 7, com o aumento do avanço por dente f_z a força de corte aumenta exponencialmente. Todavia, com o aumento da profundidade de corte axial a_p a força de corte F_c aumenta linearmente [71]. Conseqüentemente, cavacos mais grossos podem ser fresados mais economicamente do que cavacos finos. A espessura do cavaco não depende somente da velocidade de avanço v_f , mas também da velocidade de corte v_c , do número de dentes z e da relação entre profundidade de corte radial a_e e o diâmetro dos gumes d_1 de acordo com as equações 2 e 4.

Os valores médios de força e potência de corte são proporcionais à profundidade de corte axial a_p [13, 17, 71]. Uma condição limite de profundidade de corte a_p aumentará a tendência de vibrações. Uma boa estratégia de corte com objetivo de minimizar o tempo principal de usinagem e manter a força de corte em níveis aceitáveis requer que a peça seja usinada em vários passes, com o máximo possível de velocidade de avanço para uma mesma velocidade de corte. Os tempos secundários, nesta estratégia, devem ser mantidos baixos e a vida da ferramenta deve ser otimizada [50].

É vantajoso utilizar a maior profundidade radial a_e possível. Na prática, a_e é limitado pelo aparecimento de vibrações. Isto acontece, principalmente, no fresamento discordante e quando a fixação da peça na mesa é inadequada. No acabamento, a profundidade de corte radial a_e deve ser mantida baixa para minimizar a deflexão da fresa [63].

De acordo com a equação 3, a taxa de usinagem aumenta com o incremento das profundidades de corte radial, axial (a_e e a_p) e da velocidade de avanço v_f . Entretanto, muitas vezes a taxa de usinagem não pode ser aumentada por razões econômicas ou devido às limitações da máquina ou do tipo de aplicação.

Grandes valores de velocidade de avanço reduzem a trajetória de corte por unidade de volume de material removido [69, 49]. Por esta razão o fresamento deve ser feito em moderadas velocidades de corte e altas taxas de avanço. O limite superior normal da velocidade de avanço vai depender da resistência mecânica da peça ou da ferramenta, ou da potência disponível da máquina. As vibrações decorrentes de altas taxas de avanço podem ser um fator limitante [49].

2.2 Fluido de Corte para Fresamento

A utilização de fluido de corte no fresamento tem a mesma função que em outros processos de usinagem tais como: refrigeração, lubrificação da ferramenta e da peça, inibição de formação de gumes postigos, remoção de cavacos e proteção da máquina-ferramenta e peça contra a corrosão [17, 48].

O fresamento, entretanto, pode ser influenciado negativamente pelo emprego de fluidos de corte. A natureza intermitente do processo, as variações de espessura de cavaco e a ação centrífuga da fresa, tornam a aplicação de meios lubri-refrigerantes difícil de ser efetuada sem que ocorram choques térmicos na ferramenta [17, 47, 48, 51].

Fluidos de corte não são recomendados para fresamento de ferro fundido ou aços com ferramentas de metal-duro. O metal-duro apresenta a tendência de lascas quando submetido a choques térmicos causados pela refrigeração. O metal-duro apresenta baixo coeficiente de dilatação térmica, e devido à dinâmica de corte do fresamento, o fluido de corte favorece a formação de trincas térmicas ao longo do gume da ferramenta. Numerosos estudos afirmam que a formação destas trincas devem-se a uma variação cíclica da temperatura de corte, com aquecimento durante o tempo ativo e resfriamento durante o tempo inativo, o que leva a uma variação cíclica das tensões impostas sobre a ferramenta [17,55]. Fluidos de corte, entretanto, são benéficos para fresamento de ligas de alumínio, bronze e outros materiais moles. Quando tais materiais são fresados, as temperaturas de corte são baixas o suficiente para evitar danos na ferramenta. O fluido de corte inibe a aderência de cavacos na face da ferramenta e ajuda na remoção de cavacos e leva à produção de superfícies com melhor qualidade [47, 48].

Recentemente, tem crescido a importância dada aos fatores negativos relacionados com a utilização de fluido de corte. Por razões econômicas, ecológicas

e de novas leis tem-se tentado reduzir a aplicação dos fluidos lubri-refrigerantes nos processos de usinagem. Os custos relacionados à introdução e ao tratamento de fluidos de corte podem atingir o dobro dos custos com as ferramentas [52].

No entanto, a falta de refrigeração causa aumento de temperatura na usinagem, erros dimensionais e de forma na peça, além do aquecimento de componentes da máquina que podem levar a desvios. Sem o efeito da lubrificação o atrito aumenta, favorecendo a adesão e também a formação de gume postiço [52, 53].

Para evitar o entupimento dos canais, e conseqüente danificação de superfícies já usinadas, na usinagem de aços endurecidos é recomendada a utilização de ar pressurizado como fluido de corte; este ajuda na refrigeração e na expulsão de cavacos da zona de corte [66].

Em oposição aos sistemas convencionais de lubri-refrigeração, a técnica de mínimas quantidades coloca o lubrificante somente em contato com uma área definida do meio lubri-refrigerante, atomizado por um jato de ar comprimido com consumo de fluido de corte inferior a 50 ml/h, no sistema ferramenta/peça/cavaco [54].

Nesta tecnologia, a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de mínima refrigeração, principalmente, pelo ar comprimido. As principais vantagens desta tecnologia são [54, 55]:

- As peças usinadas ficam quase secas;
- Os resíduos mínimos de óleo são descartados com os cavacos;
- Menores custos de reprocessamento, limpeza e acondicionamento;
- Volume mínimo de fluido é perdido junto com os cavacos (comparada com as técnicas convencionais de fluido de corte).

Em contrapartida, o vapor, a névoa e a fumaça de óleo gerados durante o processo, contribuem para aumentar o índice de poluentes em suspensão no ar, fazendo-se necessária a instalação de um bom sistema de exaustão na máquina-ferramenta [55].

No caso do fresamento discordante, a técnica de MQFC é vantajosa porque o gume começa a penetrar no material da peça com uma espessura de cavaco nula, o que significa que existe um estado de atrito puro. Assim, desta fase até o início de corte do material, a lubrificação da interface ferramenta/peça mostra resultados positivos na vida da ferramenta [54].

2.3 Máquina-Ferramenta para Fresamento de Aços Endurecidos

A rigidez estática e a rigidez dinâmica do conjunto máquina-ferramenta/peça são importantes, pois as vibrações devem ser minimizadas durante o corte. Em experimentos empregando aços temperados e ferramentas de CBN descobriu-se que, em um sistema de usinagem de baixa rigidez (máquina/ferramenta/fixação), o comportamento do desgaste da ferramenta era caracterizado por trincas prematuras nos gumes, levando, conseqüentemente, a uma diminuição da vida da ferramenta [56, 57].

Para poder avaliar melhor a estrutura de uma máquina convém definir energia de deformação. Esta é o trabalho desenvolvido sobre uma estrutura através de deformação elástica e armazenado sob forma de energia potencial. Esta energia é a medida da deformação da estrutura criada pelo carregamento e é proporcional à rigidez [57].

Estudos desenvolvidos por Schorry [57], empregando a técnica de elementos finitos, revelaram que em uma estrutura de um centro de usinagem horizontal, com giro de mesa, a energia de deformação está 10,1% no cabeçote-ferramenta, 9,7% na coluna e 9,5% no carro porta-cabeçote. Isto revela o quão importante é o estudo e o tipo de estrutura de uma máquina-ferramenta.

Embora a literatura técnica geralmente não seja específica, máquinas ferramentas com uma potência na faixa de 10-15 kW, são necessárias para a usinagem com êxito de materiais endurecidos [56]. As máquinas, em conformidade com esta especificação, são robustas. Na usinagem de materiais endurecidos as forças de corte são usualmente de 30-80% mais altas do que aquelas observadas na usinagem de materiais de corte fácil, quando comparadas com a mesma seção de cavaco [56].

O conceito de máquina para usinagem de materiais duros está intimamente ligado à estrutura. A melhor estrutura, considerando HSC (*High Speed Cutting*), devido à sua extrema rigidez, é a tipo pórtico. A figura 2.3 mostra com detalhes este tipo de estrutura. Nesta máquina, a peça executa apenas um movimento (eixo X). O movimento transversal (Y) é efetuado pelo carro sobre a guia, que está montada sobre as duas colunas do pórtico. O movimento de aproximação da ferramenta à peça (eixo Z) é executado pelo carro porta-cabeçote, montado ortogonalmente sobre

o carro do eixo Y. Dois eixos complementares podem ser implementados no carro porta-cabeçote (rotação e inclinação - 4º e 5º eixo) [58].

A maior vantagem deste tipo de estrutura fechada é a rigidez, adequada para usinagem pesada com o mínimo de deflexão estrutural. A mesa horizontal facilita o carregamento e a sujeição das peças, especialmente de placas. Uma desvantagem deste tipo de máquina é a remoção de cavaco da área de trabalho, que apresenta alguma dificuldade. Alguns fabricantes têm desenvolvido sistemas de aspiração enquanto outros empregam jato de ar e a remoção manual de cavacos [47].

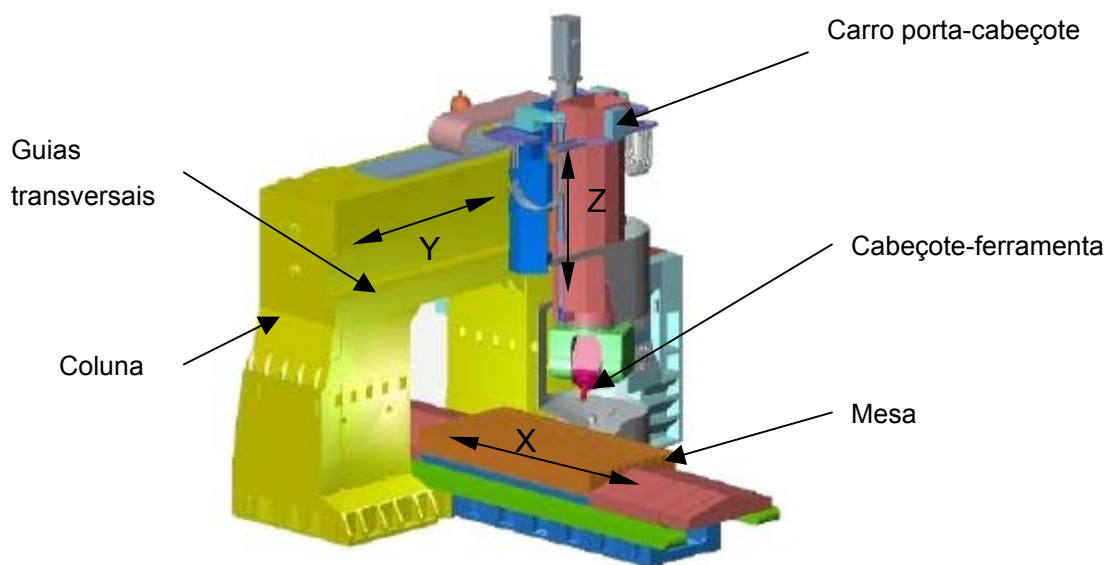


Figura 2.3 - Estrutura tipo pórtico fixo [58].

Um sistema para controle de temperatura nos fusos e no cabeçote [59] trabalha em um sistema fechado de arrefecimento, passando pelos fusos dos eixos (X, Y e Z) e pelo cabeçote, mantendo a temperatura da máquina estabilizada com tolerância de $\pm 1^\circ\text{C}$. Esta característica assegura uma repetibilidade muito boa de posicionamento, mantendo as tolerâncias das peças, mesmo com variação da temperatura ambiente [59].

As guias empregadas em máquinas para fresamento de aços endurecidos podem ser modulares ou lineares (esferas, roletes). Guias lineares com roletes aliam grande capacidade de carga com pequena inércia para grandes avanços e acelerações, adequado, também, em aplicações de alta velocidade de corte (HSC).

Com a propagação de técnicas de HSC, as máquinas para usinagem de aços endurecidos também devem incorporar a tecnologia de CAD-CAM, comandos rápidos (*feed forward* e *look ahead*), isto para poder garantir um desempenho adequado, competitivo com o mercado mundial.

2.4. Ferramenta

As fresas de topo podem ser sólidas, com insertos ou gumes brasados ou ainda com insertos intercambiáveis. Os insertos brasados podem ser de aço-rápido ou, na maioria das vezes, metal-duro, enquanto que os intercambiáveis são geralmente de metal-duro, CBN (Nitreto de Boro Cúbico) e em alguns casos de cermet. As fresas sólidas são fabricadas de aço-rápido, metal-duro ou cermet [17, 28].

As ferramentas mais adequadas para a usinagem de moldes e matrizes de materiais endurecidos são as fresas de ponta esférica e de topo reta, ambas maciças em metal-duro revestido [41]. As ferramentas de metal-duro para moldes e matrizes apresentam gumes reforçados e ângulos de saída neutros (principalmente para materiais acima de 54 HRC). Caracterizam-se, também, por uma seção transversal (alma) espessa, para máxima resistência à deflexão [41]. Fresas de topo reto são utilizadas no desbaste, entretanto, não são adequadas para confecção de formas livres. Ferramentas de topo esféricas são empregadas no pré-acabamento e no acabamento devido à transição entre passes ser menos pronunciada e o volume de sobremedida menor [62].

2.4.1 Terminologia

A terminologia e normas empregadas pelos fabricantes de ferramentas diferem. Os fabricantes de fresas de MD das referências [23, 28, 25] fornecem as ferramentas segundo a norma DIN 6527, enquanto que o fabricante [15] pela norma DIN 6527L. Já os fabricantes [19, 20, 24] empregam a DIN 6527/6528. Em relação à haste o fabricante [28] emprega a DIN 6535 HB, enquanto os fabricantes [15, 20] utilizam DIN 6535 HA. A terminação HA significa haste lisa e HB significa haste Weldon (com entalhe). A figura 2.4 esclarece alguns termos importantes da fresa helicoidal de topo reto, de haste cilíndrica.

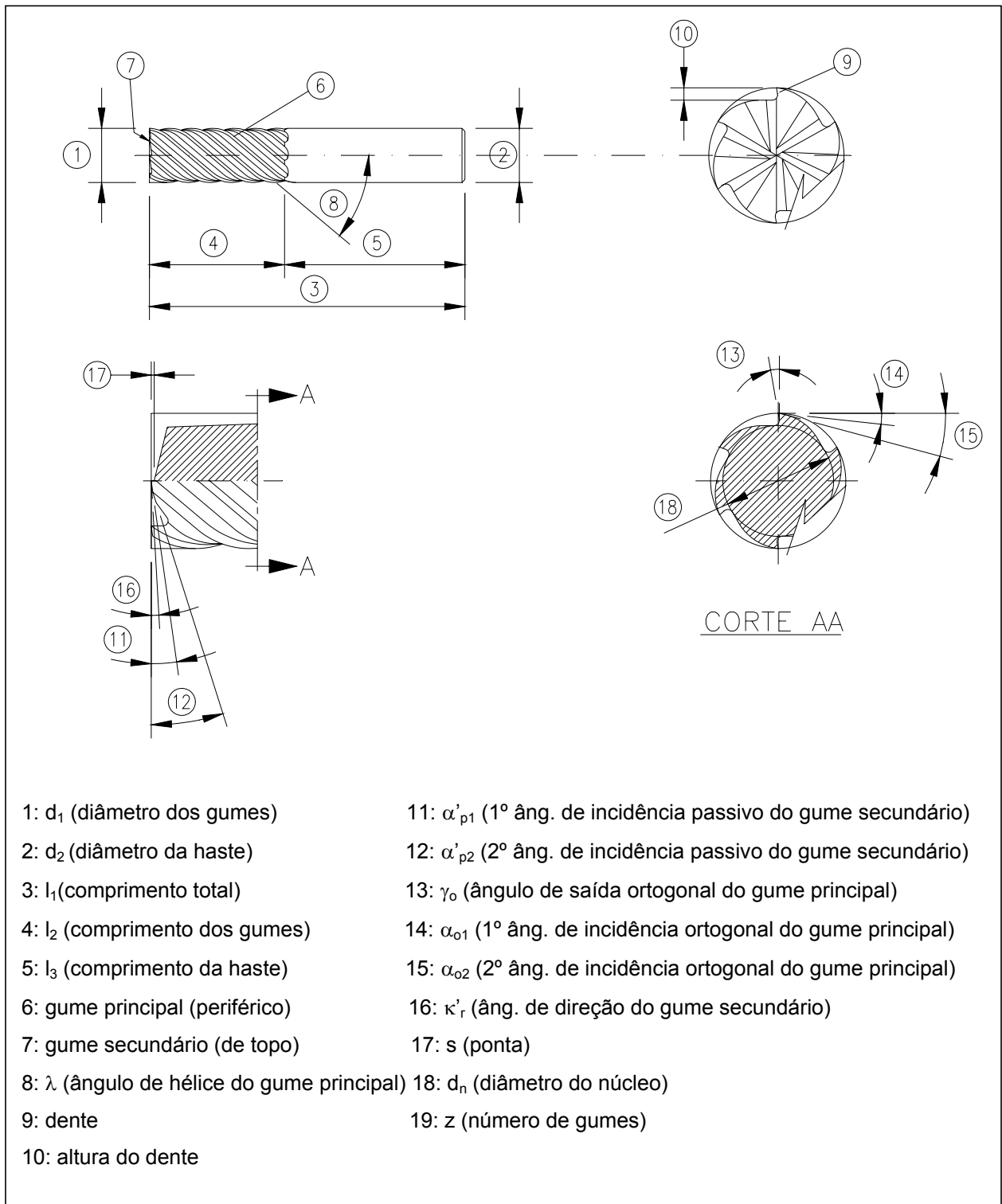


Figura 2.4 - Termos da fresa helicoidal de topo reta de haste cilíndrica [19].

Os ângulos mais importantes na fresa de topo são o ângulo de hélice λ e o ângulo de saída ortogonal γ_o . A razão de serem tão importantes é devido à

dependência direta destes com o material da peça, o material da ferramenta e o processo.

Quanto maior o ângulo de hélice, maior a força e a potência de corte para fresas de igual diâmetro e número de dentes [13]. No fresamento de topo reto com fresas helicoidais, o comprimento de ação do gume depende do ângulo de hélice (λ). O comprimento do gume que está em ação durante o processo irá determinar de uma maneira significativa, tanto a força quanto a potência de usinagem [71].

Quanto maior o ângulo de saída ortogonal, tanto menor a força de corte. Este ainda influencia decisivamente na força, na potência de corte, no acabamento da superfície usinada e no calor gerado [29].

A tabela 2.1 apresenta a geometria de fresas de topo de metal-duro revestidas e a dureza do material a ser usinado para ferramentas de diâmetro dos gumes de 10 mm, indicando a ferramenta para a faixa de dureza do material da peça.

Tabela 2.1 - Geometria de fresas de topo de metal-duro para aços endurecidos [26, 27, 76, 23].

Fabricante	Código	d_1 (mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)	z	λ (°)	γ_o (°)	Dureza (HRC)
A	VCLDD1000	10	100	46	6	45	-10	60
B	CEPL -6100	10	100	45	6	52	-15	≤ 60
C	468 - 1000	10	80	30	6	45	-10	45-65
D	R215.3A	10	72	22	10	30	-7 a -10	55-63
E	1828A010	10	80	30	6	50	-8	46-66

A tabela 2.1 mostra a tendência do uso de fresas de 6 a 10 gumes, ângulos de hélice de 45 a 52° (com exceção da ferramenta do fabricante D com $\lambda = 30^\circ$) e ângulos de saída ortogonal variando de -7 a -15° para materiais com dureza entre 45 a 66 HRC. Os ângulos de saída ortogonal negativos conferem as seguintes características à ferramenta: um gume mais estável, pequeno tempo de contato com o cavaco e a transferência do calor gerado no corte para o cavaco [27].

2.4.2 Direção da Hélice em Relação ao Corte

Uma fresa de topo vista da haste, tendo sentido de corte horário, tem o corte à direita. Quando o sentido de corte for anti-horário diz-se que a fresa representa o corte à esquerda [13, 65].

As fresas de topo apresentam-se sob 4 formas distintas [16, 65, 68]:

1. Corte à direita, hélice à direita;
2. Corte à esquerda, hélice à esquerda;
3. Corte à direita, hélice à esquerda;
4. Corte à esquerda, hélice à direita.

Nas formas 1 e 2, a saída do cavaco é para cima de forma suave, a força axial atua no sentido haste-corte.[13, 16]. A forma 1 é a mais utilizada.

Nas formas 3 e 4, a saída do cavaco é empurrada para baixo, ocasionando péssimo acabamento na superfície gerada pelo gume secundário, tornando a vida mais curta. Por esse motivo, são aplicadas somente no fresamento de furos passantes ou em fresamentos tangenciais sem a utilização do gume secundário, onde não se deseja o cavaco na parte superior da peça [13, 16]. A força axial atua no sentido corte-haste sendo empregada geralmente em fresas com haste cônica

A figura 2.5 mostra o sentido de corte e da hélice em fresas de topo.

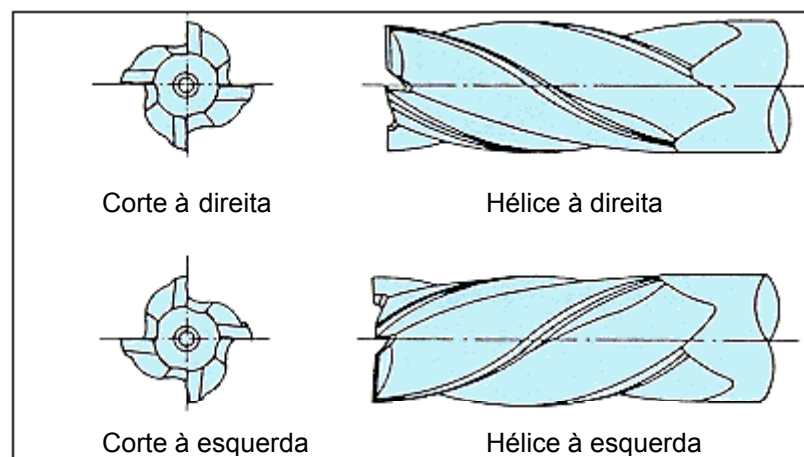


Figura 2.5 - Sentido de corte e da hélice [16].

No fresamento de contornos, em que são usados apenas os gumes periféricos, os sentidos de corte e da hélice deverão ser opostos entre si, pois assim

gera-se uma força axial que aumenta a fixação no cone do suporte [13]. Neste caso o cavaco sai por baixo e são recomendadas fresas com haste cônica devido ao esforço no sistema de fixação.

Na fresamento periférico com pequena utilização dos gumes secundários, com fresas de topo sólidas de metal-duro revestidas, em aços-ferramenta com dureza entre 50-56 HRC, utilizam-se fresas de topo com corte à direita e hélice à direita, que proporcionam um melhor acabamento superficial e pequena deflexão da haste da ferramenta de corte [23].

2.4.3 Formatos do Gume Principal

Basicamente, existem três tipos de formatos de gume: gume de corte normal (acabamento), gume com quebra-cavaco plano (desbaste e acabamento) e gume com quebra-cavaco arredondado (desbaste) [16].

A fresa de topo com gume de corte normal é provida de hélice, com objetivo de apresentar um esforço de corte progressivo. A fresa de topo com gume com quebra-cavaco plano proporciona uma qualidade intermediária entre o acabamento da fresa de topo normal e a de quebra-cavaco arredondado, alcançando-se uma profundidade de rugosidade R_t entre 20 e 25 μm . A fresa de topo com gume com perfil ondulado, exige menos esforço de corte na usinagem, devido a um corte progressivo e a distribuição do esforço de corte ao longo do gume que entra em contato com a peça [28]. Com este tipo de fresa pode-se aumentar o avanço da ferramenta sem muita alteração da superfície da peça [16]. Alcança-se uma profundidade de rugosidade R_t de 100 μm . A figura 2.6 mostra uma fresa de topo com quebra-cavaco plano.



Figura 2.6 - Gume com quebra-cavaco plano [16].

2.4.4 Configuração das Cunhas das Partes Cortantes da Fresa

O desempenho e a vida da fresa de topo estão muito interligados ao formato e ao 1º ângulo de incidência ortogonal do gume principal [16, 28].

O alívio radial primário que relaciona o 1º ângulo de incidência ortogonal do gume principal (α_{o1}), com a largura do 1º flanco ($b_{\alpha1}$) pode ser feito de 3 formas: alívio convexo (excêntrico), alívio plano ou alívio côncavo.

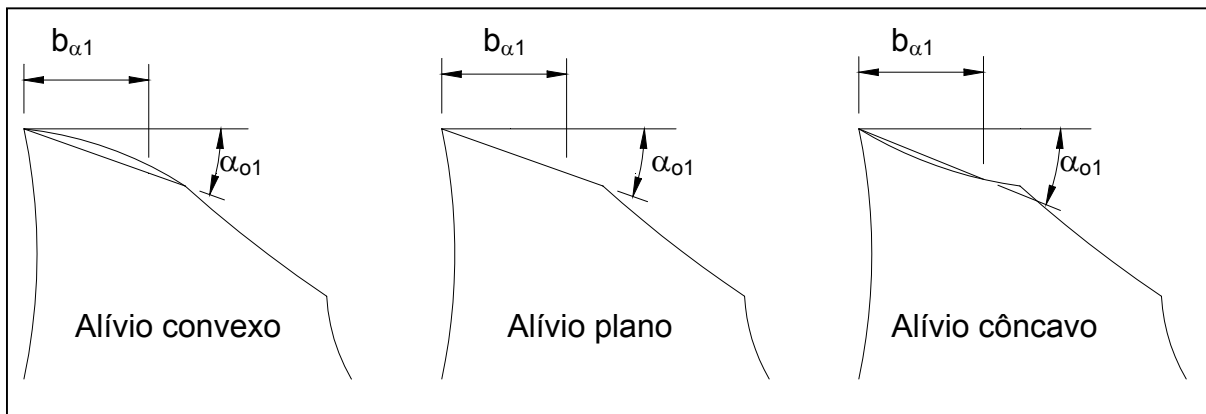


Figura 2.7 - Tipos de alívio [16].

O alívio convexo confere à região do gume maior resistência, diminui a perda no diâmetro em função do desgaste e leva a um melhor acabamento superficial da peça [16, 28].

Os alívios plano e côncavo apresentarão uma menor resistência do gume, propiciando maior incidência de lascamentos, e uma diminuição mais rápida do diâmetro da ferramenta em função do desgaste.

2.4.5 Seleção da Fresa Quanto ao Número de Gumes

O número de gumes de uma fresa deve ser determinado em função do material a ser fresado, tipo de fresamento e condições de usinagem [16, 28]. Geralmente fresas com maior número de gumes produzem melhor acabamento superficial e menor tendência a vibrações.

Pode-se dividir o número de gumes para a fresa de topo em 4 tipos:

1. Fresa de 2 gumes: Tem no canal maior espaço para cavacos, possuindo maior capacidade de acúmulo de cavacos, o que facilita o escoamento. É indicada em usinagem onde há grande remoção de material. Entretanto, possui pequena área de seção transversal, ocasionando uma maior deflexão do que fresas com maior número de gumes [16, 28]. Para profundidade de corte radial a_e pequena é possível se obter um acabamento próximo à fresa de múltiplos gumes;
2. Fresa de 3 gumes: Tem uma característica intermediária quanto à taxa de usinagem de cavacos e resistência à deflexão entre as fresas de 2 e 4 gumes [16, 28]. Há pouca variação no comprimento dos gumes que atuam simultaneamente no momento do corte. Como consequência é possível utilizar uma profundidade de corte radial maior que a fresa de 2 gumes;
3. Fresa de 4 gumes: Tem sua área de seção maior que a de 2 e 3 gumes, portanto, maior rigidez. Entretanto, o seu espaço para cavacos é pequeno, diminuindo sua capacidade de acúmulo de cavacos, o que freqüentemente leva à obstrução do canal [16, 28];
4. Fresa de múltiplos gumes (6 ou mais gumes): Esta fresa tem um número maior de gumes que atuam simultaneamente no corte (sobreposição dos gumes) estando submetida a uma menor variação de forças. Devido à sua rigidez estática (grande seção transversal) e dinâmica (sobreposição dos gumes), seu corte é uniforme [16].

Uma fresa de 4 gumes, por exemplo, com corte ou furo no centro, de diâmetro dos gumes de 10 mm, possui seção transversal com uma área de 48 mm², o que equivale a 61% da área de seção em relação à área total da haste, conforme figura 2.8.

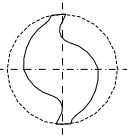
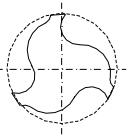
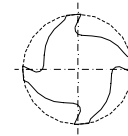
Fresa $d_1 = 10$ mm	2 gumes	3 gumes	4 gumes
Diagrama de projeção por número de gumes			
Área da seção da fresa de topo	41 mm ²	44 mm ²	48 mm ²
% da área da seção em relação a área total imaginária	52 %	56 %	61 %

Figura 2.8 - Comparação do número de gumes [16].

Na fresa de 6 gumes utilizada em fresamento periférico de aços endurecidos (50-65 HRC), o diâmetro de núcleo d_n é de 80-85% do diâmetro dos gumes d_1 [26, 27].

Segundo Gomes [71], no fresamento do aço DIN 1.2083 (50HRC), as fresas de 6 gumes apresentaram um melhor resultado em relação às de 4 gumes. Considerando-se os mesmos parâmetros de usinagem, o aumento do número de 4 para 6 gumes provoca um aumento de 50% da velocidade de avanço v_f e, conseqüentemente, a taxa de usinagem Q aumenta na mesma proporção. No entanto, se a velocidade de avanço v_f for mantida constante, os esforços de usinagem serão menores, devido ao menor avanço por gume f_z . [71].

2.4.6 Materiais das Ferramentas

Os materiais para ferramentas devem satisfazer as seguintes propriedades: resistência (à compressão, à flexão, a quente, à oxidação, à abrasão, de gume e de interna de ligação); dureza; tenacidade e pequena tendência para difusão e caldeamento [4, 34].

Ferramentas para usinar aços para moldes e matrizes devem possuir boa resistência ao desgaste, aliada à tenacidade e boa dureza a quente [28]. O aço-rápido com 12% Co mantém a dureza até 600 °C enquanto que o metal-duro até cerca de 1000 °C [29]. Os cermets possuem elevada dureza, resistência a impactos e ao desgaste do gume. De acordo com as suas características, sua aplicação é recomendada para a usinagem de ligas de alta temperatura, de aço inoxidável, de ferro fundido e de todos os metais não ferrosos [76].

Os materiais de fresas de topo sólidas podem ser: aço-rápido, aço-rápido sinterizado, metal-duro (MD) e cermet.

Em decorrência das solicitações extremas a que é submetida uma ferramenta no fresamento de materiais endurecidos, tanto em termos de esforço mecânico, quanto, também, de solicitação térmica [61], neste trabalho são empregadas apenas ferramentas de metal-duro.

Resultados obtidos em ensaios com ferramentas de CBN, no fresamento HSC do aço-ferramenta H13 com 55 HRC, mostram que o desgaste decresce com o aumento da dureza da peça [7]. Este resultado é explicado pela elevada temperatura, na raiz do cavaco, em torno de 700-800°C, que é suficiente para

reduzir a dureza do material que está sendo usinado. O calor proveniente da deformação plástica e atrito, amolece o material, de forma que o CBN não entra em contato com a peça no estado duro [7].

Metais-duros são materiais sinterizados e constituídos de um ligante (cobalto), nos quais estão embutidos os componentes duros (carbonetos). A função do ligante é constituir a ligação dos carbonetos frágeis, formando uma estrutura resistente, ao passo que os carbonetos fornecem alta dureza à quente e a resistência ao desgaste [4].

Os metais-duros dividem-se em 3 grupos de acordo com a norma ISO R513, isto é, P, M e K. [6,77]. Estes grupos são subdivididos, adicionalmente, com relação à tenacidade e resistência ao desgaste de acordo com uma numeração [34]. O grupo de maior interesse, no presente trabalho, é o K, pois é empregado na maioria das aplicações em usinagem de aços temperados [29]. Os aços temperados com 48 a 52 HRC apresentam maior eficiência de corte com substratos da classe K devido à sua maior tenacidade. Esta característica é melhorada com a diminuição do tamanho de grão, que gera um aumento significativo da tensão de escoamento e da dureza do metal-duro [61].

Os dois fatores que afetam as propriedades de corte de um MD baseado em WC-Co são [77]: conteúdo de cobalto e o tamanho de grão do carboneto de tungstênio.

O MD normal possui uma dureza de 92 HRA, tensão de ruptura transversal de 1668 N/mm² e tamanho de grão médio de 6 μm [16].

O MD com micro-grão tem grande resistência ao desgaste e rigidez iguais ao MD normal. No entanto, a tensão de ruptura transversal aumenta para 3924 N/mm² sendo quase a mesma do aço-rápido, e, portanto, mais tenaz [16]. Além disso, fresas fabricadas para usinar aços endurecidos com micro-grão são providas com geometria especial (gume e canal) [16].

A alta resistência do gume de ferramentas fabricadas com MD com micro-grão permite o uso de geometria da ferramenta de aço-rápido e quando necessário, velocidades tão baixas quanto às usadas com ferramentas de aço-rápido [16].

A tabela 2.2 apresenta as características de MD micro-grão de alguns fabricantes de fresas de topo.

Tabela 2.2 - Características de fabricantes de fresas de topo MD com micro-grão [30, 27, 32, 31, 33].

Classe de MD	WC %	Co %	Dureza HRA	Tensão de ruptura transversal (N/mm ²)	Densidade (g/cm ³)	Tam. de grão (μm)	Classificação (ISO 513)
DK460UF	90	10	1620 (HV 30)	3700 (mínima)	14,50	0,5	K30/K40
N M 12	-	10	93,0	3750	14,35	0,5	-
TF15	-	-	91,5	2501	14,50	-	-
MG Plus	88	12	1800 (HV 10)	4000	-	0,4	-
C2-3	-	10	92,1	4298	-	0,8	-

Uma outra classificação de metal-duro também pode ser feita de acordo com a tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Classificação dos grãos de MD [77].

	Tamanho de grão (μm)	Dureza (HV)	Densidade (g/cm ³)
Grão médio	1,5	1600	14,9
Grão ultra-fino	0,5 - 0,7	1800	14,9

2.4.7 Revestimentos das Ferramentas

Os revestimentos possibilitam o aumento da capacidade de suportar temperaturas elevadas, aumento da vida da ferramenta e permitem velocidades de corte e de avanço superiores [4].

Atualmente, tem-se revestimentos simples, duplo, triplo e múltiplo com 10 camadas com espessuras individuais inferiores 0,2 μm. As espessuras totais variam entre 2 e 12 μm [35]. A figura 2.9 mostra um corte polido de uma calota esférica de metal-duro revestido com múltiplas camadas.

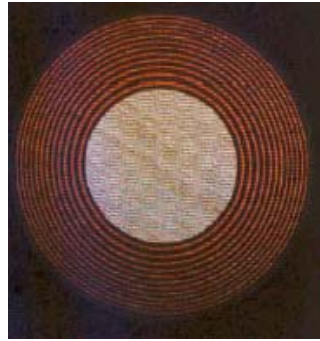


Figura 2.9 - Revestimento multicamada [37].

Os revestimentos são depositados, principalmente, através das técnicas CVD (*Chemical Vapour Deposition*), PVD (*Physical Vapour Deposition*) e também por processos físicos-químicos [35]. O processo PVD é indicado para ferramentas afiadas e com geometria complexa tais como brocas, fresas e insertos de rosqueamento.

Nas ferramentas fabricadas para a usinagem de aços endurecidos, os dois tipos mais importantes de revestimentos pelo processo PVD são: Nitreto de Titânio e Alumínio (TiAlN) e o Carbonitreto de Titânio (TiCN).

Segundo o fabricante [37] pode-se classificar o revestimento TiAlN em dois tipos, de acordo com a tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Propriedades dos tipos de revestimentos de TiAlN [37].

Tipo	Microdureza (HV 0,05)	Tipo de camada	Espessura da camada (μm)	Temperatura de utilização ($^{\circ}\text{C}$)
1	3000	multi	1-6	800
2	3500	mono	1-4	800

O TiAlN apresenta uma cor cinza-escuro para preto e pode ser depositado através de uma única camada de 2-3 μm ou multicamadas. O TiAlN possui alta adesão ao substrato, baixo coeficiente de condutividade térmica 0,05 (kW/m.K), podendo trabalhar em temperaturas de até 800 $^{\circ}\text{C}$ [28, 36, 37] e apresenta um baixo coeficiente de fricção ($\mu = 0,3$). Este revestimento é muito apropriado para a ferramenta de metal-duro trabalhar em alta velocidade de corte [28, 36, 37],

recomendando-se apenas ar comprimido para remoção dos cavacos. Pode, também, ser empregado para usinar aços endurecidos ou materiais muito abrasivos tais como ferro fundido ou alumínio com alto teor de silício [28, 35].

O TiCN é um revestimento cerâmico duro (92 HRC, 3000 HV), quando comparado com a dureza do TiN (80 HRC, 2300 HV) e do metal-duro (76 HRC) com multicamadas (até 7) com espessura do filme de 1-3 μm na cor cinza-violeta. Possui coeficiente de condutividade térmica de 0,1 (kW/m.K) o qual pode trabalhar em temperaturas de até 450 °C com um coeficiente de fricção de 0,3 [36].

Com revestimento de TiCN pode-se usinar materiais abrasivos, duros e de corte difícil, pois combina o baixo coeficiente de atrito do TiN com a dureza e a resistência ao desgaste do carbetto [35].

As principais vantagens do revestimento de TiCN são [28]:

- Aumento de velocidades de corte e avanço, mais de 100% comparados com ferramentas não revestidas e, 40-60% comparados com ferramentas revestidas com TiN [28, 35];
- Altas taxas de remoção de material;
- Superior resistência ao desgaste.

2.5 Vida da Ferramenta

A vida de uma ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido [4, 34]. Os critérios para o fim de vida de uma ferramenta mais usuais são [29]:

1. Marca de desgaste do flanco;
2. Profundidade de cratera;
3. Quebra do gume;
4. Temperaturas atingidas na interface cavaco/ferramenta;
5. Tolerâncias dimensionais da peça não são mais possíveis de se obter;
6. Deficiência do acabamento da superfície usinada;
7. Forma do cavaco;
8. Vibrações intensas da peça ou da ferramenta;
9. Aumento excessivo das forças de usinagem.

Pelo controle destes fatores numa operação de usinagem, identifica-se quando a ferramenta deve ser substituída ou reafiada, se possível. A quantificação da vida da ferramenta permite estabelecer um [29]:

- Tempo efetivo de corte;
- Comprimento de corte;
- Volume de material removido;
- Número de peças usinadas.

Os critérios acima variam com o tipo de operação que está sendo executada, isto é, desbaste, semi-acabamento ou acabamento. Contudo, quando o fim de vida é atingido, a ferramenta ou os insertos devem ser trocados ou reafiados, antes que algum dano ou quebra catastrófica do gume ocorra e comprometa a qualidade final da peça ou a integridade de partes da máquina-ferramenta [17, 39]. Assim, o controle do desgaste no gume da ferramenta é essencial para maximizar o tempo de uso da ferramenta, de sobremodo no fresamento, empregando ferramentas maciças de MD, aumentando sua produtividade, com redução de custos [17]. Quando se deseja reafiar uma ferramenta, é usual estabelecer critérios de desgaste que garantam um fim de vida não catastrófico. Normalmente, permite-se marcas de desgaste de flanco máximo de apenas 0,2 a 0,3 mm [40]. Lascamentos e desgaste de cratera devem ser mantidos mínimos ou até evitados.

O desgaste regular da fresa é, principalmente, caracterizado pelo desgaste de flanco. Para medi-los, utilizam-se os parâmetros de padrão internacional da marca de desgaste do flanco VB e $VB_{\text{máx}}$ [4, 29, 34, 38], internacionalmente adotados.

O desgaste de flanco é predominante e, na maioria das vezes, é utilizado para análise e comparação de resultados experimentais. O desgaste de cratera é de difícil avaliação e possui pouca ocorrência quando a ferramenta é escolhida de forma correta, ou quando a temperatura de corte for muito elevada, favorecendo o desgaste por difusão.

Na figura 2.10, é mostrada a forma de desgaste mais comum na cunha de uma fresa. A ferramenta representada na figura está desgastada no flanco principal. A mesma figura identifica o desgaste máximo do flanco ($VB_{\text{máx}}$), o deslocamento do gume medido sobre o flanco principal da ferramenta (SV_{α}) e o deslocamento do gume medido sobre a face (SV_{γ}).

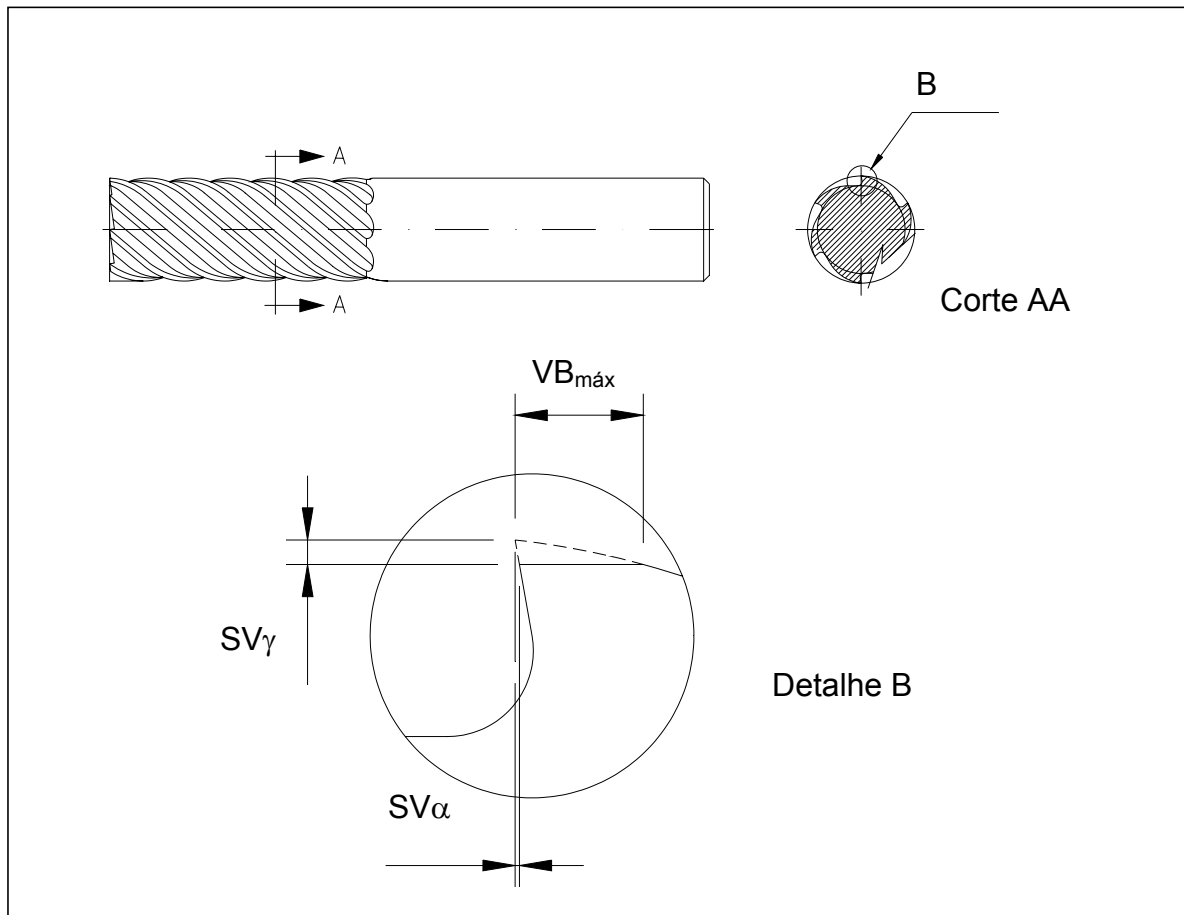


Figura 2.10 - Desgaste de flanco na cunha de corte.

São vários os mecanismos de desgaste que atuam simultaneamente no fresamento, em especial, decorrentes da fadiga por choques térmicos e mecânicos devido ao processo do corte interrompido imposto pelo fresamento [17, 39]. Estes mecanismos causam, principalmente, os desgastes nas formas de lascamento, trincamento ou quebra de gume.

A falha de uma ferramenta pode ocorrer sob três formas distintas: lascamento do gume, desgaste no flanco e desgaste na face.

O lascamento é causado por [4, 29]:

- Enfraquecimento da cunha da ferramenta;
- Mau acabamento do gume;
- Material da ferramenta muito duro e pouco tenaz;
- Inclusões duras na peça;
- Dimensões excessivas da seção do cavaco;
- Solicitações térmicas excessivas.

Na usinagem de aços endurecidos, os esforços mecânicos e térmicos são de sobremodo acentuados, de forma que é necessário tomar medidas preventivas para manter os efeitos destes esforços minimizados.

As formas de corrigir este problema ou mantê-lo sob controle são: empregar ângulos de saída negativos, especialmente em peças com inclusões duras ou com cordões de solda; emprego de classe de metal-duro adequado; retificação fina ou polimento da face e do flanco da ferramenta; alisamento do gume por meio de afiação com pedra para a formação de um chanfro [29].

2.5.1 Reafiação das Fresas de Topo

O emprego de fresas de metal-duro maciças, no fresamento de forma, está largamente difundido e embora estas ferramentas tenham um custo de aquisição mais elevado que as fresas de aço-rápido, elas permitem diminuir os custos de produção pela possibilidade do aumento da velocidade de corte e o aumento da vida. Com a diminuição dos custos de retificadoras de ferramentaria de comando numérico, tem aumentado a oferta para a reafiação destas ferramentas de forma econômica.

A reafiação deverá ser feita quando a ferramenta chegar ao fim de vida, de acordo com critérios específicos, tais como:

- marca de desgaste máxima dentro de limites toleráveis ($VB_{m\acute{a}x}$);
- ausência de trincas ou lascamentos que comprometam a integridade da ferramenta.

A tabela 2.5 apresenta a recomendação de alguns fabricantes para a reafiação de fresas de topo. O valor médio de $VB_{m\acute{a}x}$ para reafiação da fresa situa-se na faixa de 0,2-0,3 mm.

Tabela 2.5 - Recomendações para reafiação [16, 28, 23, 33, 40].

Fabricante	d_1 (mm)	$VB_{m\acute{a}x}$ (mm) antes da reafiação da ferramenta
F	-	0,20-0,40
G	≤ 10	0,12
D	10-14	0,50
H	$< 12,7$	0,15
I	-	0,20-0,30

A reafiação da fresa de topo reto pode ser feita de várias maneiras:

- Reafiação da face do gume principal (rebolo prato);
- Reafiação do flanco do gume principal (rebolo prato ou copo);
- Reafiação do flanco do gume secundário (rebolo copo).

A reafiação na face é recomendada tanto para fresas de desbaste detalonadas quanto para fresas de acabamento com cobertura [40]. A indexação do cabeçote retificador deve ser de aproximadamente um a dois graus maior que o ângulo de hélice.

A afiação na face da ferramenta deve ser feita até o raio da raiz, de forma a criar uma superfície côncava para saída otimizada de cavacos [40]. Deve-se ter a precaução de não reafiar o 1º ângulo de incidência ortogonal do gume principal demasiadamente largo; como regra geral pode-se usar a largura do 1º flanco igual a 10% do diâmetro da fresa medido sobre os gumes. Dependendo do diâmetro da fresa, o 1º ângulo de incidência ortogonal deve ser escolhido entre seis a doze graus e o 2º ângulo de incidência ortogonal entre quinze a vinte e cinco graus. Quanto menor o diâmetro da fresa, maior o ângulo de incidência [13, 40].

A reafiação pode ser feita em dois tipos de retificadoras de ferramentaria: convencional, com no máximo 4 graus de liberdade e CNC com 5, 8 ou mais eixos comandados.

A reafiação de ferramentas de metal-duro em máquinas convencionais geralmente não leva a bons resultados, devido à menor precisão da geometria da ferramenta gerada, bem como pouca repetibilidade nas condições de retificação. quando comparada com máquinas CNC. As máquinas CNC permitem medir as ferramentas e automaticamente gerar um programa de afiação.

Após a reafiação, em ambos os processos (convencional e CNC), deverão ser inspecionados os seguintes pontos:

1. O 1º ângulo de incidência ortogonal do gume principal;
2. O ângulo de saída ortogonal do gume principal;
3. Batimento radial dos dentes do gume principal e do gume secundário;
4. Rugosidade da superfície afiada.

2.6 Sistemas de Fixação da Ferramenta ao Cone

Um bom sistema de fixação das ferramentas deve atender as seguintes condições: boa transmissão de torque, batimento ou excentricidade compatível com o processo, repetibilidade, fácil manutenção, manuseio e boa relação custo-benefício.

Na fabricação da fresa de topo, a excentricidade da haste e dos gumes é de extrema importância. Uma haste precisa tem um bom encaixe na pinça, resultando em um pequeno batimento, colaborando para aumento da vida da ferramenta [16]. Em condições normais de usinagem a ocorrência de excentricidade é praticamente inevitável, principalmente, devido a erros na montagem da ferramenta no cone com pinça.

Uma fresa de topo, montada de forma excêntrica, pode ser representada por uma ferramenta com um raio variável, girando em torno do eixo de rotação e, desta forma, tem-se que a espessura do cavaco não é igual para todos os dentes [48].

Um dos principais critérios empregados na escolha de suportes de fixação de ferramentas de corte é o batimento. Quanto menor for o batimento, mais uniforme será a carga de trabalho sobre cada gume da fresa. Um batimento nulo daria, teoricamente, a melhor vida, além de textura e acabamento superficial [41, 48].

Na tabela 2.6 estão tolerâncias de batimento nos gumes periféricos e frontais para fresas de topo reto de metal-duro em desbaste e acabamento.

Tabela 2.6 - Tolerâncias de batimento para fresa de topo reto [16].

Batimento	Gume periférico (mm)	Gume frontal (mm)
Fresa de desbaste	< 0,05	< 0,05
Fresa de acabamento	< 0,03	< 0,05

Diversos sistemas de fixação de ferramentas estão disponíveis no mercado. Os principais sistemas de fixação de ferramentas são:

- Mandril com pinça DIN 6499;
- Suporte *Weldon/Wistle-Notch*;
- Mandril hidráulico;
- Mandril de fixação por contração térmica (*Shrink Fit*);

- Mandril hidro-mecânico.

O mandril com pinça é o mais empregado do desbaste ao semi-acabamento, possuindo uma boa transmissão de torque, necessitando de limpeza e troca de pinças. Alcança-se um batimento entre 0,01-0,03 mm em um comprimento de até 4 vezes o diâmetro dos gumes ($4x d_1$) [41]. Apresenta uma baixa repetibilidade por problemas de montagem da ferramenta no suporte. Devido à versatilidade, robustez e baixo custo é largamente utilizado na indústria nacional.

O suporte *Weldon/Wistle-Notch* é mais indicado para o desbaste pesado ao semi-acabamento, possuindo uma excelente transmissão de torque e praticamente não necessita de manutenção. Alcança-se um batimento entre 0,01-0,02 mm em até $4x d_1$ [41]. O batimento no suporte *Weldon* ocorre porque a ferramenta fica pressionada, lateralmente, pelo parafuso de fixação, conforme figura 2.11.

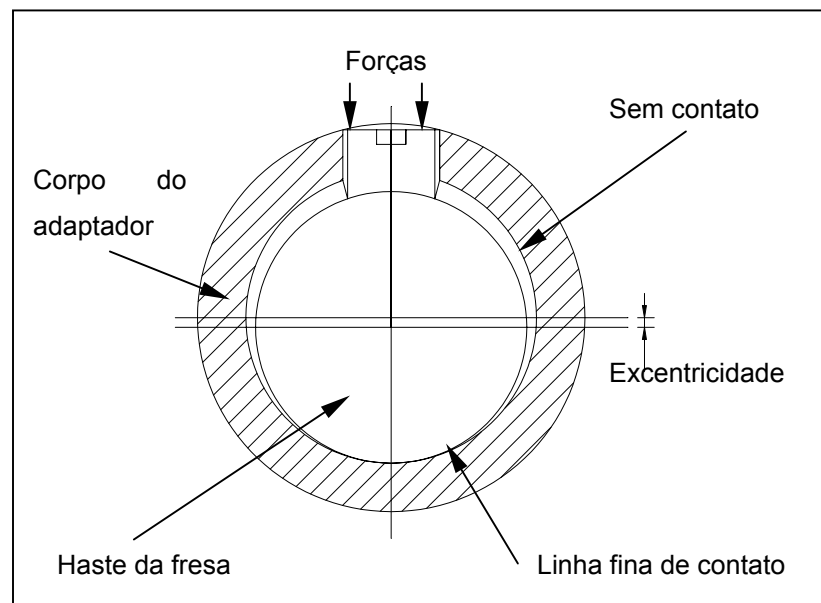


Figura 2.11 - Excentricidade do mandril *Weldon* [42].

O mandril hidráulico é mais indicado em acabamento, possuindo uma razoável transmissão de torque, não necessitando de manutenção. Alcança-se um batimento entre 0,003-0,008 mm em até $4x d_1$ [41]. As principais características do mandril hidráulico são [42, 43]:

- Tempos curtos de ajuste, sem desmontagem da ferramenta;
- Precisão;
- Repetibilidade;

- Sistema de fixação fechado resistente à sujeira;
- Alta qualidade de usinagem e vida longa da ferramenta, devido ao efeito amortecedor da luva expansiva.

O princípio de funcionamento do mandril hidráulico baseia-se no deslocamento de um pistão hidráulico acionado por parafuso que faz com que o pistão pressurize o meio hidráulico, que deforma as finas paredes da luva expansiva. Como se fosse uma membrana, a luva expande-se e exerce uma grande força de fixação, concêntrica na haste da ferramenta [42]. A figura 2.12, mostra esquematicamente, o funcionamento da fixação hidráulica.

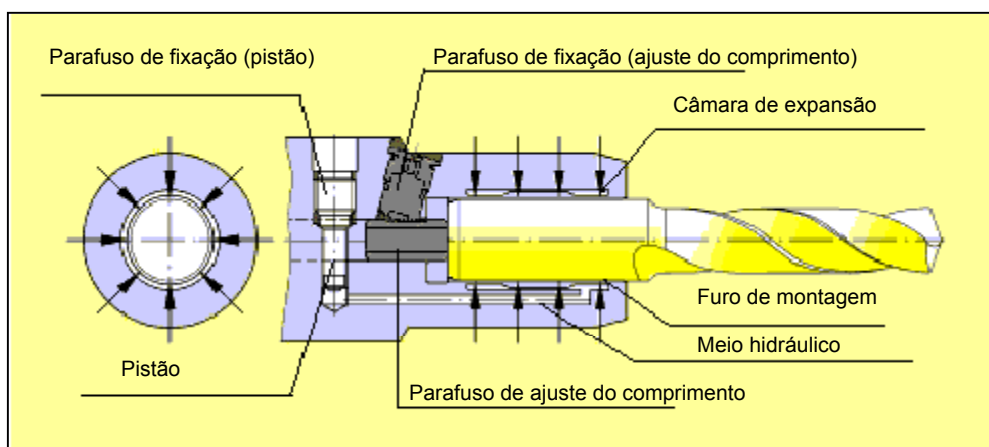


Figura 2.12 - Esquema de funcionamento do mandril hidráulico [42].

O maior torque de transmissão do mandril hidráulico ocorre no sistema com pinça individual no mandril, ou seja, o mandril é fabricado para somente um diâmetro de fixação [43]. A utilização de ferramentas com haste *Weldon/Wistle-Notch* só é possível com luva intermediária. O mandril hidráulico tem um melhor desempenho com fresas de haste cilíndrica [42, 43].

O mandril de fixação por contração térmica é utilizado do desbaste pesado ao acabamento, possuindo uma excelente transmissão de torque e não necessitando de manutenção. Alcança-se um batimento entre 0,003-0,006 mm em até $4x d_1$ [41]. As principais características do mandril por contração são [41, 44]:

- Rápida expansão e encolhimento;
- Ótimo acabamento da peça devido à alta rigidez do sistema de fixação;
- Excelente resistência à flexão, mesmo para mandris longos e delgados;

- Precisão;
- Alta vida do fuso e da ferramenta.

O sistema de fixação por contração térmica baseia-se na expansão proporcional dos materiais sólidos em função da temperatura. O aumento da temperatura do porta-ferramenta tem como consequência o aumento do diâmetro interno do mandril. A haste da ferramenta de corte é colocada dentro do furo do mandril porta-ferramenta. Com o resfriamento do mandril, é obtida uma alta força de fixação radial. Considerando-se que a expansão é realizada dentro da faixa de elasticidade, especificada pelo material do porta-ferramenta, a operação é reversível e pode ser realizada tantas vezes quanto forem necessárias [44].

Pode-se produzir calor para expansão por indução ou ar quente. O processo de indução tem vantagem sobre o processo de ar quente porque a ferramenta tem um aquecimento muito localizado na área de fixação, reduzindo o aquecimento de demais partes do mandril. Com isso tem-se a possibilidade de utilizar ferramentas de metal-duro e aço-rápido [44]. A figura 2.13 mostra a distribuição das temperaturas de aquecimento no porta-ferramenta por indução.

Para soltar a ferramenta, aquece-se o mandril. Para ferramentas de metal-duro, que têm um coeficiente de dilatação térmica menor que o do aço, a ferramenta se solta do mandril, mesmo que o aquecimento seja lento. Ferramentas de aço-rápido só podem ser soltas em um sistema de aquecimento indutivo, de forma que a temperatura do núcleo seja sensivelmente menor que a temperatura do mandril.

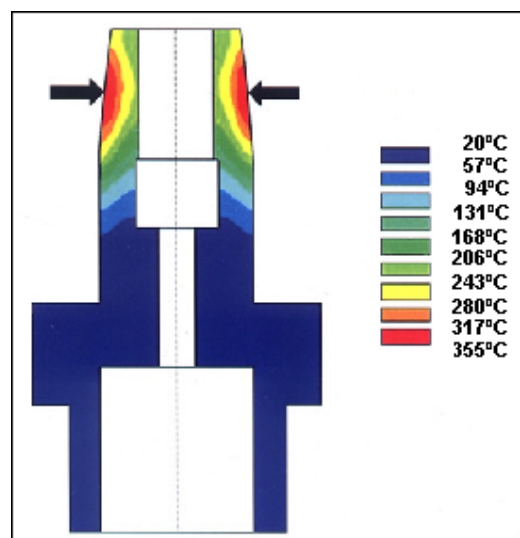


Figura 2.13 - Distribuição das temperaturas no sistema por indução [44].

O mandril hidro-mecânico é empregado do desbaste pesado ao acabamento, possuindo a melhor transmissão de torque dos sistemas atuais de fixação de acordo com a tabela 2.7 e não necessita de manutenção. Alcança-se um batimento entre 0,002-0,006 mm em até $4x d_1$ [41]. Pode ser utilizado em haste cilíndrica ou *Weldon/Wistle-Notch* (com restrições). No desbaste, possui grande vantagem, pois o mecanismo é auto-travante, ou seja, não há pressão hidráulica no mecanismo durante a usinagem [41].

Tabela 2.7 - Comparação de transmissão de torque [41].

Diâmetro da haste (mm)	Tipo de mandril	Torque (Nm)
12	Hidráulico	50
	Fixação por contração térmica (<i>Shrink Fit</i>)	72
	Hidro-mecânico	99

A fixação se baseia no princípio de deslocamento de uma luva cônica no interior de um assento cônico do mandril. O deslocamento da luva cônica é procedido por um sistema hidráulico externo, com pressão de até 700 bar.

Através da pressão aplicada no furo inferior, a luva cônica do mandril é deslocada para cima, sobre o assento cônico, quando a ferramenta é fixada e, quando a pressão é aplicada no furo superior, a luva cônica do mandril é deslocada para baixo, sendo a ferramenta liberada, de acordo com a figura 2.14. O sistema é auto-travante. Após a ferramenta ser fixada a pressão hidráulica é liberada.

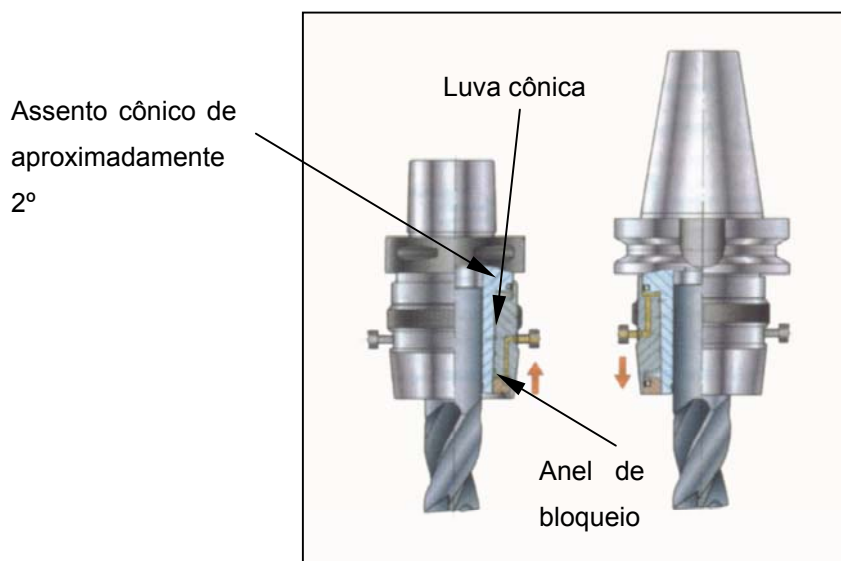


Figura 2.14 - Esquema de funcionamento do mandril hidro-mecânico [41].

Na usinagem de aços temperados os melhores sistemas de fixação da ferramenta são o mandril de fixação por contração térmica e o mandril hidromecânico. Os fatores que contribuem expressivamente são: alto torque, pequeno batimento (precisão) e ausência de manutenção. No caso do mandril por contração térmica, há ainda a possibilidade de prolongadores de ferramentas delgados, o que facilita a usinagem, especialmente, de cavidades de matrizes [41].

2.7 Sistemas de Fixação do Cone na Árvore da Máquina

Uma importante fonte de instabilidade, no processo, é o erro no encaixe entre o porta-ferramenta e a interface do fuso. O motivo é que, freqüentemente, existe uma folga nessa fixação e também pode haver um fragmento ou sujeira dentro do cone. Além disto, o cone não se posicionará da mesma forma todas as vezes que for montado no fuso. A presença de qualquer contaminação cria um batimento, ainda que a ferramenta e o fuso estejam perfeitos [41].

Os tipos de cones utilizados para o fresamento são o cone de flange do tipo V (cone ISO - figura 2.15) e o cone vazado HSK (*Hohlschaftkegel*, *Hollow Shank Taper* - figura 2.16). O cone flange V é fixado à interface do fuso somente pela superfície cônica. O cone HSK ajusta-se na face e na superfície cônica.

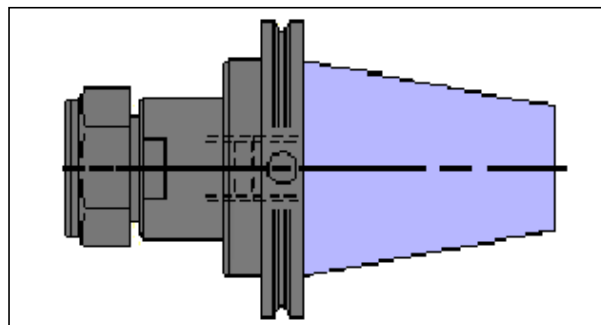


Figura 2.15 - Cone flange V [42].

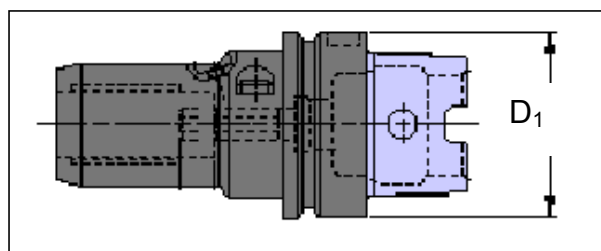


Figura 2.16 - Cone HSK [42].

Para aplicações de altas velocidades de corte, envolvendo elevadas forças centrífugas, o sistema HSK é o mais apropriado [71].

As figuras 2.15 e 2.16 mostram as diferenças geométricas entre o cone flange V e o cone HSK. O diâmetro D_1 , representado na figura 2.16, fornece diâmetros nominais correspondentes aos tamanhos de cones HSK. Por exemplo $D_1 = 50$ mm refere-se ao cone HSK 50. Os cones HSK são fabricados nos seguintes tamanhos: 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125 e 160.

Em contraste com o cone flange V, o cone HSK oferece as seguintes vantagens [73]:

- Alta rigidez contra forças laterais;
- Boa repetibilidade de posicionamento nas direções radial e axial;
- Boa concentricidade alcançada no gume da ferramenta;
- Precisão do processo de usinagem quando atuam altas forças de corte e avanços.

No cone HSK as exigências de fabricação com relação aos erros de forma (cilindricidade e concentricidade) são consideravelmente superiores ao cone flange V. O batimento alcançado no cone flange V é da ordem de 0,05 mm, enquanto que o cone HSK é de até 0,003 mm. Estes valores são orientativos, e existe uma dependência entre o batimento e o sistema de fixação da ferramenta ao suporte, tanto para o cone V flange quanto para o cone HSK.

A tabela 2.8 mostra diferentes batimentos do cone HSK em relação ao sistema de fixação da ferramenta. A referida tabela é para ferramenta interiça, de diâmetro de 18-26 mm e com projeção do comprimento da ferramenta (balanço) de 50 mm.

Tabela 2.8 - Batimentos de diferentes sistemas de fixação [42].

Sistema de fixação	Batimento (mm)	
	Pinça padrão	Pinça de alta precisão
Cone HSK com porta-pinça	0,04	0,02
Cone HSK com mandril hidráulico	0,003	—

2.8 Avaliação da Usinabilidade

O termo usinabilidade compreende todas as propriedades de um material que têm influência sobre o processo de usinagem. A usinabilidade de um material sempre é vista no contexto do processo de fabricação, no material da ferramenta e nas condições de corte [4]. No julgamento e no teste de usinabilidade, são empregados vários critérios que necessariamente não interdependem um do outro, isto é, devem ser determinados um de cada vez [4].

Os critérios de usinabilidade são [64]:

- Vida da ferramenta;
- Qualidade superficial da peça;
- Formação de cavacos;
- Força de usinagem.

a) Critério Vida da Ferramenta

A vida da ferramenta é normalmente o critério de maior importância na caracterização da usinabilidade de um material [4, 74]. A vida “T” é o tempo mínimo que uma ferramenta resiste, do início ao fim do corte, até sua utilização total e é definida através da equação de Taylor [64].

$$T = v_c^k \cdot C_v \quad (8)$$

onde

T [min]: Vida da ferramenta

v_c [m/min]: Velocidade de corte

C_v [constante]: Vida para $v_c = 1$ m/min

k: Coeficiente angular da curva da vida

A dependência entre a vida T e a velocidade de corte v_c é exponencial e, num sistema bi-logarítmico, ela é representado por uma reta, conforme figura 2.17.

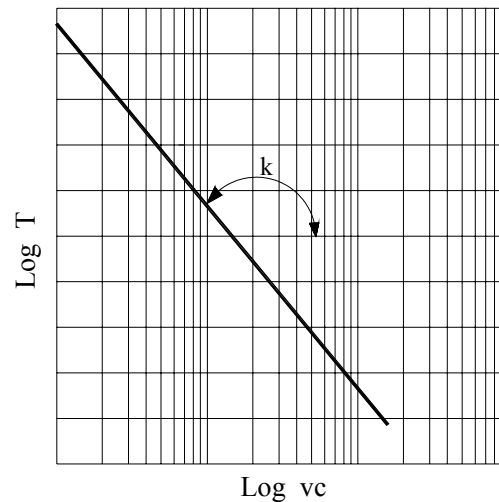


Figura 2.17 - Representação esquemática do comportamento da vida da ferramenta de corte em função da velocidade de corte ($\log T \times \log v_c$) [74].

Os fatores que influenciam o aparecimento do desgaste na ferramenta são as partículas duras e abrasivas da peça, bem como a resistência da matriz e o material da ferramenta empregado [64]. Apesar de utilizarem-se baixas velocidades de corte, no caso de aços endurecidos, a vida é pequena, pois este tipo de material é duro e resistente e o desgaste é bastante acentuado pelos carbonetos presentes.

b) Critério Qualidade da Superfície Usinada

A qualidade da superfície de uma peça usinada é determinada em função da precisão dimensional e da rugosidade da superfície. Ambas são baseadas na tolerância pré-fixada da peça.

Um material de maior resistência mecânica associado a uma maior velocidade de corte, permite a obtenção de peças com melhor acabamento da superfície usinada. No fresamento de materiais duros e com pequenas seções de usinagem, utilizando-se ferramentas de metal-duro de granulometria extra-fina obtém-se qualidade da textura gerada comparável à retificação [34].

Se o material é de baixa resistência ou a velocidade de corte muito baixa, o material será arrancado durante a operação de usinagem e a peça apresentará em sua superfície uma série de micro-trincas [22].

A qualidade das superfícies obtidas na usinagem pode ser um critério para determinação dos parâmetros de entrada. Os fatores influentes sobre a qualidade das superfícies estão relacionados na figura 2.18 [64].

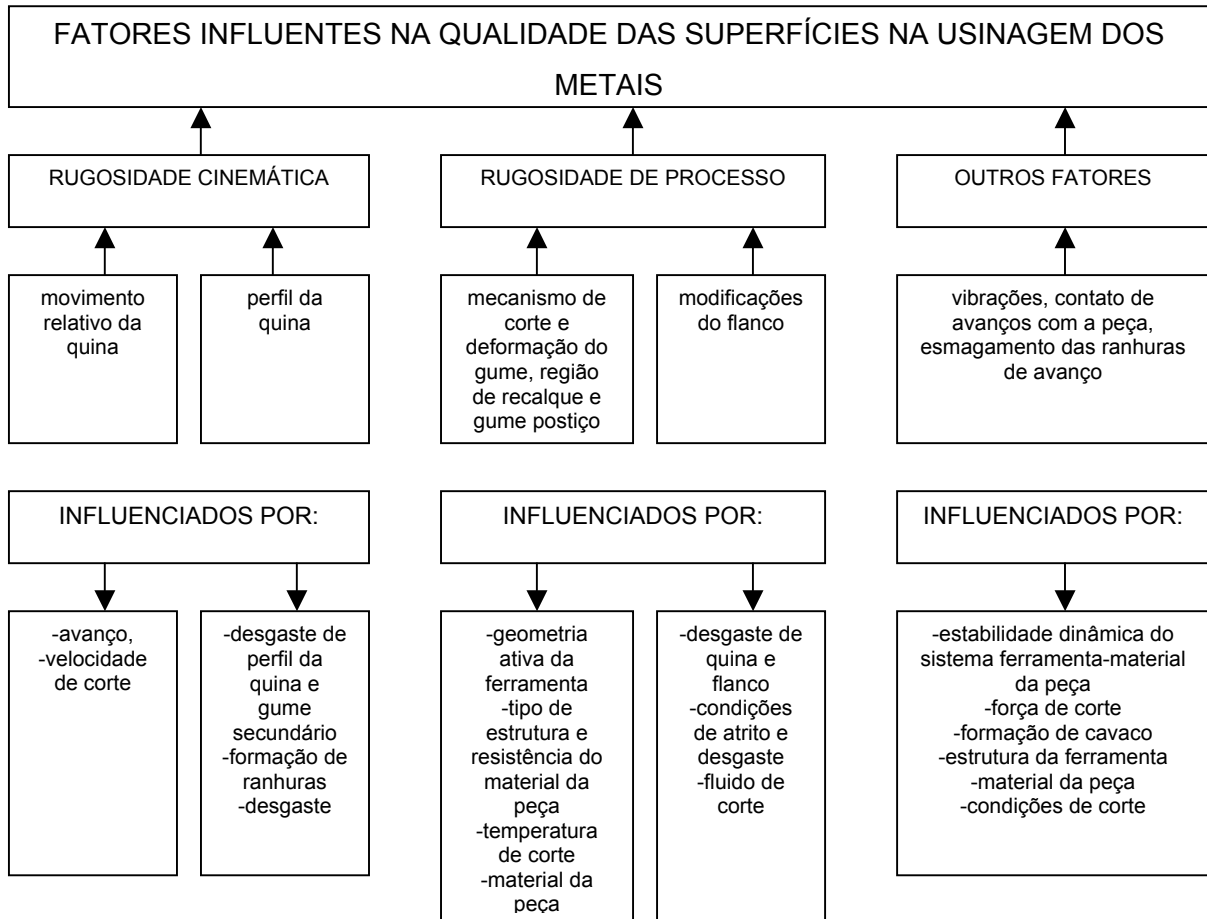


Figura 2.18 - Fatores influentes sobre a qualidade da superfície usinada [64].

A rugosidade cinemática (teórica) é decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre peça e ferramenta [74].

c) Critério Formação de Cavacos

A forma e o tamanho do cavaco são muito importantes, principalmente, para os processos de usinagem, onde há pouco espaço para os cavacos tal como o fresamento [8]. No fresamento de aços endurecidos, a quebra do cavaco é facilitada pelas baixas velocidades de corte utilizadas, baixa tenacidade e alta resistência do material [34], além do uso de ângulos de saída negativos ou neutros nas ferramentas.

Existem quatro tipos básicos de cavaco: contínuo, lamelar, cisalhado e fragmentado (arrancado), que podem ser diferenciados, também, quanto à sua forma em [60]: cavaco em fita, helicoidal, espiral e em lascas ou pedaços.

As principais influências sobre a formação dos cavacos são as condições de corte, a geometria e o estado de desgaste da ferramenta e, por parte do material da peça, a deformabilidade, a tenacidade e a resistência ou estado metalúrgico do material [34].

d) Critério Força de Usinagem

O conhecimento de forças na usinagem é necessário para [34]:

- Projeto da máquina-ferramenta;
- Determinação das condições de corte;
- Avaliação da precisão da máquina-ferramenta;
- Explicação dos mecanismos de desgaste;
- Conhecimento da energia gasta.

A grandeza da força de usinagem é um critério para a usinabilidade do material da peça, já que, geralmente, a usinagem de materiais de difícil usinabilidade, tais como aços-ferramenta temperados; também apresentam forças de usinagem maiores [4]. A influência do material da peça sobre a força de usinagem consiste em que estas, normalmente, crescem com o aumento do teor de cromo e diminuem com o aumento do teor de enxofre.

Além do material da peça, influenciam as forças de usinagem as condições de corte e a geometria da ferramenta. A geometria da ferramenta influencia da seguinte forma [34]:

- Ângulos de saída e inclinação têm grande influência sobre as componentes de força;
- Ângulo de incidência e raio de quina tem pouca influência sobre as componentes de força.

O tipo de material da ferramenta atua principalmente no coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta e em decorrência disso, sobre as componentes da força [4].

2.9 Propriedades e Usinabilidade do Material para Matriz

A fabricação de insertos montados junto à matriz de compactação de pós cerâmicos é predominantemente feita em aços-ferramentas. Estes têm suas propriedades definidas pela composição e pelo tratamento térmico a que são submetidos.

A seguir será explanado o material foco deste trabalho. Este estudo concentra-se nas características, na composição química, nos elementos de liga e na usinabilidade deste material.

2.9.1 Aço-Ferramenta para Trabalho a Frio D6

Os aços-ferramentas estudados neste trabalho pelo aço (AISI-SAE D6, DIN X210CrW12, ABNT D6) são caracterizados por apresentarem propriedades adequadas para a produção de ferramentas, como pequenas alterações na forma e nas dimensões durante o tratamento térmico, razão pela qual são chamados “indeformáveis” [1].

Sua temperabilidade é elevada apresentando uma grande profundidade de endurecimento e também uma excelente resistência à abrasão [2, 6]. Sua resistência ao calor é regular. A tenacidade e usinabilidade são pequenas, especialmente no estado temperado [1].

O aço D6 apresenta a seguinte composição química: C = 2,10% Cr = 11,50% W = 0,70% V = 0,20% [2]. É fornecido no estado recozido com dureza máxima de 250 HB (24,5 HRC) e após a têmpera e o revenido alcança a dureza entre 60-62 HRC.

O efeito dos principais elementos de liga na composição do aço D6 estão descritos abaixo:

- Carbono (C): É o elemento essencial, para a formação dos carbonetos, [1] que conferem dureza e resistência ao desgaste. Quanto mais elevado o teor de carbono, maior a quantidade de austenita retida na têmpera, exigindo temperaturas de revenido mais elevadas e tempos de revenimento mais longos [3]. O teor de C elevado favorece a tendência à decarbonetação, durante o aquecimento para o tratamento térmico, principalmente, quando não se tomam precauções no sentido de evitá-la. Do mesmo modo, dependendo do teor de

carbono inicial e da atmosfera de tratamento térmico utilizado no forno, pode ocorrer uma pequena carbonetação da superfície, a qual, às vezes, é propositadamente provocada (980°-1.095°C), para melhorar a dureza da superfície. O alto teor de carbono do aço D6 piora a usinabilidade, provocando um forte desgaste da ferramenta [4].

- Cromo (Cr): Adicionado, principalmente, para aumentar a temperabilidade, tornando, junto com o Mn, o aço temperável em óleo. Aumenta a resistência ao desgaste, porque aumenta a dureza, sem prejudicar sensivelmente a ductilidade [3].
- Tungstênio (W): Formador de carbonetos. Sua principal característica é conferir a dureza a quente [3], isto é, capacidade de retenção da dureza até temperaturas da ordem de 600°C. Ainda que o W seja o elemento mais eficiente na dureza a quente, a obtenção desta característica é mais efetiva quando se adiciona juntamente com V ou Cr.
- Vanádio (V): Forma carbonetos estáveis e melhora a temperabilidade dos aços ferramenta. O carboneto formado pelo vanádio é considerado o carboneto mais duro encontrado nos aços, com dureza superior ao carboneto de cromo, ao tungstênio ou ao óxido de alumínio [3]. O principal efeito é impedir o crescimento do grão, refinando-o e, também, atua na melhora da dureza a quente. O refino de grão aumenta a dureza, resistência mecânica e, também, a tenacidade do material [72] o que piora a usinabilidade.

Elementos de liga formadores de carbonetos tais como Cromo, Tungstênio e Vanádio são responsáveis pelo forte desgaste de ferramentas durante a usinagem [34] o que piora a usinabilidade, quanto ao critério vida da ferramenta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é feita uma descrição da infra-estrutura de trabalho, do material dos corpos de prova (CP), das ferramentas de corte (metalografia), e dos métodos necessários para realização de ensaios dos fabricantes de ferramentas nos corpos de prova retilíneos em desbaste. No acabamento é apresentada a sistemática do ensaio por retificação plana.

3.1 Infraestrutura de Ensaio

Os corpos de prova ensaiados foram dispostos na mesa da máquina-ferramenta, paralelos ao eixo X.

A movimentação da ferramenta foi controlada via programa CNC. A geometria e as dimensões dos CP foram projetadas de acordo com as dimensões da mesa da máquina-ferramenta, conforme a figura 3.1 e, também, para facilitar a obtenção de dados em análise posterior.

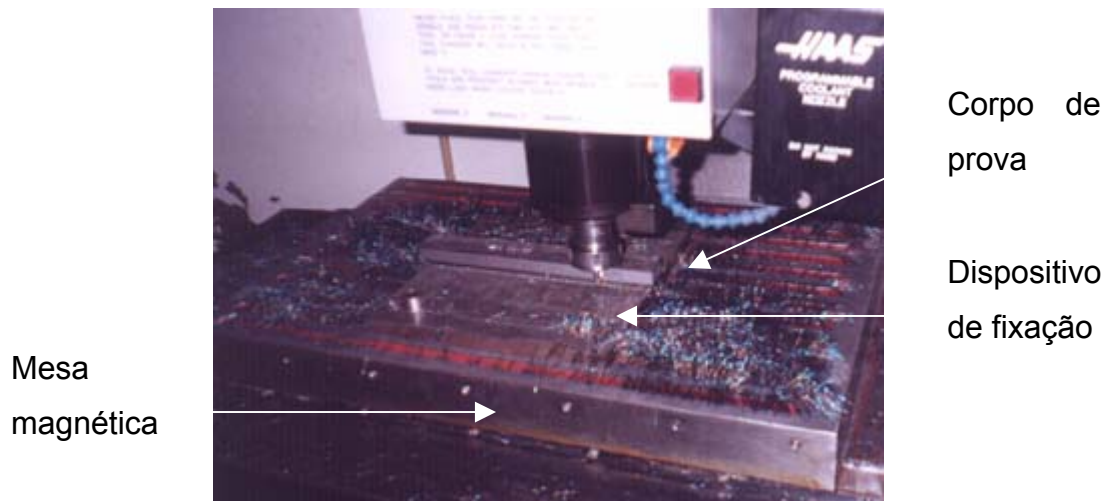


Figura 3.1 - Montagem básica dos corpos de prova na máquina-ferramenta.

Os ensaios de usinagem foram realizados em um Centro de Usinagem Vertical CNC, entretanto, foram necessários outros equipamentos para fazer as medições. A relação dos principais equipamentos e os métodos para a sua utilização estão descritos a seguir.

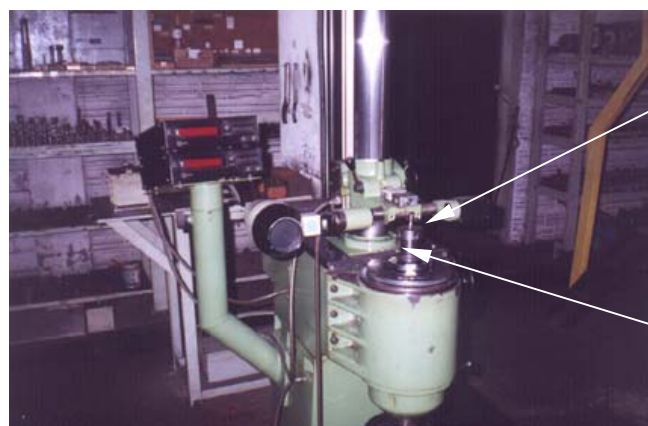
3.1.1 Máquina-Ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada no presente trabalho é de uso da produção da empresa parceira. Trata-se de um Centro de Usinagem Vertical HAAS, modelo VF-3. Os dados técnicos desta máquina encontram-se no anexo 8.1. A programação da trajetória da ferramenta foi feita em computador e transmitida via DNC até a máquina. Algumas pequenas correções foram feitas pelo operador via MDI.

3.1.2 Unidade de Aferição de Ferramentas

Antes dos ensaios as ferramentas eram medidas nos corretores do raio e comprimento, comprimento em balanço, na ferramentaria do fabricante de matrizes. Esse procedimento é chamado de *pre-setter* e, sem este, não se pode dar início aos ensaios, pois a máquina não tem informação suficiente para executar o programa. Outra vantagem de medir os corretores do raio e comprimento é para poder mensurar a diminuição destes quando da remoção de material na reafiação. Dados técnicos sobre a máquina de aferição de ferramentas encontram-se no anexo 8.2.

Neste aferidor também se podia medir o batimento da ferramenta, já que esta estava fixada ao cone porta-pinça. Entretanto, abandonou-se este procedimento haja visto que o cone ISO 50, do aferidor, possuía uma redução para ISO 40, da máquina-ferramenta, que apresentava uma folga considerável na interface aferidor e cone porta-pinça. A figura 3.2 apresenta a unidade de aferição onde era feito o *pre-setter* da ferramenta.



Ferramenta

Cone porta-
pinça

Figura 3.2 - Aferidor de ferramentas WOTAN.

3.1.3 Dispositivo para Medição do Batimento

Antes de iniciar os ensaios era medido o batimento da ferramenta montada no porta-pinça e este à máquina-ferramenta, com o relógio comparador fixado na mesa magnética da máquina. A metodologia era a seguinte:

1. Inserção da ferramenta montada ao cone porta-pinça à máquina;
2. Colocação do relógio comparador MITUTOYO, com resolução de 1 μm , junto ao flanco do gume principal da ferramenta com menor excentricidade. Este gume era convencionado como gume 1 com batimento zero;
3. Girava-se a ferramenta a partir do gume 1 no sentido contrário de corte da ferramenta, e anotavam-se os resultados dos batimentos medidos pelo relógio comparador;
4. O maior batimento era considerado como o batimento do ensaio na posição 1;
5. Após medir os batimentos na posição 1, retirava-se o cone porta-pinça da máquina e recolocava-se em posição oposta à chaveta da árvore da máquina-ferramenta, repetindo-se os procedimentos 2, 3 e 4 e convencionava-se chamar de posição 2.

O motivo de girar a ferramenta no sentido contrário ao corte é para a ponta do relógio comparador não bater diretamente no gume, podendo causar alguma avaria.

A vantagem de medir o batimento na máquina-ferramenta e não no equipamento de aferição de ferramentas é que a medição envolve as folgas do conjunto máquina-ferramenta, ferramenta e dispositivo de fixação da ferramenta.

3.1.4 Equipamento para Avaliação de Desgaste da Ferramenta

Para avaliação do desgaste foi utilizada a medição digital. Utilizou-se um conjunto de lentes, câmara digital e um microcomputador com placa de aquisição de imagens, ilustrado na figura 3.3. A câmara e as lentes são montadas em uma estrutura de modo que a ferramenta a ser medida possa ser convenientemente posicionada no campo focal, para que as respectivas superfícies que contêm as marcas de desgaste fiquem perpendiculares ao eixo das lentes.

Para obtenção de imagens com boa definição são necessários ajustes no posicionamento da ferramenta, na iluminação (direção e intensidade) e na distância focal. A qualidade da foto gerada se reflete, diretamente, na confiabilidade dos

resultados obtidos. A magnitude das formas de desgaste das ferramentas definiu o aumento utilizado para o registro das fotos, o qual foi de aproximadamente 30 vezes.



Figura 3.3 - Equipamento para avaliação digital do desgaste.

Neste equipamento pode-se observar algumas formas de desgaste presentes no fresamento de aço AISI-SAE D6 temperado e revenido, utilizando fresas de metal-duro revestidas tais como: cegamento dos gumes e lascamentos na face. Com exceção dos lascamentos, as formas de desgaste atuantes neste tipo de material diferem dos materiais tradicionais como aços carbono, pois o fim de vida da ferramenta é determinado antes que estas formas de desgaste venham a ocorrer. Como principais critérios para fim de vida utilizados pelos fabricantes de ferramentas pode-se citar:

1. Formação de cavaco do tipo moído, com cor azul - marrom (semelhante a cavacos em forma de vírgulas, entretanto com grande raio de curvatura);
2. Queima (oxidação) da superfície da peça ocasionada pelo superaquecimento na interface ferramenta/peça, com temperaturas da ordem de dureza a quente do material da ferramenta;
3. Lascamentos dos gumes, com retiradas de partículas grandes de material da ferramenta, causadas por excessivas solicitações mecânicas e térmicas, característica do processo de fresamento de materiais endurecidos;

4. Vibração excessiva no conjunto máquina-ferramenta/ferramenta/peça, identificada pela forma diferenciada da textura da superfície usinada;
5. Cegamento dos gumes (arredondamento dos gumes).

3.1.5 Equipamento para Medição da Rugosidade

A rugosidade das superfícies fresadas e retificadas, ambas em desbaste e acabamento, foi medida através do rugosímetro PERTHOMETER-SP8, equipado com a sonda ótica focodyn . Em todas as medições utilizou-se o cut-off de $0,8 \mu\text{m}$ com filtro Gaussiano. Maiores informações técnicas deste equipamento encontram-se no anexo 8.4. A figura 3.4 mostra o equipamento para medição de rugosidade.



Figura 3.4 - Equipamento para medição da rugosidade.

Para a medição de materiais duros que causam desgaste nas pontas adiantadas do apalpador, é recomendado o uso de “apalpadores” ópticos [9]. Os sistemas ópticos sofrem pouca influência de vibrações provenientes do meio ambiente sobre a peça, ao contrário dos sistemas de apalpação mecânica. Outra vantagem é a capacidade de penetração do feixe ótico nas irregularidades do perfil, que é mais exata do que a das pontas dos estiletos de diamante, conforme mostra figura 3.5. A sonda ótica focodyn utilizada neste trabalho apresenta filtro digital tipo Gaussiano de fase corrigida, livre de distorções.

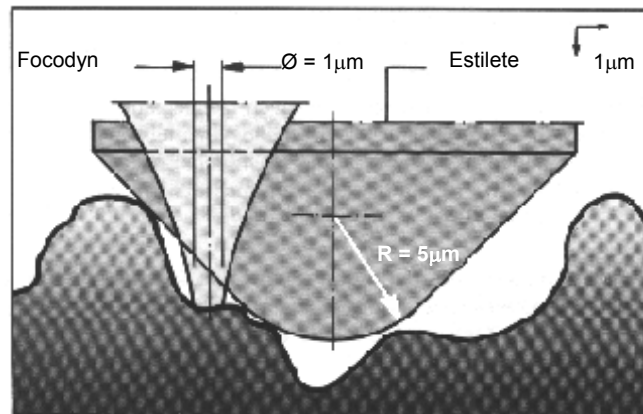


Figura 3.5 - Comparação entre as capacidades de penetração de uma sonda óptica com a mecânica [12].

Em virtude de as normas internacionais darem como referência o parâmetro vertical R_a para efeito de comparação, optou-se em fazer medições somente com os parâmetros mais conhecidos R_a e R_t .

Pode-se definir R_a como o desvio médio aritmético, isto é, média dos valores absolutos das ordenadas do perfil em relação à linha média, num determinado comprimento de amostragem. Matematicamente, tem-se a definição abaixo:

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (9)$$

A figura 3.6 mostra o parâmetro de rugosidade R_a .

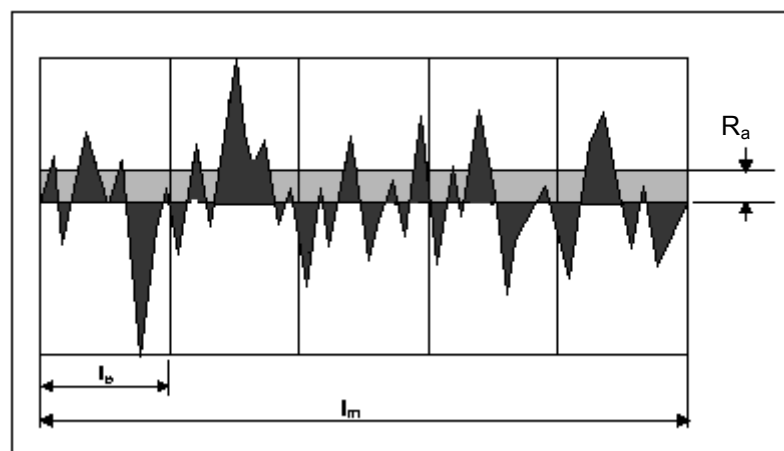


Figura 3.6 - Caracterização do parâmetro R_a [12].

A profundidade de rugosidade R_t é definida como sendo a distância vertical entre o ponto mais alto e mais baixo do perfil filtrado, dentro do comprimento amostral total l_m . [12, 4]. O parâmetro de rugosidade R_t está mostrado na figura 3.7.

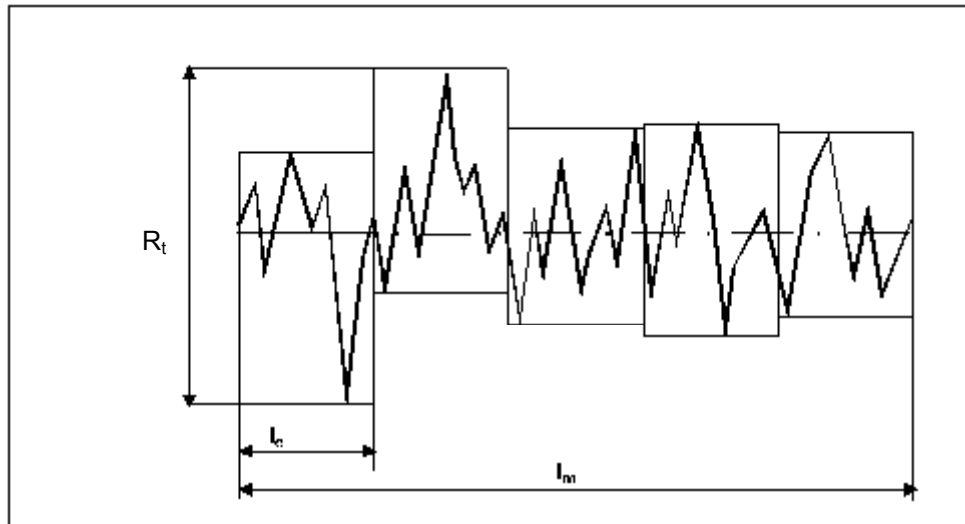


Figura 3.7 - Caracterização do parâmetro R_t [12].

O cut-off é à distância medida em milímetros de cada um dos 7 intervalos l_e que o rugosímetro mede. Após o processo de medição, é filtrado o primeiro e o último intervalo que poderiam influenciar no valor da medida. Neste trabalho, utilizou-se o valor do cut-off de 0,8, porque feitas algumas medidas preliminares, o R_a medido ficou na faixa de 0,2-2 μm .

As medições de rugosidade nos CP foram feitas na direção longitudinal (na mesma direção de avanço da fresa) e transversal (perpendicular à direção de avanço da fresa).

A tabela 3.1 mostra a metodologia empregada para obter os valores de R_a e R_t nos diversos CP. As medições nos CP retilíneos foram feitas de acordo com a figura 3.8.

No CP retilíneo fresado em desbaste fez-se 20 medições na direção longitudinal.

Nos CP curvilíneos fresados em acabamento montados em um corpo de matriz (estudo de caso), foram feitas 3 medições em 2 regiões de cada peça, uma mais longa (posição I) e outra mais curta (posição II), de acordo com a figura 5.1. No total foram feitas 12 medições na direção transversal.

No CP retilíneo retificado em desbaste foram feitas 12 medições na direção longitudinal e 12 na direção transversal.

No CP retilíneo retificado em acabamento nas regiões 1, 2, 3 e 4 foram feitas 12 medições na direção longitudinal e 12 na direção transversal. Nas regiões 5, 6, 7 e 8 foram feitas 12 medições na direção longitudinal e 8 medições na direção transversal, em função do espaço reduzido.

Tabela 3.1 - Sistematização para a medição da rugosidade R_a e R_t nos CP.

Processo	Corpo de prova	Região	Nº de medições por região	Nº de medições de R_a por direção		Nº de medições de R_t por direção	
				Long.	Transv.	Long.	Transv.
Fresamento	Retilíneo em desbaste	5, 6, 7 e 8	5	20	-	20	-
	Curvilíneo em Acabamento	-	3	-	12	-	12
Retificação	Retilíneo em Desbaste	1, 2, 3 e 4	3	12	12	12	12
	Retilíneo em acabamento	1, 2, 3 e 4	3	12	12	12	12
		5, 6, 7 e 8	3	12	-	12	-

A figura 3.8 mostra as regiões de medição de rugosidade do CP retilíneo.

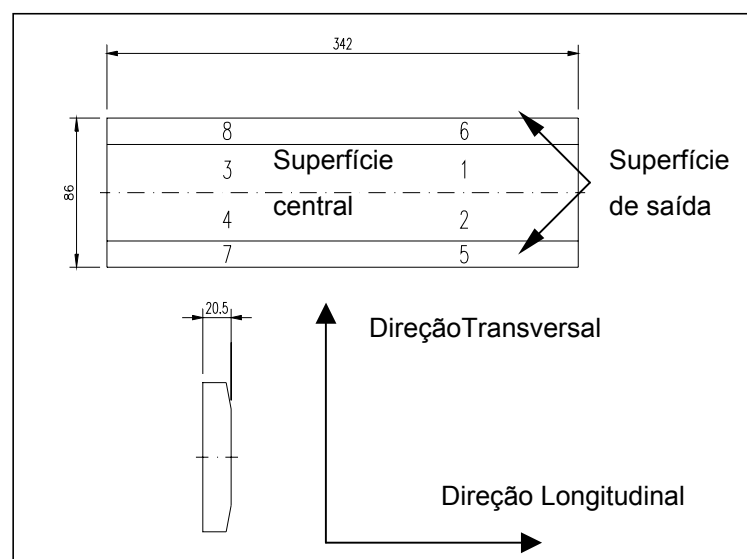


Figura 3.8 - Regiões de medição de rugosidade no CP retilíneo.

Os resultados das medições sistematizadas na tabela 3.1 encontram-se nas tabelas 4.3 e 4.4 (Capítulo 4) e tabela 5.4 (Capítulo 5). A partir das medições foram calculados a média aritmética \bar{x} , a amplitude total AT, o desvio padrão s e o coeficiente de variação CV.

A média aritmética \bar{x} é o quociente da divisão do somatório dos valores da variável pelo número deles.

Para qualificar os valores de uma dada variável, ressaltando a maior ou menor dispersão ou variabilidade entre esses valores e a sua medida de posição, a Estatística recorre às medidas de dispersão ou de variabilidade. Dentro destas medidas encontram-se a amplitude total AT, o desvio padrão s e o coeficiente de variação CV [5].

A amplitude total AT é a diferença entre o maior e o menor valor observado. Tem o inconveniente de só levar em conta os dois valores extremos da série, descuidando dos valores intermediários, servindo apenas como uma indicação aproximada da dispersão ou variabilidade [5].

O desvio padrão s leva em consideração a totalidade dos valores da variável em estudo, o que o faz um índice de variabilidade bastante estável, sendo expresso por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (10)$$

onde

\bar{x} : Média aritmética

x_i : Valores da variável

N: Número de valores

Pode-se caracterizar a dispersão ou variabilidade dos dados em termos relativos a seu valor médio, medida essa denominada coeficiente de variação CV, sendo definido por [5]:

$$CV(\%) = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (11)$$

3.1.6 Equipamento para Medição de Dureza

Empregou-se para medição de dureza um durômetro marca BRIRO, do fabricante GEORG REICHERTER / NECKAR tipo VA-1.

Foram feitas medidas de dureza nos CP entre 60 a 62 HRC, portanto, não aconselhável para medições utilizando-se o método Brinell. No método Brinell, emprega-se esferas de aço temperado e só é possível medir durezas até 500 HB (51 HRC), pois durezas maiores danificam a esfera [11].

Na medição da dureza recomendado por Rockwell, um penetrador é pressionado contra uma superfície com uma pré-carga e depois com uma carga final. O valor da dureza está relacionada com a diferença da penetração com a carga total, subtraída a penetração com a pré-carga.

O ensaio é feito na seqüência abaixo [70]:

1. Aproximar a superfície do corpo de prova do penetrador;
2. Submeter o corpo de prova a uma pré-carga;
3. Aplicar a carga maior até o ponteiro parar;
4. Retirar a carga maior e fazer a leitura do valor indicado no mostrador na escala apropriada.

A figura 3.9 esclarece melhor a seqüência descrita acima, empregando-se um penetrador cônico de diamante.

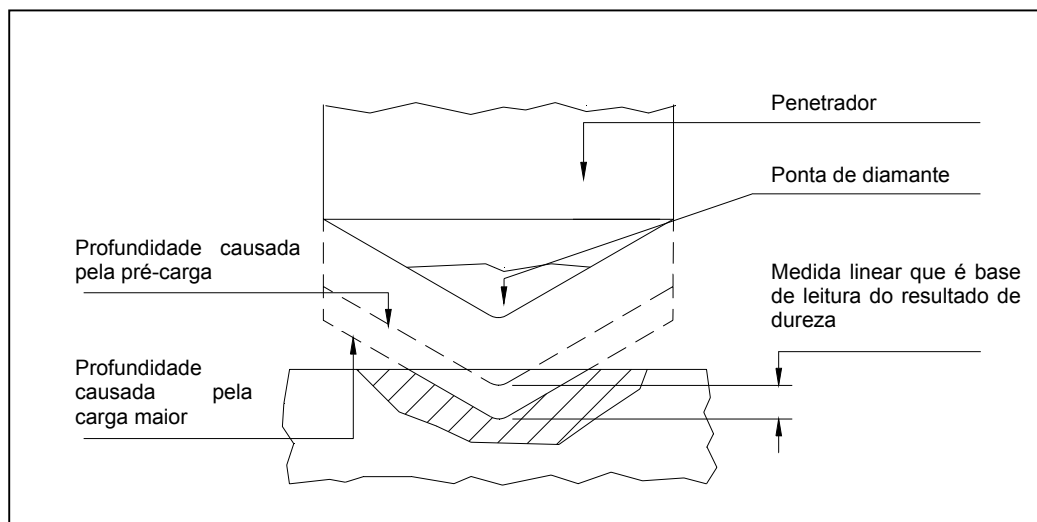


Figura 3.9 - Esquema para ensaio de dureza Rockwell [70].

A escala utilizada neste trabalho é a C (preta), carga maior de 150 kgf, penetrador de diamante de 120° e faixa de utilização de 20-70 HRC.

O número da dureza Rockwell deve ser seguido pelo símbolo HR, com um sufixo que indique a escala utilizada. Por exemplo, uma leitura de 62 HRC significa dureza de 62, HR indica que se trata de ensaio de dureza Rockwell medido na escala C.

3.1.7 Fluido de Corte

Na usinagem das peças endurecidas, trabalha-se sem fluido de corte, caracterizando um corte seco. O emprego de fluidos de corte com características lubrificantes e refrigerantes dificulta o corte de material. As razões são o resfriamento da peça que a torna mais dura na zona de corte de que na ausência de fluido de corte e, a aderência de cavacos nos canais da fresa e na peça devido aos efeitos de viscosidade do fluido de corte.

Em alguns casos, é recomendado o emprego de um jato de ar. Um bico injetor de ar, com pressão de 7 bar, foi montado com uma inclinação aproximada de 45° em relação à superfície da mesa da máquina-ferramenta e próximo à zona de trabalho.

3.2 Material dos Corpos de Prova

Para avaliação das ferramentas de fresamento de diferentes fabricantes, diâmetros e geometrias de corte, foram preparados corpos de prova de aço D6 na forma de barras chatas, com espessura de 18 mm e largura de 80 mm. O comprimento dos corpos de prova foi de 380 mm. A tabela 3.2 caracteriza o material dos corpos de prova.

Tabela 3.2 - Características do material de trabalho.

Material	Composição química	Propriedades mecânicas
Aço ferramenta para trabalho a frio AISI-SAE D6	C = 2,10% Cr = 11,50% W = 0,70% V = 0,20%	Dureza no estado recozido: 24,5 HRC Dureza no estado endurecido (temperado e revenido): 60-62 HRC

A figura 3.10 mostra, de forma esquemática, a fixação do corpo de prova no dispositivo de usinagem. O dispositivo de usinagem foi montado sobre uma mesa magnética na máquina-ferramenta (Centro de Usinagem HAAS VF-3).

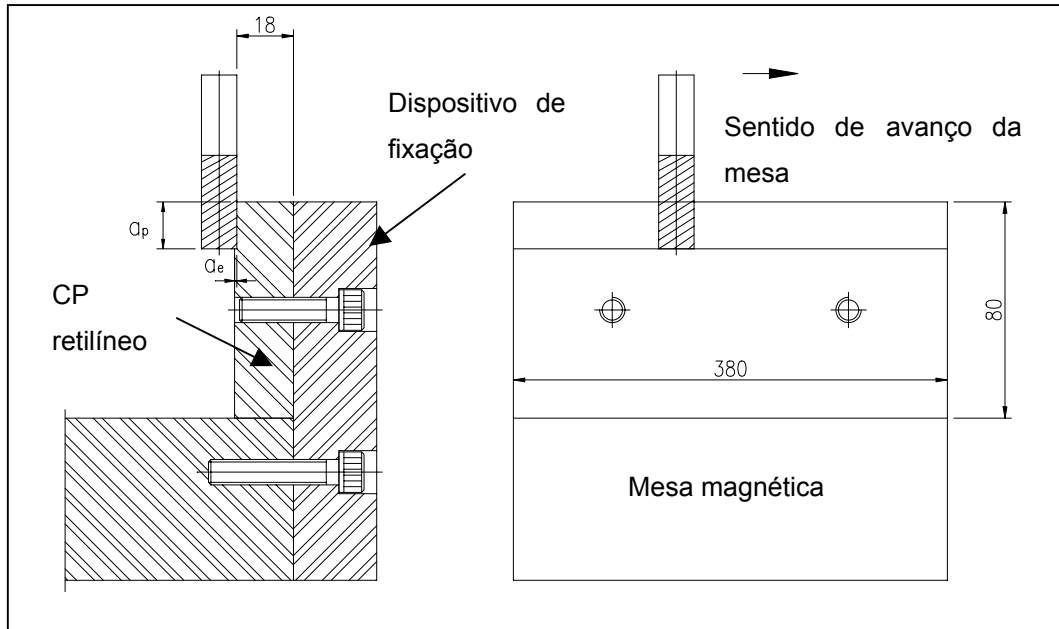


Figura 3.10 - Montagem do CP retilíneo à mesa da máquina-ferramenta.

3.3 Ferramentas

Utilizou-se neste trabalho fresas helicoidais, de topo reto, inteiriças e de metal-duro revestidas. A escolha de fresa de topo reto foi, principalmente, em função da geometria dos CP e do material a ser usinado. Segundo os fabricantes envolvidos neste trabalho, as fresas de topo reto apresentam uma maior disponibilidade em termos de diâmetros e geometrias de corte, um menor custo e custo de reafiação mais reduzido, quando comparado com fresas de topo de ponta semiesférica ou de ponta toroidal.

As fresas de topo são padronizadas nas dimensões pela norma DIN 6527L empregadas pelos fabricantes N^{os} 3, 6 e 8 e pela norma DIN 6527 empregada pelo fabricante N^o 9. A haste cilíndrica é padronizada pela norma DIN 6535HA empregada pelo fabricante N^o 8 e DIN 6535HB.

A tabela 3.3 apresenta a relação de ferramentas empregadas nos corpos de prova retilíneos. As designações para revestimentos XTR e MIRACLE foram dadas

pelos fabricantes de ferramentas, não se obtendo, até o momento, informações detalhadas sobre as características destes revestimentos.

Tabela 3.3 - Relação de ferramentas empregadas nos corpos de prova retilíneos.

Fabric. N°	Código	d ₁ (mm)	Revestimento	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)	z	λ (°)	γ _o (°)
1	40030800RT	8	XTR	63	20	3	37	-
2	2725080	8	FUTURA®	60	20	6	45	8
3	431051000	10	TiAIN	72	22	3	30	7
1	751510004LT	10	TiAIN	100	32	5	-	-
4	GW 367	10	TiAIN	72	22	6	-	-
5	VC-MD10	10	MIRACLE	70	22	6	45	-10
6	5532	12	TiAIN	83	26	4	30	-
7	12 MG FXS 1211	12	TiAIN	90	30	6	45	-
8	1350XT	12	X-TREME®	83	26	6	50	
9	R215.3C-12030-BC26H	12	TiAIN	83	26	12	30	-7 a -10

As ferramentas que constam da tabela 3.3 foram todas doadas pelos fabricantes. A variedade de geometrias e tipos de metal-duro das ferramentas provém da experiência que os fabricantes já possuíam no fresamento de aços com dureza de 55-65 HRC. Os ensaios com as ferramentas da tabela 3.3 foram realizados com objetivo principal de solucionar o problema do fresamento do aço D6, com 60-62 HRC, para a indústria de moldes e matrizes.

Somente o fabricante N° 1 qualificou o MD como classe K10-K30, todos os demais não forneceram as classes de metal-duro com que eram fabricados suas ferramentas. As ferramentas de metal-duro possuem granulometria denominada micro-grão (fabricantes N° 3, 5, e 7), submicro-grão (fabricantes N° 1, 8) e ultra-fina (fabricante N° 6)

3.3.1 Ensaio Metalográfico com as Ferramentas de Corte

Para obter maiores informações sobre os metais-duros empregados nas fresas, realizou-se um ensaio metalográfico apenas nas fresas, que tiveram um bom desempenho no desbaste do CP retilíneo.

Foram selecionadas 4 fresas. As amostras foram cortadas da haste da ferramenta com aproximadamente 4 mm de espessura. O corte foi realizado com um rebolo em forma de disco de carboneto de silício. Após o corte foi realizado um pré-acabamento em uma afiadora de ferramentaria com rebolo copo, também de carboneto de silício.

As amostras foram embutidas em baquelite para poder manusear na preparação. O polimento das amostras das ferramentas foi feito com lixas de 200 e 400 mesh, usando álcool como fluido de corte e uma pasta diamantada com granulometria de 5 μm .

As micrografias foram obtidas no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL - JSM 5800), no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS, com ampliação de 8000 vezes e largura de 16,5 μm , sendo empregada uma voltagem de aceleração de 20 kV. Os resultados e comentários constam do item 4.2 do capítulo 4.

3.4 Metodologia dos Ensaio

Na busca por fabricantes de ferramentas para o fresamento do aço D6 endurecido, houve dificuldade em conseguir ferramentas em um número suficientemente grande, que permitisse realizar ensaios sistemáticos, visto que os custos destas ferramentas são elevados.

As ferramentas disponibilizadas pelo IPT, utilizadas no trabalho de doutorado realizado por Gomes [71], durante o período em que ele esteve naquela instituição, foram perdidas no envio postal da Alemanha para o Brasil. Os fabricantes que se propuseram a mostrar a qualidade de suas ferramentas na usinagem do aço D6 temperado e revenido com dureza de 60 a 62 HRC, não permitiram que se alterasse as condições de corte estabelecidas segundo a experiência de cada um deles em suas ferramentas. Além disto, as ferramentas dos diversos fabricantes eram de diâmetros distintos, apresentavam número de gumes distintos e geometria variada, não permitindo a comparação direta de nenhum dos resultados. Mesmo assim, procurou-se estabelecer uma comparação, observando os resultados obtidos. Avaliou-se os resultados das ferramentas em termos de volume de cavaco removido, vida, taxa de usinagem e a qualidade da superfície usinada. Buscou-se a confrontação destes resultados na busca de uma solução para a usinagem de insertos curvilíneos montados à matriz.

Na 1ª fase, foram realizados ensaios no fresamento de corpos de prova retilíneos com fresas helicoidais, de topo reto, inteiriças e de metal-duro revestidas. Os ensaios propostos pelas empresas fabricantes de ferramentas consistiam em testar ferramentas no aço-ferramenta D6, temperado e revenido com dureza de 60-62 HRC, utilizado na fabricação de moldes e matrizes para indústria cerâmica de revestimento de alvenaria.

3.4.1 Ensaio de Desbaste no Corpo de Prova Retilíneo

O fresamento empregado na usinagem dos corpos de prova retilíneos foi o fresamento periférico concordante, porque ele apresenta várias vantagens [13, 47, 65], dentre as quais incluem-se menor desgaste, melhor qualidade da superfície, menor força e potência de avanço. Além disso, ele submete a ferramenta a esforços de compressão, o que o torna especialmente apropriado para ferramentas sinterizadas [18].

Os ensaios foram realizados com o movimento de avanço da ferramenta paralelo ao eixo X da máquina-ferramenta e com corte seco, com exceção do ensaio N° 17, onde se utilizou corte com jato de ar comprimido.

Os ensaios consistiam inicialmente em penetrar a ferramenta com as profundidades de corte axial a_p e radial a_e fora do CP e então fresar lateralmente a parede do CP, com sentido de avanço da mesa da esquerda para a direita de acordo com a figura 3.10. Normalmente, o avanço de mesa v_f era reduzido para 20% do avanço de trabalho, na entrada da ferramenta no CP, para evitar quebras da ferramenta. Após a penetração total da ferramenta no CP o avanço de mesa era restabelecido para 100% do avanço de trabalho. Feita a usinagem em toda a extensão do CP afastava-se a ferramenta e retornava-se com ela em vazio posicionando a ferramenta para um novo passe. No início de um novo passe, era dado um incremento da profundidade radial a_e . Repetia-se o procedimento descrito acima até o CP atingir uma espessura residual de aproximadamente 3 mm. Executado o primeiro degrau no CP posicionava-se a ferramenta com o mesmo valor de profundidade de corte axial a_p , abaixo deste e reiniciava-se o processo.

Foram ensaiadas 10 ferramentas de 9 fabricantes distintos, sendo que todas as ferramentas eram novas e recobertas com TiAlN e similares, com os parâmetros

de corte fornecidos pelos fabricantes das ferramentas. A tabela 3.4 apresenta os parâmetros de corte das ferramentas fornecidas pelos fabricantes.

Tabela 3.4 - Parâmetros de fresamento do CP retilíneo em desbaste.

Fab. N°	Ensaio N°	d ₁ (mm)	Revest.	z	λ (°)	γ _o (°)	v _c (m/min)	f _z (mm)	a _e (mm)	a _p (mm)
1	6	8	XTR	3	37	-	25	0,067	0,3	12
2	13	8	FUTURA®	6	45	8	40	0,02	0,5	15
3	1	10	TiAlN	3	30	7	22	0,05	0,2	15
1	18	10	TiAlN	5	-	-	60	0,027	0,2	10
4	16	10	TiAlN	6	45°	-	67	0,042	0,25	15
5	17	10	MIRACLE	6	45	-10	75	0,097	0,2	7
6	11	12	TiAlN	4	30	-	50	0,02	0,5	16
7	2	12	TiAlN	6	45	-	20	0,038	0,5	15
8	12	12	X-TREME®	6	50	-	20	0,038	0,5	15
9	7	12	TiAlN	12	30	-7 a -10	49	0,064	0,5	16

3.4.2 Ensaio de Acabamento no Corpo de Prova Retilíneo

O objetivo deste ensaio foi permitir comparar os parâmetros de rugosidade obtidos no corpo de prova através do processo de retificação de acabamento com tabelas de referência. Esta comparação é muito importante, haja visto que o fabricante de matrizes em questão, também produz insertos montados à matriz através do processo de retificação.

O acabamento por retificação foi feito em uma retificadora plana Sul-Mecânica RAPH 840, sendo utilizado rebolo de óxido de alumínio 38A80KVS - NORTON, um rebolo com abrasivo fino, mole e com ligante vitrificado. As granulometrias dos abrasivos dos rebolos dividem-se em faixas: 6-24 (grossa), 30-60 (média), fina (70-180) e muito fina (220-1200).

Os parâmetros de retificação utilizados para o corpo de prova retilíneo estão na tabela 3.5. Avaliou-se a incerteza de medição dos resultados da ordem de 10%, devido a limitações disponíveis na medição dos parâmetros e por estes variarem de acordo com a solicitação durante o processo. Mas como estes resultados são os

valores convencionalmente obtidos naquele fabricante de matrizes, julgou-se estes aceitáveis.

Tabela 3.5 - Parâmetros de retificação do CP retilíneo em acabamento.

CP	v_s (m/s)	v_w (m/s)	a_{er} (mm)	a_{pr} (mm)
Retilíneo	27	0,32	0,01	19

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na primeira fase dos ensaios de ferramentas, no fresamento de desbaste dos corpos de prova retilíneos, em aço plano de AISI-SAE D6, com dureza de 60-62 HRC.

É feita uma análise da qualidade da superfície em função de R_a e R_t para o fresamento periférico e para a retificação plana. No acabamento, são relatados os resultados de R_a e R_t obtidos nos CP retilíneos de aço D6 na retificação plana. Além disto, são mostrados os resultados do ensaio metalográfico das ferramentas empregadas no fresamento de desbaste.

4.1 Ensaio no Corpo de Prova Retilíneo

Os ensaios nos CP retilíneos foram feitos em desbaste e em acabamento. Os ensaios em desbaste foram feitos por fresamento periférico no sentido concordante e também por retificação plana tangencial. Os ensaios em acabamento foram somente realizados por retificação plana tangencial.

4.1.1 Ensaio de Desbaste no Corpo de Prova Retilíneo

Para análise dos resultados dos ensaios de fresamento, realizados com o apoio dos fornecedores das ferramentas de corte, foram estabelecidos critérios e metas que devessem ser avaliados. Como primeiro critério de avaliação, tem-se a exeqüibilidade do fresamento do material endurecido. Este critério somente foi atingido com as ferramentas que foram ensaiadas e posteriormente selecionadas. Como segundo critério, foi estabelecido o volume de material removido ao longo da vida da ferramenta. Este critério é associado à velocidade de avanço e a velocidade de corte, pois está associado à produtividade. Além disto está associado ao critério de fim de vida, pois é conjecturado uma reafiação das ferramentas.

No ensaio N° 6, realizado com fresa de 8 mm de diâmetro, uma velocidade de corte de 25 m/min, um avanço de 0,067 mm por dente e uma largura de corte de 12 mm, foi atingido um volume de 52 cm³, em 73 minutos, apresentando uma taxa de remoção $Q = 720 \text{ mm}^3/\text{min}$. Os critérios para fim de vida estabelecidos pelo

fabricante Nº 1 foram cegamento dos gumes e vibrações intensas do conjunto ferramenta/peça.

Na figura 4.1 a seguir observa-se o gume principal da fresa do fabricante Nº 1, a esquerda apresenta um gume cego (arredondamento do gume) e a direita o gume que não sofreu desgaste nenhum e está afiado.

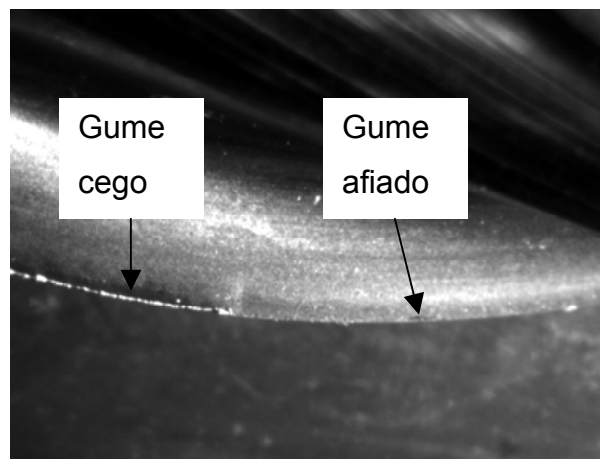


Figura 4.1 - Cegamento do gume da fresa de topo.

No ensaio Nº 13, realizado com fresa de 8 mm de diâmetro, uma velocidade de corte de 40 m/min, um avanço de 0,02 mm por dente e uma largura de corte de 15 mm, foi atingido um volume de 235 cm³, em 168 minutos, apresentando uma taxa de remoção $Q = 1425 \text{ mm}^3/\text{min}$. Os critérios para fim de vida estabelecidos pelo fabricante Nº 2 foram cavaco moído, queima da superfície da peça e cor rubro da ferramenta próximo ao gume secundário.

Na figura 4.2, é apresentada a evolução dos cavacos ao longo do ensaio Nº 13. A forma de cavaco na figura 4.2 (a) é de uma fita helicoidal curta com cor brilhante. Na figura 4.2 (b) o cavaco mantém a forma, entretanto, a cor começa a ficar mais escura (nuance de marrom com azul), predominando o marrom. Finalmente na figura 4.2 (c) tem-se um cavaco com aspecto moído, semelhante a cavaco em forma de vírgula, com uma cor bastante escura (nuance de azul com marrom), contudo, predominando o azul.

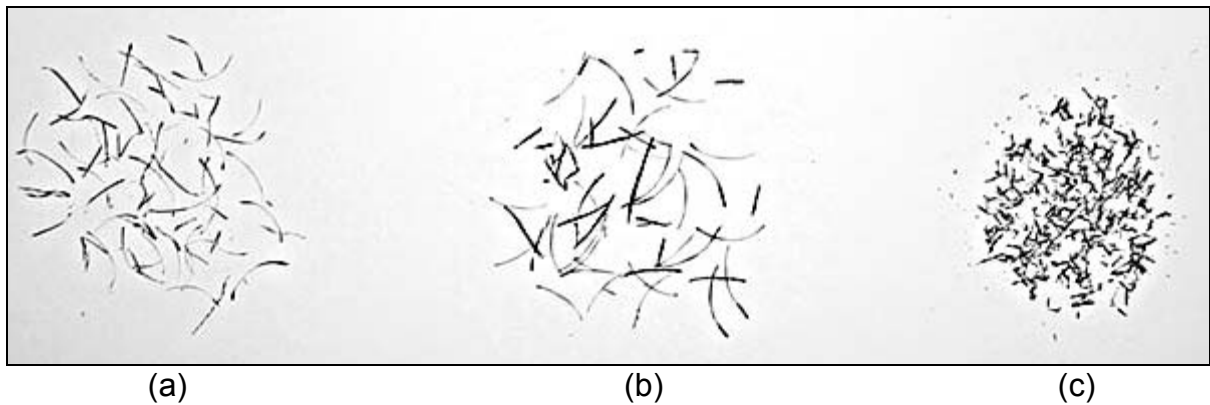


Figura 4.2 - Formas de cavaco: a - início do ensaio, b - meio do ensaio, c - fim de ensaio.

No ensaio N° 1, realizado com fresa de 10 mm de diâmetro, uma velocidade de corte de 22 m/min, um avanço de 0,05 mm por dente e uma largura de corte de 15 mm, foi atingido um volume de 158 cm³, em 503 minutos, apresentando uma taxa de remoção $Q = 315 \text{ mm}^3/\text{min}$. O fim de vida estabelecido pelo fabricante N° 3 foi de lascamentos no gume.

Na figura 4.3, observa-se lascamentos do gume principal da ferramenta do fabricante N° 3, que se propagaram através da face. Avaliou-se que estes lascamentos poderiam ser causados por: enfraquecimento da cunha da ferramenta (ângulo de saída ortogonal γ_o muito grande), inclusões duras na peça (carbonetos de Cromo, Tungstênio e Vanádio) e solicitações térmicas excessivas.

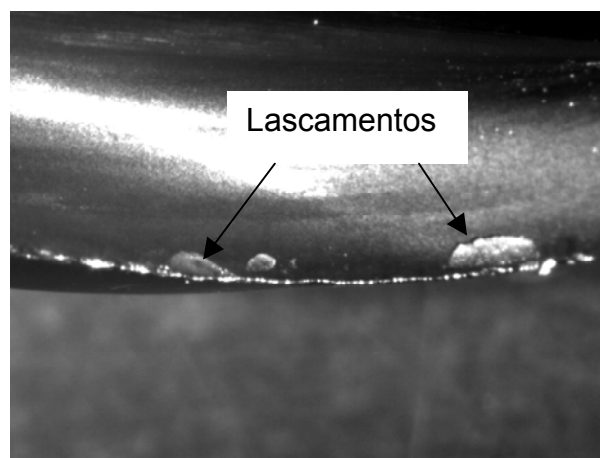


Figura 4.3 - Lascamentos do gume principal.

No ensaio N° 18, realizado com fresa de 10 mm de diâmetro, uma velocidade de corte de 60 m/min, um avanço de 0,027 mm por dente e uma largura de corte de 10 mm, foi atingido um volume de 30 cm³, em 58 minutos, apresentando uma taxa de remoção $Q = 516 \text{ mm}^3/\text{min}$. O fim de vida estabelecido pelo fabricante N° 1 foi o superaquecimento da ferramenta. Estimou-se que este superaquecimento da ferramenta poderia ser causado pelas elevadas condições de corte para este material. Como consequência há adesão de material da peça e comprometimento do revestimento da ferramenta.

No início do ensaio N° 16, houve vibrações numa das extremidades do corpo de prova, com redução significativa do corte nesta área do corpo de prova. Avaliou-se esta redução de corte como a deficiência de penetração do gume da ferramenta na peça. Estas vibrações, conforme se constatou após o término do ensaio, foram ocasionadas pela fixação deficiente do CP. Este ensaio, realizado com fresa de 10 mm de diâmetro, uma velocidade de corte de 67 m/min, um avanço de 0,042 mm por dente e uma largura de corte de 15 mm, foi atingido um volume de 161 cm³, em 81 minutos, apresentando uma taxa de remoção $Q = 2003 \text{ mm}^3/\text{min}$. Os critérios para fim de vida estabelecidos pelo fabricante N° 4 foram cavaco com aspecto moído, semelhante a cavaco em forma de vírgula, lascamentos no gume principal e cor rubro da ferramenta próximo ao gume secundário. Nestas condições de corte elevadas a fresa apresentou excessivas solicitações térmicas, com consequente empastamento de material da peça no canal da fresa.

No ensaio N° 17, o corte foi interrompido com 60 minutos de fresamento devido a uma trinca no CP, levando à separação do CP, ocasionando lascamento profundo do gume principal da ferramenta (quebra do gume), determinando o critério para fim de vida pelo fabricante N° 5. No momento da interrupção, a fresa estava cortando muito bem, com cavaco azulado de volume normal, com profundidade axial e radial respectivamente de 10 e 0,2 mm.

A figura 4.4, ilustra a forma e a cor do cavaco no momento da interrupção do ensaio do fabricante N° 5. A forma de cavaco é de uma fita helicoidal curta e a cor predominante do cavaco é azul escuro, entretanto, com uma nuance de roxo. Avaliou-se que a cor do cavaco esteja diretamente relacionada com as condições de corte seleccionadas para o ensaio.



Figura 4.4 - Cavaco azulado com forma de fita helicoidal curta.

Após a falha da ferramenta no 1º CP no ensaio N° 17, foi feita uma recuperação da ferramenta. O modo encontrado para recuperar a ferramenta foi retirar material no comprimento da ferramenta até que se eliminasse totalmente o gume quebrado, para tanto eliminou-se totalmente os gumes secundários originais e refez-se estes de forma manual. No 2º CP, utilizou-se $a_p = 7$ mm e $a_e = 0,2$ mm e foi estabelecido como critério para fim de vida, desgaste excessivo de 2 gumes, devido ao elevado batimento da ferramenta (120 μ m). Neste ensaio realizado com fresa de 10 mm de diâmetro, uma velocidade de corte de 75 m/min, um avanço de 0,097 mm por dente, foi atingido um volume de 413 cm³, em 183 minutos, apresentando uma taxa de remoção $Q = 1960$ mm³/min. Este ensaio foi o único realizado com jato de ar, pois com parâmetros de corte limítrofes, especialmente o avanço por gume, e a geometria da ferramenta era necessário a remoção do cavaco da zona de corte, com objetivo de evitar empastamento de cavacos nos canais da fresa.

No ensaio N° 11, realizado com fresa de 12 mm de diâmetro, uma velocidade de corte de 50 m/min, um avanço de 0,02 mm por dente e uma largura de corte de 16 mm, foi atingido um volume de 56 cm³, em 65 minutos, apresentando uma taxa de remoção $Q = 848$ mm³/min. Os critérios para fim de vida estabelecidos pelo fabricante N° 6 foram cavaco com aspecto moído, semelhante a cavaco em forma de vírgula, queima da superfície da peça e flexão excessiva da ferramenta não alcançando, desta forma, a profundidade radial a_e programada. Constatou-se a deflexão excessiva da ferramenta devido a ausência de corte da ferramenta na parte inferior do passe ou seja, a ferramenta cortava aproximadamente da metade para cima em uma profundidade de corte axial de 16 mm.

No ensaio N° 2, realizado com fresa de 12 mm de diâmetro, uma velocidade de corte de 20 m/min, um avanço de 0,038 mm por dente e uma largura de corte de 15 mm, foi atingido um volume de 86 cm³, em 96 minutos, apresentando uma taxa de remoção $Q = 900 \text{ mm}^3/\text{min}$. Após o ensaio com a ferramenta nova, reafiou-se a ferramenta com as características do fabricante N° 6 e o resultado do ensaio após a 1ª reafiação foi surpreendente, alcançando uma vida de 294 minutos e volume de material usinado de 262 cm³. Os critérios para fim de vida estabelecidos pelo fabricante N° 7 foram queima da superfície da peça e a qualidade da superfície usinada reprovável visualmente.

Na figura 4.5, pode-se observar claramente a queima da superfície da peça utilizada no ensaio do fabricante N° 7, onde na parte superior predomina a cor azul escuro e na inferior a marrom. Nota-se também riscos paralelos a direção de avanço estimando-se que a ferramenta apresentou lascamentos no gume principal no transcorrer do ensaio e, que deram origem a uma qualidade indesejável da superfície usinada.



Figura 4.5 - Aspecto da qualidade da superfície usinada.

No ensaio N° 12, realizado com fresa de 12 mm de diâmetro, uma velocidade de corte de 20 m/min, um avanço de 0,038 mm por dente e uma largura de corte de 15 mm, foi atingido um volume de 293 cm³, em 326 minutos, apresentando uma taxa de remoção $Q = 900 \text{ mm}^3/\text{min}$. Os critérios para fim de vida estabelecidos pelo fabricante N° 8 foram semelhantes aos do fabricante N° 6.

No ensaio N° 7, realizado com fresa de 12 mm de diâmetro, uma velocidade de corte de 49 m/min, um avanço de 0,064 mm por dente e uma largura de corte de

16 mm, foi atingido um volume de 161 cm³, em 20 minutos, apresentando uma taxa de remoção $Q = 8000 \text{ mm}^3/\text{min}$. Os critérios para fim de vida estabelecidos pelo fabricante N° 9 foram superaquecimento da ferramenta, cor rubro próximo ao gume secundário. Nestas condições de corte elevadas, especialmente o avanço, e o excessivo número de gumes da ferramenta com pequeno volume para bolsão dos cavacos verificou-se também o empastamento de cavacos nos canais da fresa.

Os mesmos critérios para fim de vida da ferramenta não foram possíveis de aplicar. Por exemplo, quando o cavaco apresentava-se com aspecto moído, havia também queima da superfície da peça, ou seja, os critérios de fim de vida não se apresentavam isoladamente, mas em conjunto.

A tabela 4.1 mostra os resultados dos ensaios, realizados com fresas sólidas de metal-duro revestido, em CP retilíneos na condição de desbaste.

Tabela 4.1 - Resultados de fresamento do CP retilíneo em desbaste.

Fab. N°	Ensaio N°	d_1 (mm)	z	λ (°)	γ_o (°)	v_c (m/min)	f_z (mm)	a_e (mm)	a_p (mm)	Volume (cm ³)	T (min)	Q (mm ³ /min)
1	6	8	3	37	-	25	0,067	0,3	12	52	73	720
2	13	8	6	45	8	40	0,02	0,5	15	235	168	1425
3	1	10	3	30	7	22	0,05	0,2	15	158	503	315
1	18	10	5	-	-	60	0,027	0,2	10	30	58	516
4	16	10	6	45	-	67	0,042	0,25	15	161	81	2003
5	17	10	6	45	-10	75	0,097	0,2	7	413	183	1960
6	11	12	4	30	-	50	0,02	0,5	16	56	65	848
7	2	12	6	45	-	20	0,038	0,5	15	86	96	900
8	12	12	6	50	-	20	0,038	0,5	15	293	326	900
9	7	12	12	30	-7 a -10	49	0,064	0,5	16	161	20	8000

Os critérios adotados para análise de desempenho das ferramentas foram na ordem: volume usinado, vida da ferramenta T e taxa da usinagem Q. A classificação das ferramentas dos fabricantes que se destacaram quanto aos critérios mencionados, será feito na ordem decrescente dos resultados.

Considerando a primeira fase dos ensaios que foram propostos pelas empresas fabricantes de ferramentas, para o desbaste do CP retilíneo de aço D6 pode-se afirmar que:

1. As três ferramentas que se destacaram quanto ao critério de volume usinado foram dos fabricantes N^{os}. 5, 8 e 2, sendo que estas possuíam 6 gumes e ângulos de hélice de 45 e 50°. Estas ferramentas removeram entre 235 e 413 cm³ de material, enquanto as demais removeram entre 30 e 161 cm³;
2. Os melhores desempenhos das ferramentas, considerando a vida, foram dos fabricantes N^{os}. 3, 8 e 5. As ferramentas dos fabricantes N^{os}. 8 e 5 apresentavam 6 gumes e ângulos de hélice de 45 e 50°, sendo que estas alcançaram entre 183 e 326 minutos. A exceção ficou por conta do fabricante N^o3, com ferramenta de 3 gumes e ângulo de hélice de 30°, na qual a baixa velocidade de corte empregada (22 m/min) resultou numa vida bastante elevada (503 minutos). Todas as demais alcançaram vida entre 20 e 168 minutos;
3. As ferramentas que se destacaram quanto ao critério da taxa de usinagem foram dos fabricantes N^{os}.9, 4 e 5. As fresas dos fabricantes N^{os} 4 e 5 apresentavam 6 gumes e ângulos de hélice de 45°. Estas ferramentas apresentaram uma taxa de usinagem variando entre 1960 e 2003 mm³/min, ao passo que as demais apresentaram taxa entre 315 e 1425 mm³/min. A ferramenta do fabricante N^o 9, com 12 gumes e ângulo de hélice de 30°, obteve a melhor classificação neste critério ($Q = 8000 \text{ mm}^3/\text{min}$) devido a uma boa sobreposição dos gumes. Como deficiência esta ferramenta apresentou um pequeno volume para bolsão dos cavacos o que causava acúmulo e empastamento;
4. As velocidades de corte das ferramentas que se destacaram nos três critérios variam de 20 a 75 m/min, o que indica que se deve aplicar baixas velocidades de corte no desbaste do aço D6, com dureza de 60-62 HRC. A ampla faixa de velocidades de corte, deve-se a utilização nos ensaios de ferramentas de diferentes fabricantes, com diâmetros e números de gumes distintos e geometria variada;
5. A ferramenta do fabricante N^o 5, apresentou o melhor desempenho global dentre as ferramentas ensaiadas quanto aos critérios volume usinado, vida e taxa da usinagem. Esta ferramenta possuía 6 gumes, ângulo de hélice de 45° e ângulo de saída ortogonal de -10° e apresentava os seguintes parâmetros de corte:

velocidade de corte de 75 m/min, avanço por gume de 0,097 mm, profundidade de corte radial de 0,2 mm e profundidade de corte axial de 0,7 mm.

Comparando o resultado do ensaio da ferramenta do fabricante N° 5 com Gomes [71] tem-se a tabela 4.2. Considerando novamente o critério volume fresado, Gomes [71] obteve quase 4 vezes mais volume de cavaco removido que o ensaio do fabricante N° 5. Entretanto, deve-se levar em conta a menor dureza do material usinado naquele trabalho, o maior diâmetro da ferramenta e o menor avanço por gume empregado. As mesmas recomendações de Gomes [71] são válidas para desbaste do aço D6: ferramentas com micro-grãos, revestidas, múltiplos gumes e com ângulos de hélice que possibilitem uma maior sobreposição do gume.

Tabela 4.2 - Comparação de desempenho na usinagem do aço AISI-SAE D6 e do aço DIN 1.2083.

	Trabalho atual	Gomes [71]
Material a ser fresado	Aço ferramenta para trabalho a frio AISI-SAE D6 com dureza de 60 HRC	Aço inoxidável martensítico DIN 1.2083 com dureza de 52 HRC
d_1 (mm)	10	16
z	6	6
λ (°)	45	45
γ_0 (°)	-10	-10
Revestimento	MIRACLE	TiAlCN
v_c (m/min)	75	80
v_f (mm/min)	1400	718
f_z (mm)	0,097	0,075
a_e (mm)	0,2	1,5
a_p (mm)	8	8
Volume (cm ³)	413	1596
T (min)	183	186

A medição dos parâmetros de rugosidade possibilita quantificar as características geométricas de uma superfície [12]. No ensaio N° 13 (fabricante

Nº 2), mediu-se os parâmetros R_a e R_t , na direção longitudinal, em um CP fresado em desbaste empregando 20 medições. Os parâmetros de R_a e R_t , também foram medidos nas direções longitudinal e transversal, em um CP retificado em desbaste utilizando 12 medições. Os resultados constam da tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Rugosidades dos CP retilíneos fresados e retificados em desbaste.

Processo de fabricação	Direção de medição	Parâmetro de rugosidade R_a (μm)				Parâmetro de rugosidade R_t (μm)			
		\bar{x}	AT	s	CV (%)	\bar{x}	AT	s	CV (%)
Fresamento	Longitudinal	0,92	0,85	0,27	29,35	12,76	14,69	4,13	32,37
	Transversal	-		-	-	-		-	-
Retificação	Longitudinal	1,78	0,79	0,24	13,48	20,28	11,05	3,19	15,73
	Transversal	1,99	0,78	0,26	13,06	17,59	3,29	1,05	5,97

Analisando os resultados da tabela 4.3 sob ponto de vista estatístico, pode-se afirmar que o valor que tem o maior grau de dispersão encontra-se no fresamento medido na direção longitudinal onde R_t obteve a média aritmética \bar{x} de 12,76 μm alcançando um coeficiente de variação CV de 32,37%. Em contrapartida o menor grau de dispersão encontra-se na retificação medida na direção transversal onde R_t obteve a média aritmética de 17,59 μm alcançando um coeficiente de variação CV de 5,97%. Todos os demais valores alcançaram coeficientes de variação entre 13,06% e 29,35%.

Para o fresamento de desbaste, Ferreira [10] recomenda que o parâmetro R_a obtido economicamente esteja compreendido entre 5 - 20 μm . Comparando este intervalo com o valor da média aritmética obtida na tabela 4.3 ($R_a = 0,92 \mu\text{m}$) pode-se afirmar que os corpos de prova possuem uma superfície altamente qualificada.

Na retificação plana de desbaste, os valores de R_a variam entre 0,63 - 2,5 μm de acordo com Ferreira [10]. Fazendo nova comparação com os valores das médias aritméticas da tabela 4.3, pode-se afirmar que os corpos de prova possuem um bom acabamento da superfície usinada.

4.1.2 Ensaio de Acabamento no Corpo de Prova Retilíneo

Para ter um parâmetro comparativo da qualidade da superfície usinada foram preparadas superfícies de corpos de prova por retificação, em regime de acabamento. As medições foram feitas conforme a sistematização, tabela 3.1 e nas regiões apresentadas na figura 3.8.

Na tabela 4.4, estão os resultados de R_a e R_t obtidos por retificação de acabamento. As regiões 1, 2, 3 e 4 referem-se à rugosidade medida na parte central do CP retilíneo, enquanto as regiões 5, 6, 7 e 8 referem-se à rugosidade medida nas regiões laterais do corpo de prova.

Tabela 4.4 - Rugosidades dos CP retilíneos retificados em acabamento.

Regiões	Direção de medição	Parâmetro de rugosidade R_a (μm)				Parâmetro de rugosidade R_t (μm)			
		\bar{x}	AT	s	CV (%)	\bar{x}	AT	s	CV (%)
1, 2, 3 e 4	Longitudinal	0,29	0,19	0,06	20,68	4,34	6,16	1,55	35,71
	Transversal	0,32	0,08	0,02	6,25	5,21	6,84	1,83	35,12
5, 6, 7 e 8	Longitudinal	0,78	0,45	0,14	17,95	10,24	6,60	2,41	23,53
	Transversal	0,64	0,12	0,05	7,81	6,33	1,05	0,42	6,63

Considerando os resultados da tabela 4.4 sob ponto de vista estatístico, pode-se afirmar que os valores que tem os maiores graus de dispersão encontram-se nas regiões 1, 2, 3 e 4 medidos nas direções longitudinal e transversal onde alcançaram coeficientes de variação CV de 35,71% e 35,12%. Em contrapartida os menores graus de dispersão encontram-se nas regiões 1, 2, 3 e 4 medida na direção transversal onde alcançou um coeficiente de variação CV de 6,25% e nas regiões 5, 6, 7 e 8 medida na direção transversal onde alcançou um coeficiente de variação CV de 6,63%. Todos os demais valores alcançaram coeficientes de variação entre 7,81% e 23,53%.

Analisando os valores da media aritmética de R_a da tabela 4.4 constata-se que estão fora da faixa recomendada por Ferreira [10] que é de 0,08 - 0,16 μm . Avaliou-se que os CP devem ter um acabamento melhorado, quer seja pela modificação dos parâmetros de corte ou pela substituição da ferramenta de corte (rebolo).

4.2 Análise Metalográfica das Ferramentas de Corte

Para ampliar o critério de decisão sobre quais ferramentas adotar na usinagem das matrizes, procedeu-se a análise metalográfica das ferramentas de metal-duro que mostraram um bom desempenho durante a usinagem dos corpos de prova de aço D6 endurecido. A figura 4.6 mostra as micrografias das amostras dos fabricantes N^{os} 5, 7, 3 e 8 respectivamente.

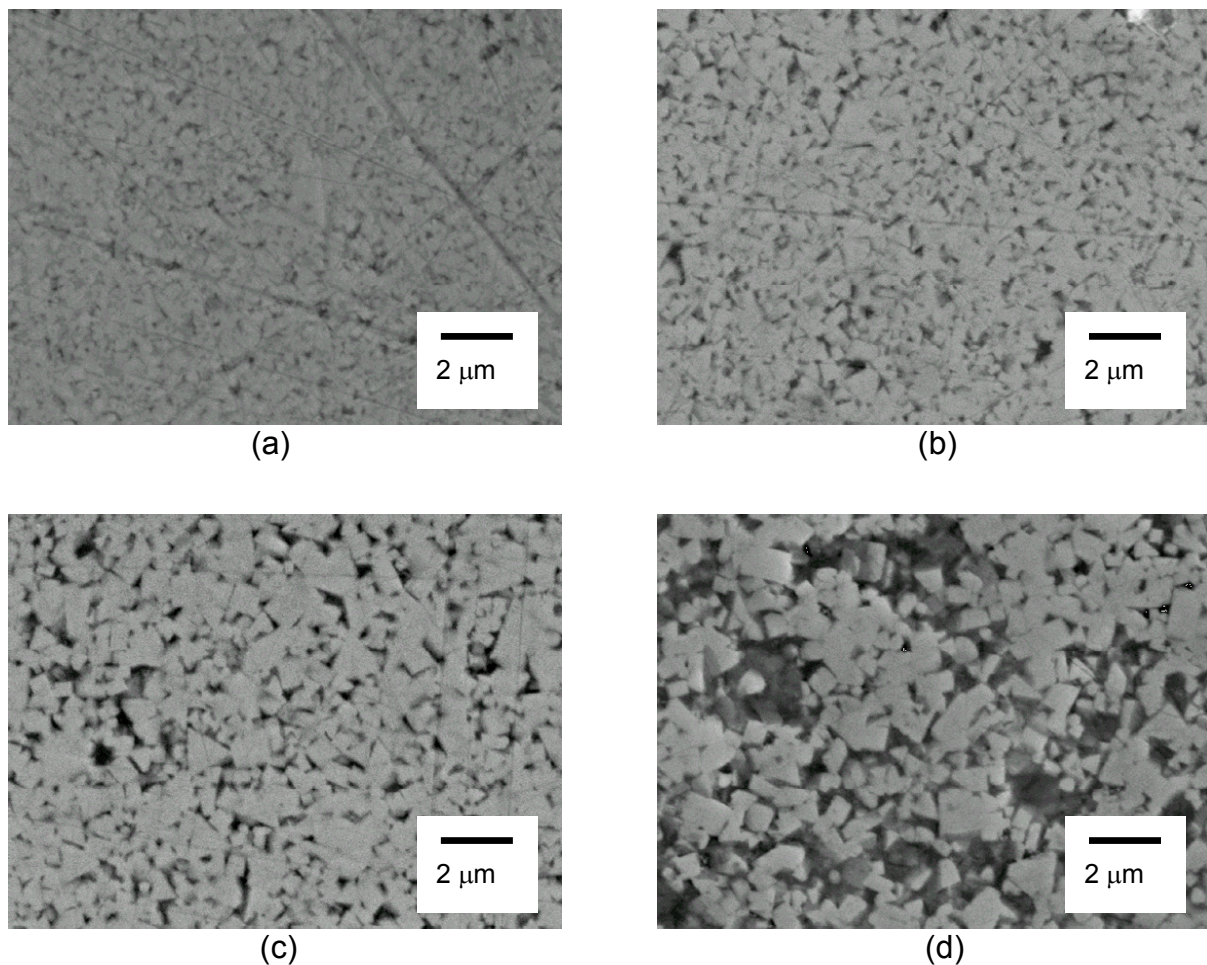


Figura 4.6 - Amostras de fresa analisadas: a - fabricante N^o 5, b - fabricante N^o 7, c - fabricante N^o 3, d - fabricante N^o 8 (aumento de 8000x).

As micrografias (a) e (b) da figura 4.6, obtidas no MEV, sempre com a mesma ampliação de 8000 vezes, mostram um tamanho de grão menor que as amostras das ferramentas (c) e (d). O tamanho de grão das amostras (a) e (b) varia de 0,5 a 0,8 μm, o que caracteriza um nano-grão. A percentagem de carbonetos de

tungstênio é elevada e de cobalto baixa. Estimou-se a pertinência ao grupo K03 (92% WC, 4% TiC/Tac e 4% Co). A amostra com maior dureza é a da micrografia (a). Gomes [71] também constatou para o aço inoxidável martensítico com dureza de 52 HRC uma melhor combinação de dureza e tenacidade para ferramentas de metal-duro com micro-grãos da classe K03. A ferramenta da micrografia (a) obteve o melhor desempenho global dentre as ferramentas ensaiadas no fresamento dos corpos de prova retilíneos, o que é correlacionado com o pequeno tamanho de grão.

As micrografias (c) e (d) da figura 4.6, apresentam um tamanho de grão maior que as micrografias (a) e (b) com um maior teor de cobalto. A amostra (c) apresenta uma boa distribuição dos grãos.

5. ESTUDO DE CASO

Para comprovar a eficiência das ferramentas que tiveram o melhor desempenho nos ensaios realizados nos corpos de prova retilíneos, neste capítulo será abordado o estudo de caso que abrange a usinagem de insertos curvilíneos de aço AISI-SAE D6, montados em um corpo de matriz. Este estudo de caso é um problema típico da indústria de moldes e matrizes para compactação de pós cerâmicos de revestimento de alvenaria.

Os parâmetros de corte empregados foram baseados nos ensaios obtidos no corpo de prova retilíneo. Como resultados do estudo de caso, tem-se os tempos de usinagem e a qualificação do acabamento da superfície usinada através dos parâmetros R_a e R_t .

5.1 Insertos Curvilíneos de D6 Montado à Matriz

As matrizes de compactação de pós cerâmicos, com contornos curvilíneos (sinuosos) eram fabricadas em aço endurecido com uma dureza entre 45 a 50 HRC. A exigência de fornecimento de matrizes com insertos curvilíneos, com dureza na faixa de 62 HRC, que objetiva um aumento da vida da matriz, é um desafio para o fabricante de matrizes. Para os ensaios, 4 peças de aço D6 endurecido com dureza de 62 HRC foram montados em um corpo de matriz de compactação, por meio de 4 parafusos por peça, como ilustrado na figura 5.1. Estas peças se compõem de duas mais longas, posição I na figura 5.1, e duas mais curtas (posição II).

A usinagem desta matriz envolve o fresamento periférico de todo o contorno da matriz, compreendendo o fresamento sinuoso longitudinal dos 4 insertos e a usinagem dos cantos internos.

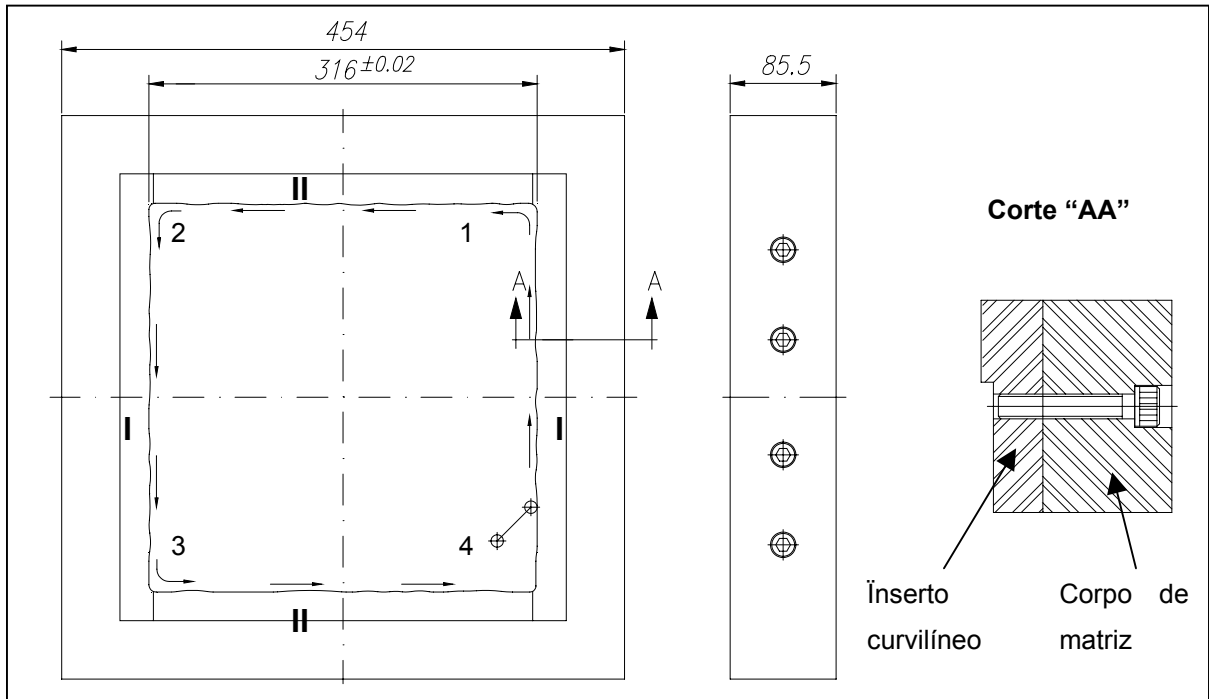


Figura 5.1 - Montagem dos insertos curvilíneos em um corpo de matriz.

Inicialmente, achou-se que grande parte das informações obtidas, na primeira fase dos ensaios realizados com empresas fabricantes de ferramentas, em corpos de prova retilíneos, fossem aproveitados para a usinagem dos insertos curvilíneos montados junto à matriz.

Feitos alguns testes preliminares constatou-se uma série de dificuldades. Nos cantos designados, pelos números 1, 2, 3 e 4 na figura 5.1, os desencontros dos insertos montados provocavam um impacto na ferramenta, devido a excessos de sobrematerial da ordem de 0,2 a 0,5 mm (figura 5.2).

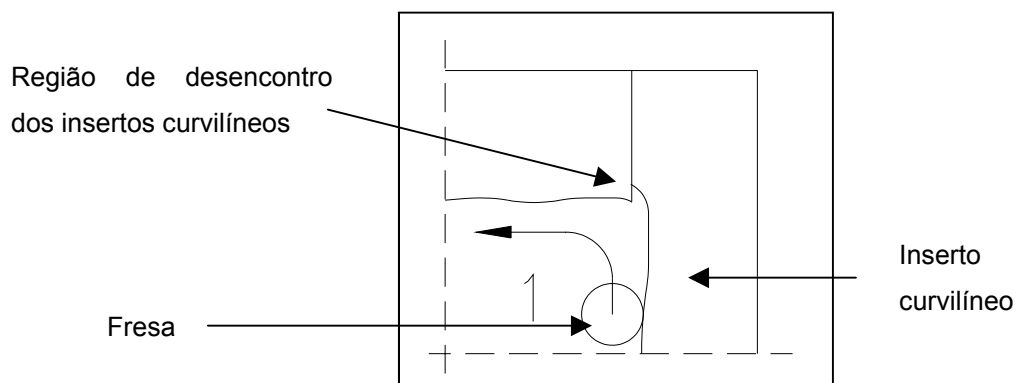


Figura 5.2 - Detalhe da montagem desencontrada dos insertos curvilíneos junto à matriz.

Após um determinado número de ciclos de compactação, ocorre desgaste normal nos insertos curvilíneos. Constatado o fim de vida, os insertos normalmente retornam para o fabricante de matrizes para serem recuperados, onde o desgaste é compensado por calços de chapa de aço-carbono, com espessura variável, colocados entre o inserto e a cavidade da matriz. De acordo com a espessura destes calços originam-se desencontros dos insertos nos cantos de forma acentuada.

Com base nas informações obtidas na primeira fase dos ensaios do corpo de prova retilíneo, projetou-se ferramentas para executar o ensaio N° 23. Para o desbaste foi projetada e construída uma ferramenta com o comprimento dos gumes curto (figura 5.3) para realizar o desbaste em 3 passes com $a_p = 11,5$ mm e para o acabamento uma ferramenta longa, para realizar a operação em apenas um passe com a_p de 33 mm (figura 5.4).

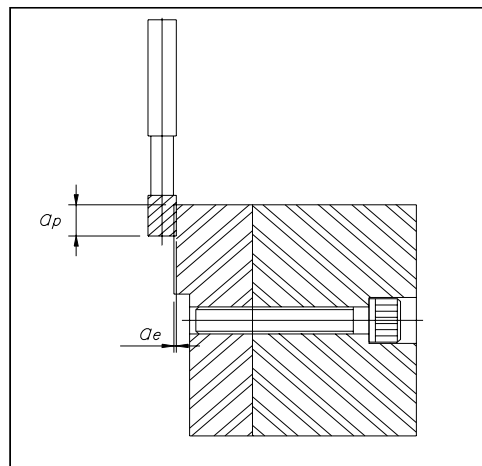


Figura 5.3 - Ferramenta para o desbaste.

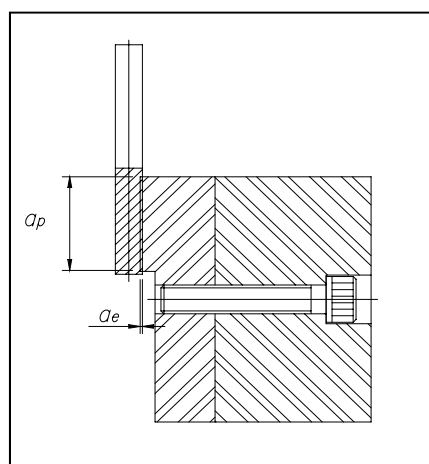


Figura 5.4 - Ferramenta para o acabamento.

O projeto destas ferramentas foi baseado na fresa do fabricante N° 5, com diâmetro dos gumes de 10 mm, 6 gumes, $\lambda = 45^\circ$ e $\gamma_o = -10^\circ$. As ferramentas de desbaste e acabamento foram todas fabricadas com a mesma geometria de corte pelo fabricante N° 6, e revestidas pelo fabricante N° 11 com X-TREME® (monocamada de 1 - 4 μm de TiAlN que possui temperatura de utilização de 800°C e dureza de 3500 HV 0,05).

O fabricante N° 6 forneceu o metal-duro, da classe DK460UF, sendo a sua equivalência na classe ISO 513 K30/40, contendo 90% de carboneto de tungstênio (WC) e 10% de cobalto (Co). Este tipo de metal-duro é de grão ultra-fino que combina tenacidade com alta dureza, especialmente recomendado em ferramentas rotativas para usinar peças de materiais duros [30].

No ensaio N° 23, utilizando uma das ferramentas do fabricante N° 6, fez-se o desbaste com $a_p = 11,5$ mm para uma parede de 33 mm, enquanto que para o acabamento planejou-se fazer com $a_p = 33$ mm. Embora nos ensaios no corpo de prova retilíneo com a ferramenta do fabricante N° 5 tivessem sido obtidos bons resultados, quanto aos critérios volume usinado, vida da ferramenta e taxa de usinagem, na operação de desbaste dos insertos curvilíneos a ferramenta similar quebrou ao usinar o canto 3 no terceiro passe.

Concluiu-se que vários fatores podem ter levado à quebra da ferramenta, sendo que o desencontro dos insertos curvilíneos nos cantos, certamente é uma causa, já mencionada anteriormente. A segunda razão é o aumento do comprimento de contato da fresa ao usinar o canto (aumento do ângulo de engajamento). A seção de usinagem para grande ângulo de engajamento no canto pode ser diminuída, diminuindo-se a velocidade de avanço ou executando-se os cantos em 3 ou mais passes. Tanto uma quanto outra alternativa levam a um aumento do tempo de usinagem. Uma terceira razão para a quebra da ferramenta pode ser o batimento da ferramenta montada. Se a ferramenta estiver montada excentricamente, para uma velocidade de avanço constante e divisão simétrica dos dentes da fresa, será obtida uma flutuação na espessura de usinagem, sendo que no lado da maior excentricidade se terá a maior espessura.

Replanejou-se a usinagem dos insertos curvilíneos montados na matriz, inicialmente com ferramentas dos fabricantes N°s 3 e 6. No ensaio N° 29, para o acabamento foi empregada a ferramenta de acabamento do fabricante N° 6,

denominada T03, sendo que suas características foram mencionadas anteriormente. Entretanto, esta ferramenta foi substituída logo no início do processo de acabamento pela ferramenta VC-LD 10, do fabricante N° 5, denominada T04, devido à qualidade da superfície usinada indesejável. A qualidade da superfície usinada foi reprovada visualmente devido a fortes marcas de avanço deixadas pela ferramenta nos insertos curvilíneos.

As características das ferramentas efetivamente empregadas nos ensaios N°s 29 e 42 estão apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Ferramentas de corte dos ensaios N°s 29 e 42.

Ferramenta	Ensaio N° 29			Ensaio N° 42		
	T01	T02	T04	T01	T02	T04
Fabricante N°	3	3	5	3	3	3
Código	431101000	451100900	VC - LD 10	451201000	451200900	451200900
d_1 (mm)	10	9	10	10	9	9
Revestimento	TiAlN	TiAlN	Miracle	TiAlN	TiAlN	TiAlN
l_1 (mm)	80	80	100	100	100	100
l_2 (mm)	32	32	46	45	45	45
z	3	4	6	4	4	4
λ (°)	30	30	45	30	30	30
γ_0 (°)	7	7	-10	7	7	7

Para poder julgar melhor o resultado foram medidos os batimentos das ferramentas montadas na máquina-ferramenta. Com o sistema de fixação, um porta-pinça e pinças convencionais, não se tinha muitas possibilidades de garantir um batimento pequeno. Com mandril porta-pinça alcança-se um batimento de 0,01-0,03 mm em um comprimento de até quatro vezes o diâmetro dos gumes. Os resultados obtidos dentro e inferiores a esta faixa, só foram alcançados com as ferramentas T02 e T03 ambas montadas na árvore da máquina-ferramenta na posição 2, tabela 5.2

Tabela 5.2 - Batimento nos gumes das ferramentas T01, T02 e T03.

		Batimento com Mandril Porta-Pinça (μm)					
		Gume Nº	1	2	3	4	5
Ferramenta T01	Posição 1	0	67	63	-	-	-
	Posição 2	0	54	30	-	-	-
Ferramenta T02	Posição 1	0	39	54	12	-	-
	Posição 2	0	0	2	1	-	-
Ferramenta T03	Posição 1	0	4	50	82	77	36
	Posição 2	0	3	12	18	23	10

Embora o fabricante Nº 6 tivesse dado especial atenção em fabricar uma ferramenta adequada para o acabamento dos insertos curvilíneos, o batimento observado, de 82 μm na posição 1, levava a um péssimo acabamento da superfície usinada e poderia, segundo Macedo [48], levar a quebras e desgaste excessivo da ferramenta, erros geométricos na peça e alterações no comportamento dinâmico do processo de corte e da máquina-ferramenta.

Como estratégia de usinagem dos insertos curvilíneos, buscou-se uma alternativa na qual o desbaste tivesse o máximo de semelhança com os ensaios nos corpos de prova retilíneos. Optou-se em dividir a operação de desbaste em 2 etapas. O objetivo de dividir em 2 etapas é para a utilização de ferramentas com diâmetros distintos, uma para a parte sinuosa e outra para os cantos dos insertos curvilíneos montados à matriz. Na primeira era apenas usinado a parte sinuosa (os raios de curvatura são na maioria grandes e para a profundidade de engajamento não levam a diferença significativa do ângulo de engajamento) e na segunda etapa eram usinados os cantos.

Para a parte sinuosa empregou-se a ferramenta T01 e, em 3 passes, executou-se a usinagem com velocidade de corte de 30 m/min, no ensaio Nº 29 e, com 38 m/min, no ensaio Nº 42. O avanço por dente nestes dois ensaios foi de 0,048 e 0,029, respectivamente, tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Parâmetros de corte e resultados dos ensaios N^{os} 29 e 42.

	Ensaio N ^o 29			Ensaio N ^o 42		
	Desbaste		Acab.	Desbaste		Acab.
Ferramenta	T01	T02	T04	T01	T02	T04
Código	431101000	451100900	VC - LD 10	451201000	451200900	451200900
v_c (m/min)	30	28	38	38	28	38
v_f (mm/min)	140	25 - 50	240	140	50	240
f_z (mm)	0,048	0,012	0,033	0,029	0,012	0,05
a_e médio (mm)	0,2	0,12	0,033	0,2	0,03	0,05
a_p (mm)	33	33	33	33	33	33
Tempo (min)	30,3	3,6	46,6	40	8,3	45,4

Na usinagem de cantos internos em materiais não endurecidos, geralmente se escolhe a fresa com raio igual ao raio do canto interno. Na usinagem de materiais endurecidos, este procedimento, invariavelmente, leva à quebra da ferramenta. A razão da quebra é o aumento do ângulo de engajamento, já explicado anteriormente.

O menor raio dos cantos era de 5,1 mm, no canto 3. Optou-se pela realização do desbaste com uma fresa de 9 mm de diâmetro, em dois passes de desbaste, conforme apresentado, esquematicamente, na figura 5.5. Nos ensaios N^{os} 29 e 42, o tempo de usinagem nos cantos foi de 3,6 e 8,3 minutos, respectivamente. Estas diferenças são devido às condições de corte empregadas.

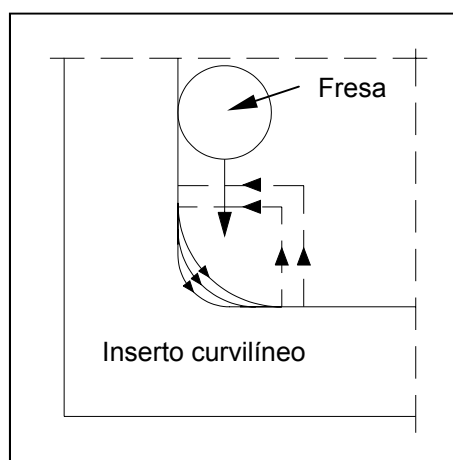


Figura 5.5 - Interpolação de desbaste para alívio de cantos.

Para a usinagem de acabamento, optou-se por uma usinagem contínua, empregando uma fresa de 10 mm de diâmetro, no ensaio N° 29 e, com 9 mm de diâmetro, no ensaio N° 42. Tanto o trecho sinuoso quanto os cantos eram usinados sem interrupção e sem uma estratégia específica de usinagem. O acabamento foi executado em 5 passes. No primeiro, a profundidade de corte radial foi de 0,05 mm. No segundo e no terceiro passe, de 0,03 mm e, no quarto, de 0,02 mm. Na última passada a profundidade radial regulada na máquina foi de 0 (zero) mm, o que teoricamente não levaria a remoção de material. Mas devido à deflexão da ferramenta e a deformação elástica da máquina-ferramenta, na operação anterior, ainda se observa uma pequena remoção de cavacos.

Somando-se os tempos de usinagem de desbaste (parte sinuosa e canto) com os de acabamento, obtém-se um tempo de 80,5 minutos e de 93,7 minutos, nos ensaios N° 29 e 42, respectivamente, decorrente de diferentes parâmetros de corte empregados.

Para análise do processo de fabricação, a direção de medição de rugosidade mais importante é a longitudinal, pois é onde se observam as marcas de avanço da ferramenta, entretanto, para o funcionamento da matriz, a direção mais importante é a transversal. Por esta razão foi medida a rugosidade nesta direção. Outra razão de não realizar medições de rugosidade na direção longitudinal é que a sinuosidade do inserto inviabiliza as medições. Foram realizadas 6 medições nas peças mais longas (posição I da figura 5.1) e 6 medições nas peças mais curtas (posição II da figura 5.1) nos ensaios N^{os}. 29 e 42. A tabela 5.4 apresenta os resultados destas medições de rugosidade.

Tabela 5.4 - Rugosidades dos insertos fresados em acabamento montados à matriz.

Ensaio N°	Direção de medição	Parâmetro de rugosidade R_a (μm)				Parâmetro de rugosidade R_t (μm)			
		\bar{x}	AT	s	CV (%)	\bar{x}	AT	s	CV (%)
29	Transversal	1,17	0,23	0,08	6,84	10,97	2,55	0,93	8,48
42	Transversal	1,35	0,93	0,27	20,00	11,83	3,19	0,98	8,28

Analisando os resultados da tabela 5.4 sob ponto de vista estatístico, pode-se afirmar que o valor que tem o maior grau de dispersão encontra-se no ensaio N° 42

onde R_a obteve a média aritmética \bar{x} de 1,35 μm alcançando um coeficiente de variação CV de 20,00%. Em contrapartida o menor grau de dispersão encontra-se no ensaio N° 29 onde R_a obteve a média aritmética de 1,17 μm alcançando um coeficiente de variação CV de 6,84%. Os outros dois valores alcançaram coeficientes de variação de 8,28% e 8,48%.

Apesar do maior grau de dispersão encontrado no valor de R_a no ensaio 42, confirma-se uma tendência em relação à ferramenta do fabricante N°5 também nos resultados dos parâmetros de rugosidade dos insertos curvilíneos montados junto à matriz, onde obteve as menores médias aritméticas (ensaio N° 29). Conforme mencionada anteriormente, esta ferramenta possuía 6 gumes, ângulo de hélice de 45° e ângulo de saída ortogonal de -10°.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

No decorrer deste capítulo, são apresentadas as principais conclusões obtidas através da análise dos resultados e do estudo de caso, assim como sugestões para futuros trabalhos, no intuito de complementar as informações geradas nesta pesquisa.

6.1 Conclusões

Para o fresamento do aço AISI-SAE D6 com dureza de 60-62 HRC pode-se concluir que:

- É possível realizar a sua usinagem com a infra-estrutura disponível no fabricante de matrizes nas condições de corte ensaiadas. Esta infra-estrutura compreende: centro de usinagem vertical, sistema de fixação da ferramenta do tipo porta-pinça, fresas de topo inteiriças, de metal-duro revestidas com TiAlN, durômetro, ferramentaria (aferição e afiação de ferramentas), departamentos de projeto de matrizes e de produção etc.;
- A transferência de dados tecnológicos de usinagem, obtida em corpos de prova retilíneos montados em dispositivo, foi possível para a usinagem de insertos curvilíneos montados em um corpo de matriz. No entanto, houve adaptações nas dimensões das ferramentas e dos parâmetros de corte em função das dificuldades encontradas no fresamento periférico dos insertos curvilíneos, especialmente nos seus cantos;
- Para o desbaste recomenda-se o uso de ferramentas de topo reto, múltiplos gumes (6 gumes), com ângulo de hélice ($\lambda = 45^\circ$) e ângulo de saída ortogonal negativo ($\gamma_o = -10^\circ$). Canais rasos e ângulos de saída negativos aumentam a estabilidade do gume da ferramenta confirmado por [27, 71]. Ângulos de hélice elevados propiciam a sobreposição dos gumes, diminuindo o gradiente de esforços ao longo do corte. Em contrapartida quanto maior o ângulo de hélice, maior a força e a potência de corte para fresas de igual diâmetro e número de gumes;
- Ferramentas sólidas de metal-duro da classe K, com micro-grão, revestidas com TiAlN (monocamada) são indicadas para o desbaste. Verificou-se através da

análise metalográfica que a ferramenta (fabricante N° 5) com menor tamanho de grão obteve o melhor resultado global considerando volume removido, taxa de usinagem e vida da ferramenta dentre as ferramentas ensaiadas no fresamento dos corpos de prova retilíneos, o que é correlacionado também com melhor resistência ao desgaste e a maior resistência e tenacidade do gume. Revestimento de monocamada de TiAlN é vantajoso pois apresenta uma menor espessura da camada (1 - 4 μm) e elevada microdureza (3500 HV 0,05). Estas características propiciam uma resistência maior ao desgaste, especialmente adequado no desbaste onde as solicitações mecânicas e térmicas são elevadas;

- As velocidades de corte adequadas para o desbaste variam de 20-75 m/min, o que indica que se deve aplicar baixas velocidades de corte. A ampla faixa de velocidades de corte, deve-se a utilização nos ensaios de ferramentas de diferentes fabricantes, com diâmetros e números de gumes distintos e geometria variada;
- O valor do parâmetro de rugosidade R_a (0,92 μm), obtido no desbaste do corpo de prova retilíneo, está dentro da norma adotada como referência, que compreende a faixa de 5 a 20 μm [10]. No entanto, para fabricação de insertos para matrizes cerâmicas não se conhece valores adequados, e sabe-se que os custos gerados na usinagem vão depender do grau de acabamento da superfície usinada;
- Nas condições de corte ensaiadas notou-se uma tendência que ferramentas de 6 gumes e diâmetro de 10 mm (ensaio N° 29), de propiciarem uma melhor qualidade da superfície usinada, que ferramentas de 4 gumes e diâmetro de 9 mm (ensaio N° 42). Avaliou-se que o menor avanço por gume f_z e o maior diâmetro da fresa d_1 empregados no acabamento do ensaio N° 29 possam ter contribuído fortemente para melhoria da qualidade da superfície;
- O valor da rugosidade gerada no inserto curvilíneo fresado no ensaio N° 29 ($R_a = 1,17 \mu\text{m}$), está dentro da faixa da norma adotada por Ferreira [10] ($R_a = 0,32 - 1,25 \mu\text{m}$), o que indica um bom acabamento da superfície usinada com fresas de 6 gumes nas condições de corte selecionadas.

A tabela 6.1 apresenta uma síntese de todas as medições efetuadas em corpos de prova de aço D6, nos processos de fresamento e retificação nos

parâmetros de textura R_a e R_t . Pretende-se que estes parâmetros sirvam como fonte de informação para a indústria, visando uma melhoria dos produtos fabricados.

Tabela 6.1 - Rugosidades obtidas nos CP de aço D6 com 60-62 HRC.

Processo	Operação	Superfície	Direção medida de R_a (μm)		Direção medida de R_t (μm)	
			Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
Fresamento	Desbaste do CP retilíneo	-	0,92	-	12,76	-
	Acabamento do Inserto curvilíneo	-	-	1,17	-	10,97
Retificação	Desbaste do CP retilíneo	-	1,78	1,99	20,28	17,59
	Acabamento do CP retilíneo	Central	0,29	0,32	4,34	5,21
		Saída	0,78	0,64	10,24	6,33

6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Para novos trabalhos na área de usinabilidade de aços utilizados em moldes e matrizes para a indústria cerâmica, pode-se sugerir os seguintes tópicos:

- Análise das forças de corte no fresamento no aço D6 com dureza de 60-62 HRC, para poder dimensionar as seções de usinagem dentro das faixas limitadas das ferramentas de metal-duro;
- Otimizar a fixação da ferramenta de metal-duro, compreendendo os diferentes tipos de mandris e cones;
- Análise econômica através do levantamento dos custos de todo o processo de usinagem, para poder implementar as ferramentas;
- Usinagem de componentes com composições distintas, como nos compactadores que são constituídos de aço AISI-SAE 1045 com revestimento duro com dureza de 58-60 HRC.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 5. ed., 1982. Bibliografia: p 276-280.
2. UFSC. Departamento de Engenharia Mecânica - GRUCON. Arquivo extraído da Internet em novembro de 2001. <http://www.cimm.com.br>.
3. FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1970. 754 p., Bibliografia p. 305-308.
4. KÖNIG, W. Tornear, Fresar e Furar. (Tradução: Prof. Dr.-Ing. WALTER L. WEINGAERTNER. Aachen. 1981. 409 p.
5. CRESPO, A. A. Estatística fácil. São Paulo: Editora Saraiva, 1997. 224p., Bibliografia p. 108-120.
6. CUBBERLY, W. H. e UNTERWEISER, P. M. Metals handbook. Ohio: American Society for Metals, 1985. 9. ed., volume 3. 882 p.
7. LIU, X. L.; WEN, D. H. et al. Cutting temperature and tool wear of hard turning hardened bearing steel. Journal of materials processing technology, Elsevier, p. 200-206, 129 (2002).
8. JAWAHIR, I.S.; LUTTERVELT, C. A. V. Recent developments in chip control research and applications. Annals of the CIRP, vol. 42/2/1993, p.659-693.
9. TAVARES, R. C. Sonda ótica para medição sem contato de rugosidades. 1991. 9f. Trabalho de Pós-Graduação - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
10. FERREIRA, J. C. E. Planejamento do processo assistido por computador. Universidade Federal de Santa Catarina, Grupo de Pesquisa e Treinamento em Comando Numérico, Florianópolis. Apostila.

11. KÜHN, I. Dureza Brinell. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Apostila.
12. BET, L. Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor. 1999. 350f. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
13. STEMMER, C. E. Ferramentas de corte II. Florianópolis: Ed UFSC, 2 ed., 1995. 314 p., Bibliografia p. 141-214.
14. FALLBÖHMER, P. Advanced cutting tools for the finishing of dies and molds. VDI-Verlag GmbH, ISBN 3-18-349802-2, Düsseldorf 1998.
15. TALICARB. Utensili di precisione in metallo duro integrale. Milano, 2001. Catálogo de ferramentas.
16. OSG. Ferramentas de precisão Ltda. São Paulo, 1997. 1 compact disc digital.
17. VALLE, P. D. Avaliação da influência da minimização e eliminação do fluido de corte no processo de fresamento de topo reto. 2001. 129f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
18. BIEKER, R. NC-Fräsen von stahlhohlformen. VDI-Verlag GmbH, ISBN 3-18-401190-9, Düsseldorf 1991.
19. UOP. Utensili per la lavorazione ad alta velocità ed a seco. Roncadelle, 2000. Catálogo de ferramentas.
20. FETTE. Ferramentas de metal duro para fresamento, Germany. 2000. Catálogo de ferramentas.

21. KÖLLING, H. D. Prozessoptimierung und leistungssteigerung beim schafffräsen. Doktor – Ingenieurs Genehmigte Dissertation. RWTH, Aachen, Deutschland. 1986. 137p.
22. FIELD, M.; KAHLE, J. F. Definition de L'usinabilité. B.D.T. n° 30. Usinabilité des fontes, 1963.
23. SANDVIK. Ferramentas rotativas. Dinamarca, 1997. Catálogo de ferramentas.
24. ISCARMILL. Solid carbide end mills. Israel, 1997. Catálogo de ferramentas.
25. GÜHRING. Super Line - una dimensión totalmente nueva en el mecanizado económico. São Paulo,. Catálogo de ferramentas.
26. KOBELCO. Cutting tools handbook. Japan, 2001. Catálogo de ferramentas.
27. HITACHI TOOL. Catalogue 4000 milling tools. Solingen, 2000. Catálogo de ferramentas.
28. HANITA. Technical information. Israel, 2000. 1 compact disc digital.
29. STEMMER, C. E. Ferramentas de corte I. Florianópolis: Ed UFSC, 4 ed., 1995. 249 p., Bibliografia p. 59, 94.
30. GÜHRING. Hartmetalle für präzisionswerkzeuge, für die umform - und schnittechnik. Berlin, 2000. Catálogo de metal-duro.
31. FRAISA. Präzisionswekzeuge. Bellach., 2000. Catálogo de ferramentas.
32. MITSUBISHI CARBIDE. Herramientas e insertos. Itália, 2000 Catálogo de ferramentas.
33. NIAGARA. Cutter carbide. Reynoldsville, 2000. Catálogo de ferramentas.

34. SCHROETER, R. B. Tecnologia da usinagem com ferramentas de geometria definida. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Mecânica de Precisão, Florianópolis. Apostila.
35. CASTRO, P. R. A. Metal duro revestido. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Mecânica de Precisão, Florianópolis. 2000, 6 p.
36. GÜHRING, Coatings. Arquivo extraído da internet em junho de 2001. <http://www.guehring.de/serlet/DigiTrade/b6f25c1b.../beschichtungen.htm>.
37. BALZERS BALINIT DO BRASIL. Coberturas. Arquivo extraído da internet em fevereiro de 2002. <http://www.balzers.com.br>.
38. SCHROETER, R. B. e TEIXEIRA, C. R. Proposta de metodologia para medição do desgaste em ferramentas de corte de geometria definida. In: CONEM 2000-Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Anais. Natal. 9 p. 2000.
39. ROSA, A. B. e DINIZ, A. E. Desgaste de flanco e da vida da ferramenta no fresamento de topo. Máquinas e Metais, São Paulo, n. 414, p. 104-115 , 2000.
40. FETTE. Ferramentas para fresamento, Germany. 2000. Catálogo de ferramentas.
41. SANDVIK. Fabricação de moldes e matrizes. Guia de aplicação.1999. 208 p.
42. KENNAMETAL HERTEL AG. Ferramentas para centros de usinagem. Germany. 2000. Catálogo de ferramentas.
43. SCHUNK. Dehnspannfutter. 1998. Catálogo de mandris hidráulicos.
44. MBPT MAPAL BILZ. Precision tools. Contagem, 1999. Catálogo de fixação térmica de ferramentas.

45. FERRARESI, D. Usinagem dos metais. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 6. ed., 1972. Bibliografia: p. 1-7.
46. DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C. e COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. São Paulo: MM Editora, 1999. Bibliografia: p. 195-214.
47. DROZDA, T. J.; WICK, C. Tool and manufacturing engineers handbook - Machining. 4. ed. Dearborn, Michigan: Society and Manufacturing Engineers, 1983. v. 1, p.10.1-10.76.
48. MACEDO, S. E. Análise de forças no fresamento de topo convencional e com altas velocidades de corte. 2001. 109f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
49. LISSAMAN, A. J. e MARTIN, S. J. Principles of engineering production. Hong Kong: Hodder and Stoughton Educational, 2. ed., 1982. p. 235.
50. GOMES, J. O. Fabricação de cavidades por fresamento. 1998. 55f. Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
51. SCHROETER, R. B. et al. Análise das forças e da vida da ferramenta no fresamento de topo com ferramentas de metal-duro revestido. In: COBEF 2001 - Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Curitiba. 8 p. 2001.
52. TEIXEIRA, C. R.; SCHROETER, R. B. e WEINGAERTNER, W. L. Aspectos ecológicos nos processos de usinagem. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Mecânica de Precisão, Florianópolis. 2000, 7 p.

53. KALHÖFER, E. Dry machining - principles and applications. In: 2º Seminário Internacional de Alta Tecnologia, São Paulo. Anais. Universidade Metodista de Piracicaba, 1997. 6 p.
54. HEISEL U.; et al. A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte. Máquinas e Metais, São Paulo, n. 385, p. 22 - 38, 1998.
55. MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. Vantagens e desvantagens do uso ou não de fluidos de corte. Máquinas e Metais, São Paulo, n. 419, p. 134-151, 2000.
56. ABRÃO, A. M.; ASPINWALL, D. K. e WISE, M. K. A vida de ferramentas e a integridade de peças no torneamento de aços temperados. Máquinas e Metais, São Paulo, p.200 - 217, 1996.
57. SCHORRY, R. E. Machine tool structural, modeling and simulation. Arquivo extraído da internet em fevereiro de 2002. <http://www.cinmach.com>.
58. HURON. Machines. Arquivo extraído da internet em fevereiro de 2002. <http://www.huron-grafr.fr>.
59. FADAL. Fadal Machining Centers. Califórnia, 2000. Catálogo de máquinas.
60. STAHL. Eisen Prüfblatt 1178-69.
61. GOMES, J. O. Ferramentas de desbaste para o fresamento dos aços ABNT 420 e H13. In: COBEF 2003 - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Uberlândia. 9p. 2002.
62. GOMES, J. O. Análise da utilização de fresas de topo esférico de dentes helicoidais e de dentes retos no acabamento de superfícies complexas no aço SAE H13 (48 HRC). In: COBEF 2003 - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Uberlândia. 10p. 2002.

63. DINIZ, A.D.; CALDEIRANI, J. Influence of the relative positions of tools and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. *Wear*, Elsevier, p. 67-75, 232 (1999).
64. WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. Tecnologia de usinagem de alumínio e suas ligas. Convênio UFSC-ALCAN, Florianópolis, 1991, 80p.
65. PEDRÓS, J. M. e ROGER, J. C. El corte en el torneado y fresado de los metales. Barcelona: Editorial Labor, S.A., 1964. Bibliografía: 143-189.
66. GEIST, R. Zylindrische schafffräser für die zerspanung gehärteter stähle. *Werzeuge Technik*, Boulogne, n. 57, p.29-32, 1999.
67. KOENIGSBERGER, F. Design principles of metal-cutting machines tools. Oxford: Pergamon Press, 1964. Bibliografía: p. 10-15.
68. MICHELETTI, G. F. Tecnologia mecânica: mecanizado por arranque de viruta. Barcelona: Editorial Blume, 1980. Bibliografía: p.158.
69. THE CINCINNATI MILLING MACHINE CO. A treatise on milling and milling machines. Ohio: Cramer-Krasselt Co, 3. ed., 1951. Bibliografía: p. 203-265.
70. KÜHN, I. Dureza Rockwell. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Apostila.
71. GOMES, J. O. Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado DIN 1.2083, na liga de alumínio (AMP8000) e na liga de Cobre (Cu-Be). 2001. 156f. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
72. CALLISTER, W. D. Materials science and engineering: an introduction. New York: John Wiley & Sons, Inc, 4. ed., 1996. 852p., Bibliografía: p. 159-161.

-
73. WECK, M.; SCHUBERT, I. A haste cônica vazada é uma interface otimizada entre máquina e ferramenta. Máquinas e Metais, São Paulo, p. 41-51, 1996.
 74. GOMES, J. O. Características da usinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos SAE 304 e SAE 316 com variação dos parâmetros metalúrgicos. 1996. 105f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
 75. SANDVIK. Modern metal cutting. A practical handbook. 1. ed. 1994. 840 p.
 76. HAM HARTMETALL WERKZEUGFABRIK. Präzision katalog. Hörenhausen, 2000. Catálogo de ferramentas.
 77. EDWARDS, R. Cutting tools. Cambridge: University Press, 1993. Bibliografia: p. 8-16.

8. ANEXOS

A lista abaixo contém os principais dados técnicos dos equipamentos e insumos utilizados neste trabalho.

8.1 Máquina-Ferramenta

- Centro de Usinagem Vertical HAAS
- Modelo: VF-3
- Cone: ISO 40
- Potência de acionamento = 11 kW
- Rotação máxima = 7500 rpm.
- Curso dos eixos: X = 1016 mm, Y = 508 mm e Z = 635 mm



Figura 8.1 - Centro de Usinagem Vertical HAAS VF-3

8.2 Equipamento de Aferição de Ferramentas

- Unidade de Aferição de Ferramentas WOTAN
- Resolução do indicador digital de posição: 1 μm
- Diâmetro máximo admissível de aferição: 500 mm
- Comprimento standard máximo admissível de aferição : 500 mm
- Precisão de aferição: $\pm 5 \mu\text{m}$

8.3 Equipamento para Avaliação Digital do Desgaste

- Câmera: CCD PULNIX
- Modelo: TM-7CN
- Lente: 50 mm
- Aumento de 1:1,4

8.4 Equipamento para Medição da Rugosidade

- Rugosímetro PERTHOMETER - MAHR
- Modelo: S8P
- Unidade de avanço: PRK
- Sonda ótica: Focodyn (diâmetro do foco de 1 μm).
- Cut-off utilizado: 0,8 mm
- Comprimento total da medição: 5,6 mm
- Comprimento efetivo de medição: 4,0 mm

8.5 Microscópio para Análise Metalográfica

- Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL - JSM 5800
- Voltagem de aceleração de 0,3 a 30 kV
- Resolução para imagem de ponto: 3,5 nm
- Faixa de magnificação: 18 a 300.000 vezes

8.6 Equipamento para Medição de Dureza

- Durômetro BRIRO
- Fabricante: GEORG REICHERTER / NECKAR
- Tipo: VA-1
- Tipo de penetrador: Diamante com cone de 120°
- Escala: Preta (Rockwell)
- Pré-carga: 10 kg
- Carga: 150 kg