UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de São Carlos

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES PLANAS USINADAS POR FRESAS
DE TOPO ESFÉRICO**

MARCELO FERREIRA BATISTA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

São Carlos

2006

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Tecnólogo **MARCELO FERREIRA BATISTA**

Dissertação defendida e julgada em 19/01/2007 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **REGINALDO TEIXEIRA COELHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Prof. Associado **RENATO GOULART JASINEVICIUS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Prof. Dr. **ADRIANO FAGALI DE SOUZA**
(Sociedade Educacional de Santa Catarina/SOCIESC-IST) APROVADO

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Prof. Associado **FÁBIO MÜLLER GUERRINI**
Vice-Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC
em Exercício

Dedico este trabalho a meus pais
Oliveira Miranda Batista e
Maria Ferreira Batista,
pelo respeito e confiança
em mim depositados.

Agradecimentos

A elaboração de uma dissertação não é um trabalho solitário, envolve muitas pessoas, que direta ou indiretamente tiveram valiosa colaboração para esta realização. Agradeço a todos sem exceção, em especial:

A DEUS, por me propiciar a vida, paz e a saúde, guiando-me pelo caminho da justiça e perseverança.

Ao Professor Reginaldo Teixeira Coelho da Escola de Engenharia de São Carlos, pela coordenação e orientação deste trabalho.

A Universidade de São Paulo, pela oportunidade de continuidade de estudo e crescimento científico.

A meus pais, que sempre me deram seu exemplo de retidão e valores.

A todos os colegas da EESC e NUMA, com quem convivi durante este período.

Aos grandes amigos do Laboratório OPF, pela ajuda, incentivo e companheirismo.

Ao Professor Lincoln, pela parceria, orientação e amizade.

A todas as empresas e instituições colaboradoras da IFM que incentivam à pesquisa com fornecimento de máquinas, equipamentos, etc.

A todas as pessoas da Escola SENAI “Antônio Adolpho Lobbe”, que de alguma forma contribuíram para a superação desta etapa da minha vida.

“Pensa como pensam os sábios, mas fala como falam as pessoas simples”.

Aristóteles

RESUMO

BATISTA, M. F. (2006). *Estudo da Rugosidade de Superfícies Plana Usinadas por Fresas de Topo Esférico*. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

Dentro da cadeia produtiva de moldes e matrizes, a usinagem tem o maior peso, considerando tanto os custos envolvidos, quanto o tempo de programação e execução. O emprego das tecnologias CAD/CAM/CNC e HSC atualmente é um atributo básico de competitividade. O que determinará a vantagem estratégica das empresas será o uso otimizado dessas tecnologias. Nos processos de usinagem, o acabamento é uma operação que demanda muito tempo, e muitas vezes não se atinge o resultado desejado, seja por falta de conhecimento dos fenômenos envolvidos na usinagem, seja pelo uso de estratégias de usinagem sem conhecimento detalhado do processo de fabricação. A otimização da etapa de acabamento terá um ganho enorme na repetibilidade da usinagem, uma economia de ferramentas e, principalmente a eliminação de uma etapa, considerando a usinagem do molde/matriz com o material já tratado termicamente com a dureza final de utilização. O objetivo deste trabalho é estudar a usinagem de acabamento de superfícies planas utilizando fresas de topo esférico, demonstrando que os valores teóricos de altura de crista fornecidos pelos *softwares* CAM não são valores reais. A determinação de fatores ligados à etapa de acabamento de superfícies planas, indicando a melhor alternativa na usinagem do aço ferramenta WNr 1.2367, mostra que os parâmetros de usinagem estudados tiveram grande influência na rugosidade, principalmente o sentido de corte. O conhecimento dos melhores parâmetros de usinagem e suas influências no resultado final, assim como outros fatores, tem o intuito de oferecer informações às empresas e aos seus programadores no sentido de agilizar o planejamento e execução de moldes e matrizes.

Palavras-chave: Usinagem com altas velocidades. Moldes e matrizes. Acabamento superficial. Ferramentas de topo esférico.

ABSTRACT

BATISTA, M. F. (2006). *Estudo da Rugosidade de Superfícies Plana Usinadas por Fresas de Topo Esférico*. MSc Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

In die mould production sequence, the milling is the most important factor, considering both the programming costs and the manufacturing time. In fact, the application of CAD/CAM/CNC and HSC technologies is a basic competitiveness edge. The optimized use of these technologies will determine the strategic advantage for industries. The finishing by milling is a step that spend a long time and, in most cases, the final result is not the desired one. That is a consequence of the lack of knowledge on the involved phenomenon or by the use of milling strategies without the enough knowledge on milling processes. The optimization of the finishing by milling will provide a gain on the next operations, save tools, and mainly because of the possibility of eliminating one step, consider a mould being machined in hardened state. The main objective of the present work is to study the finishing milling on flat surfaces using ball nose end mills and shows that the theoretical scallop height values yielded by CAM *softwares* is not reached on practical operations. Also, the factors governing flat surfaces as well as the best parameters for the WNr. 1.2367 tool steel showing that the studied milling parameters has a strong influence in the roughness, manly the cut sense. The knowledge of the best milling parameters and their influences on the final result, as well as others some factors, intend to offer information for industries and their programmers to optimize the die and moulds cutting plan and manufacturing.

Keywords: High speed milling. Die and mould. Roughness. Ball nose tools.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – (a) Modelo simplificado da formação do cavaco e (b) relação geométrica entre avanço e espessura	21
Figura 2.2 – Distribuição da temperatura na ponta de uma ferramenta de metal duro	22
Figura 2.3 - Geometria da ferramenta topo esférico e área de contato ferramenta-peça	23
Figura 2.4 – Cavaco estável em forma de cone e a aparência da superfície.....	23
Figura 2.5 – Movimento da ferramenta no cavaco estável ACB.....	24
Figura 2.6 - Movimento da ferramenta e área na formação do cavaco tipo <i>chatter</i>	25
Figura 2.7 - Cavaco <i>chatter</i> em forma de agulha e aparência da superfície.....	26
Figura 2.8 - Cavaco crítico e aparência da superfície.....	26
Figura 2.9 - Movimento da ferramenta e área em corte na formação do cavaco tipo crítico	27
Figura 2.10 - Cavaco severo e aparência da superfície	27
Figura 2.11 - Movimento da ferramenta e área na formação do cavaco tipo severo	28
Figura 2.12 - Componentes ortogonais das forças de corte no fresamento.....	29
Figura 2.13 – Forças X, Y e Z atuando na ponta da ferramenta	30
Figura 2.14 – Tipos de fresas e formas de superfícies	36
Figura 2.15 - Sentidos de corte no fresamento (a) concordante (b) discordante	37
Figura 2.16 – (a) Desgaste frontal e (b) desgaste de cratera	42
Figura 2.17 - Componentes do desgaste frontal de uma ferramenta	43
Figura 2.18 – Elementos de uma superfície usinada.....	46
Figura 2.19 – Diversos perfis com mesma rugosidade Ra	47
Figura 2.20 – Fatores que influenciam na rugosidade.....	48
Figura 2.21 – Redução da rugosidade superficial com o aumento da velocidade de corte	49
Figura 2.22 – Geometria tridimensional da rugosidade	51
Figura 2.23 – Geometria de contato de uma fresa <i>ball nose</i> parcialmente imersa	52
Figura 2.24 – Comparação entre usinagem convencional e HSC na altura de cristas	53
Figura 2.25 – Influência do caminho da ferramenta na textura, (a) trajetória de segmentos de retas, (b) trajetória de tangenciamento contínuo	54
Figura 2.26 – Fresadora copiadora	56
Figura 2.27 – Seqüência de fabricação de moldes.....	58

Figura 2.28 - Fluxograma das tecnologias CAE/CAD/CAM/CNC.....	61
Figura 2-29 - Tecnologias na fabricação de moldes/matrizas	63
Figura 3.1 – Centro de Usinagem Hermle C800U	68
Figura 3.2 – Acessórios (a) medidor de ferramentas (b) apalpador eletrônico	69
Figura 3.3 – Rugosímetro montado sobre o corpo de prova	70
Figura 3.4 - Microscópio e câmera integrada.....	70
Figura 3.5 – Geometria da ferramenta utilizada nos ensaios	71
Figura 3.6 - Ferramenta <i>ball nose</i> e sistema de fixação de ferramentas hidro-mecânico	72
Figura 3.7 – Estrutura metalográfica do corpo de prova.....	73
Figura 3.8 – Corpo de prova	73
Figura 3.9 - Usinagem de topo em linhas paralelas com a_e constante.....	76
Figura 3.10 – Sentido de corte (a) concordante e (b) discordante	77
Figura 3.10 – Corpo de prova e ferramenta montados para ensaios	79
Figura 4.1 – Inter-relação entre os parâmetros a_e e f_z na rugosidade R_z	80
Figura 4.3 – Rugosidades R_a medidas no sentido transversal ao sentido de avanço.....	83
Figura 4.2 – Rugosidades R_z medidas no mesmo sentido do avanço.....	84
Figura 4.4 – Rugosidades R_a medidas no sentido do avanço	85
Figura 4.5 – Aspecto das superfícies usinadas	88
Figura 4.6 – Microscopia - de superfície usinada (região do ensaio 5)	89
Figura 4.7 – Aspecto típico das superfícies fresadas no sentido concordante.....	90
Figura 4.8 – Aspecto típico das superfícies fresadas no sentido discordante	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Efeitos dos elementos de liga sobre a usinabilidade.....	34
Tabela 3.1 – Parâmetros geométricos da ferramenta de corte	71
Tabela 3.2 – Composição química do corpo de prova (em porcentagem).....	72
Tabela 3.3 – Delineamento dos ensaios	74
Tabela 3.4 – Ordem aleatória do 1° e 2° ensaio.....	78
Tabela 4.1 – Valores da rugosidade R_z medidos no sentido transversal ao avanço	81

LISTA DAS NOTAÇÕES E SÍMBOLOS

A	Área da secção do cavaco
a_e	Profundidade de corte radial
a_p	Profundidade de corte
f_z	Avanço por aresta
D_e	Diâmetro efetivo de corte
D	Diâmetro nominal da ferramenta
F_{ap}	Força de apoio
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força de profundidade
F_t	Força de avanço
F_u	Força de usinagem
F_x	Componente da força de corte paralela a eixo cartesiano X
F_y	Componente da força de corte paralela a eixo cartesiano Y
F_z	Componente da força de corte paralela a eixo cartesiano Z
n	Rotação
R	Raio da ferramenta
h_d	Espessura do cavaco
K_s	Pressão específica de corte
KT	Profundidade da cratera
l	Comprimento da ferramenta (balanço)
le	Percurso de amostragem (<i>cut-off</i>)
l_m	Percurso de medição de rugosidade
Ra	Rugosidade Ra
R _{máx}	Rugosidade R _{máx}
Rt	Rugosidade Rt
Ry	Rugosidade Ry
Rz	Rugosidade Rz
s	Desvio padrão
Sm	Distância entre picos
t_1	Espessura inicial do cavaco

t_2	Espessura final do cavaco
VB	Desgaste de cratera
$Vb_{m\acute{a}x}$	Desgaste de flanco máximo
Vb_b	Desgaste de flanco
v_{fa}	Velocidade de avanço
v_c	Velocidade de corte
X	Eixo cartesiano X
Y	Eixo cartesiano Y
Z	Eixo cartesiano Z

α	Ângulo de folga principal
γ	Ângulo de saída da ferramenta
Φ	Ângulo de cisalhamento
μ	Coeficiente de atrito
φ	Ângulo de contato da aresta de corte
σ_r	Tensão de ruptura

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	Association Française de Normalisation
AISI	American Iron and Steel Institute
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
cBN	Nitreto de Boro cúbico
CL	Cutter Location
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIN	Deutsches Institut für Normung
DXF	Autodesk Exchange Format
EDM	Electrical discharge machining
FEM	Finite Element Method
HPC	High Performance Cutting
HRC	Hardeness Rockwell “C”
HSC	High Speed Cutting
HSM	High Speed Machining
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
ISO	International Organization for Standardization
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
NC	Numeric Control
OPF	Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação, da Escola de Engenharia de São Carlos-USP.
PcBN	Nitreto cúbico de Boro policristalino
PTW	Instituto de Técnicas de Produção e Máquinas Ferramentas da Universidade Técnica de Darmstadt (Alemanha)
TiAlN	Nitreto de Titânio Alumínio
VDAFS	Verband der Automobil Industrie

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	18
1.2	Estrutura do trabalho.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Processo de corte dos metais.....	20
2.1.1	Mecanismo de formação e quebra do cavaco	20
2.1.2	Forças na usinagem	29
2.1.3	Usinabilidade dos metais	32
2.2	Fresamento	36
2.2.1	Generalidades	36
2.3	Ferramentas de corte	38
2.3.1	Materiais das ferramentas de corte	38
2.3.2	Vida e desgaste da ferramenta	40
2.4	Rugosidade	45
2.4.1	Definições	45
2.4.2	Fatores influentes na rugosidade	47
2.4.3	Geometria da rugosidade com fresas esféricas	50
2.5	Moldes e matrizes	55
2.5.1	Manufatura	55
2.5.2	Tecnologias aplicadas - CAE, CAD, CAM, HSC	59
2.5.3	Estratégias de usinagem para molde e matrizes	63
2.6	Resumo da revisão bibliográfica	66
3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	68
3.1	Equipamentos	68
3.1.1	Centro de Usinagem e acessórios	68
3.1.2	Equipamentos de inspeção	69
3.1.3	Ferramentas e corpos de prova	71
3.2	Delineamento dos experimentos.....	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	80
4.1	Análise da qualidade superficial.....	80
4.1.1	Avaliação da altura de crista-1	80
4.1.2	Avaliação da altura de crista-2	84
4.2	Avaliação microscópica.....	87
5	CONCLUSÕES	93
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	95

REFERÊNCIAS.....	96
ANEXO 1 – Programa CNC-1 usado nos ensaios concordantes	102
ANEXO 2 – Programa CNC-2 usado nos ensaios discordantes	103

1 INTRODUÇÃO

De todos os processos conhecidos para se dar forma aos metais, os processos de usinagem são os mais utilizados e tem a maior variedade de condições de operações. Por processos de usinagem entendemos aqueles que dão forma ao material retirando o metal excedente por corte, efetivado por movimentos de usinagem; a esse material excedente removido dá-se o nome de cavaco, que é retirado pela ferramenta de corte (FERRARESI, 1977).

A usinagem é a etapa que tem o maior peso sobre o custo de produção na fabricação de moldes e matrizes por diversos fatores, dentro os quais pode-se citar: a remoção de grandes quantidades de material, tolerâncias dimensionais e de forma muito estreitas e a qualidade do acabamento superficial.

O projeto e a manufatura de moldes, segundo Altan (2001), representam um aspecto crucial de toda cadeia produtiva, pois praticamente todas as peças fabricadas atualmente, são feitas por processos que requerem moldes. A importância dos moldes e matrizes é similar às máquinas-ferramenta, e sua manufatura pode ser um “gargalo” no desenvolvimento do produto. Ainda segundo o autor, na indústria automobilística podem-se encontrar moldes complexos para laminação que podem custar acima de US\$500,000.00 e demandar de 6 a 9 meses desde a produção do material maciço até a confecção final do produto. A importância dos moldes e matrizes torna-se mais evidente imaginando-se esse tempo antes de começar a produção de um novo modelo de carro. Assim, o tempo de desenvolvimento de novos modelos de carros está preso à construção de moldes e matrizes, fazendo com que a indústria automobilística esteja sempre pressionando os fabricantes de moldes para conseguirem redução do tempo e inovações técnicas, para conseqüentemente reduzirem o tempo de desenvolvimento de seus novos modelos.

O século passado, principalmente na segunda metade, assistiu a uma evolução exponencial dos processos de usinagem, em grande parte ligados ao desenvolvimento das máquinas e ferramentas, como as máquinas CNC's e as

ferramentas de metal duro, cerâmicas e PcBN's. Esse desenvolvimento foi fruto da necessidade de se fabricar peças (bens de consumo ou de produção) em menor tempo e com características de acabamento, dimensão e forma cada vez mais exatos (BRAGHINI, 1998), e ainda, segundo Altan (1999), o aumento do custo da energia trouxe a necessidade de diminuição dos processos, a competição internacional, o custo da mão de obra entre outros. Estes desenvolvimentos continuarão sem muitos sobressaltos ou grandes inovações assim como suas variações e técnicas aplicadas às tecnologias existentes. O enfoque será dado à redução da cadeia produtiva através da aplicação de tecnologias como os sistemas de manufatura integrados, o uso de *softwares* para redução do desenvolvimento de produtos e processos, utilização de máquinas cada vez mais versáteis e velozes como as hexapôdes e a combinação de processos como a têmpera e retíficas simultâneas.

Nenhum dos métodos deixará de ser utilizado, entretanto a aceitação será maior daqueles que se mostrarem mais eficientes. Atualmente a velocidade de criação e modificação dos produtos tem obrigado o desenvolvimento de estratégias de redução do ciclo de manufatura, flexibilidade e facilidades para confecção de moldes e matrizes, visando reduzir o prazo de entrega e melhorar a qualidade dos componentes.

O fresamento de cavidades com a tecnologia HSC (*High Speed Cutting*) tem sido cada vez mais aplicado e desenvolvido. Paralelamente, segue o desenvolvimento de eixos-árvore, motores de acionamento, dinâmica das máquinas, ferramentas de corte, sistemas CAD/CAM, etc.

O processo de usinagem de materiais no estado endurecido ainda necessita muita pesquisa, mas se mostra como um grande avanço na fabricação de moldes e matrizes. Isto pode ser notado tanto na etapa de usinagem em desbaste quanto na fase de acabamento. O desbaste geralmente não é a etapa que mais demanda tempo, mas é onde se observam grandes taxas de remoção de cavaco e envolvem grandes dificuldades de corte. A etapa de acabamento é a mais importante, pois é a variável de saída do processo, comprometendo fortemente o tempo de fabricação, podendo determinar a necessidade de grandes tempos de polimento (ÇOLAC *et al.*, 2005).

Os *softwares* de CAM oferecem uma pequena variedade de estratégias de usinagem e propiciam pouca assistência aos programadores para escolha dos

parâmetros de usinagem, que são usados sem muitos critérios, gerando programas NC com avanço e rotações constantes e forçam o uso de valores conservadores. O estabelecimento de parâmetros de corte sem conhecimento científico pode ocasionar resultados inesperados como o desgaste ou quebra prematura de ferramenta, um maior tempo de usinagem e ainda assim não alcançar o nível de acabamento e a exatidão desejados provocando alteração da integridade superficial do molde (IMANI *et al.*, 1998).

A tecnologia HSC aplicada ao fresamento têm incrementado as taxas de remoção de cavaco, porém a diminuição da vida da ferramenta com esse incremento parece ser uma barreira para um uso econômico dessas atuais tecnologias (ABELE , 2003).

A aplicação desta tecnologia por completo necessita do desenvolvimento de novos materiais de ferramentas para fabricação de moldes e matrizes de maneira a aumentar a vida. O conhecimento dos parâmetros ideais de corte para esses novos materiais, assim como a melhor forma de executar o corte, são características básicas que possibilitaram a redução de tempo e custos na construção dos mesmos.

1.1 Objetivos

De maneira geral, este trabalho objetiva oferecer uma contribuição à indústria de moldes e matrizes que utilizam HSC para usinagem de aços ferramentas no estado endurecido. Tem como objetivos específicos:

- Avaliar a usinagem com fresas de topo esférico, do aço AISI WNr 1.2367 temperado e revenido com 50-52HRC, utilizado na construção de moldes de conformação para trabalhos à quente, de maneira a conhecer as melhores condições de corte. Assim, poderá contribuir para gerar uma base de dados e informações para amenizar a dualidade entre o uso da tecnologia HSC e o uso da usinagem convencional verificando a viabilidade e as limitações do processo.
- Uma caracterização da rugosidade, considerada como parâmetro principal de fim de vida da ferramenta. A rugosidade é fundamental na resposta do processo, pois além de mostrar o resultado final em termos de qualidade superficial, é uma das resultantes de todas variáveis de entrada do processo (ÇOLAC *et al.*, 2005).
- Por último este trabalho procura, ainda, entender como alguns parâmetros de usinagem afetam a qualidade superficial, no fresamento de superfícies planas. A hipótese deste enfoque é mostrar que considerações geométricas do corte não são suficientes para prever o resultado final das alturas de cristas deixadas pela ferramenta de topo esférico, fato comum de se encontrar em catálogos de fabricantes de ferramentas e *softwares* de CAM.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi estruturado e formatado seguindo as normas para trabalhos científicos da EESC-USP, procurando produzi-lo de forma a proporcionar uma leitura objetiva e concisa, para tanto foi estruturado em seis capítulos, como segue abaixo e, após estes seis capítulos, têm-se as referências usadas neste trabalho seguida dos anexos:

- **Capítulo 1** – Introdução – Neste capítulo tem-se uma breve apresentação deste trabalho e sua abrangência;
- **Capítulo 2** - Revisão Bibliográfica - Contempla, além dos assuntos relacionados à parte experimental, assuntos relevantes ao conhecimento da tecnologia de usinagem em altas velocidades de corte e seu estado da arte e sua aplicação na fabricação de moldes e matrizes;
- **Capítulo 3** – Procedimentos experimentais - Uma descrição detalhada dos equipamentos e procedimentos usados, com o objetivo de propiciar a reprodutibilidade dos ensaios realizados;
- **Capítulo 4** – Resultados e Discussões - Mostram os resultados das medições na forma de gráficos para uma análise qualitativa da rugosidade e também por imagens microscópicas para uma melhor compreensão do processo de corte;
- **Capítulo 5** – Conclusão – Neste capítulo estão sintetizadas as considerações extraídas dos resultados e análises microscópicas;
- **Capítulo 6** - Sugestões de trabalhos futuros – Este último capítulo contempla assuntos que enriqueceriam este trabalho ou são interesses surgidos durante as pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de corte dos metais

2.1.1 Mecanismo de formação e quebra do cavaco

Não existe uma teoria específica que explique detalhadamente a formação do cavaco, existem modelos teóricos, baseados no corte ortogonal do metal, para simplificação e compreensão das condições de corte nas pesquisas em laboratório, e modelos empíricos que também não conseguem fornecer uma visão clara da formação do cavaco (IMANI *et al.*, 1998). O corte ortogonal é aquele normal à direção de corte e à direção de avanço (TRENT, 1991).

No corte dos metais essas simplificações não propiciam a total compreensão do corte. O contato entre a ferramenta/metall e os movimentos necessários à formação do cavaco, geram fenômenos diversos durante o corte, como: forças contrárias aos movimentos, calor, fadiga, tensão de compressão, tensão de cisalhamento, atrito, etc. Durante esse contínuo ou não, contato ferramenta/metall, promovido por movimentos ativos denominados movimentos de corte, de avanço e efetivo, temos a remoção de material e a formação do cavaco (DINIZ *et al.*, 2001).

Para Gorczyca (1987), “A seqüência de formação do cavaco tem sido considerada como uma força concentrada atuando nos grãos sendo cortados, colocando-os em um estado de deformação que provoca um fluxo plástico”. Um modelo simplificado do corte ortogonal é mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – (a) Modelo simplificado da formação do cavaco e (b) relação geométrica entre avanço e espessura

Fonte – adaptado de Gorczyca (1987)

Segundo Kovac e Sidjanin (1997), no mecanismo de formação do cavaco, existem zonas de cisalhamento e formação de vazios em torno de inclusões não deformáveis e, durante este processo de ruptura e propagação, tem-se efeitos positivos como a eliminação do cavaco, entretanto tem-se efeitos indesejáveis na integridade da superfície como vazios e camadas deformadas.

Para Hoffmeister *et al.* (2001), existe uma grande deformação plástica na região entre a peça e a ferramenta, gerando uma orientação angular no fluxo de saída do cavaco dividindo-o em camadas sobrepostas. Esta deformação gera uma espessura do cavaco maior que o avanço de corte ($t_1 < t_2$) e a energia necessária à deformação provoca um aumento da temperatura que é retirado na sua maior parte pelo cavaco. Observando a Figura 2.1 e a relação geométrica observa-se que o ângulo de saída “ γ ” tem grande influência sobre o ângulo de cisalhamento “ ϕ ”.

Existem ainda outras fontes de geração de calor, além da deformação na região próxima à ponta da ferramenta, como atrito entre o deslizamento do cavaco formado e a superfície de saída e o atrito entre a superfície de incidência da ferramenta e a superfície usinada da peça, que formam o ângulo de folga

principal “ α ” (FERRARESI, 1977). Na Figura 2.2, vê-se como é a distribuição da temperatura na região de corte.

Figura 2.2 – Distribuição da temperatura na ponta de uma ferramenta de metal duro

Fonte - DINIZ *et. al.* (2001)

O aumento excessivo da temperatura pode “soldar” parte do material na superfície de saída do cavaco, formando a aresta postiça, que desgasta precocemente a ferramenta e altera a integridade superficial da peça acabada, ou ainda, em combinação com os elementos da cobertura da ferramenta, remover parte dessa cobertura facilitando o aparecimento do desgaste de cratera.

Merchant (2003) criou um modelo matemático para o processo de corte contínuo do metal, que influenciou o desenvolvimento dos *softwares* de CAM e outros *softwares* de manufatura. Na usinagem em altas velocidades de corte, NING *et al.* (2001) e Kovac & Sidjanin (1997) sugerem que o comportamento da formação do cavaco nem sempre segue o modelo de Merchant. Em seu estudo Ning (2001), no fresamento HSC do aço ferramenta H13 com ferramenta de ponta esférica, posicionada normal à superfície da peça, ele classificou o cavaco em quatro tipos como segue:

Cavaco de forma I - estável

É um cavaco de dupla curvatura em forma de cone devido à geometria da ferramenta, onde a ponta da ferramenta está em contato com a peça e a aresta de corte toca a peça em diferentes regiões, estando sujeita as diferentes forças.

Para um material considerado, os cavacos terão sempre a mesma forma e tamanho.

Figura 2.3 - Geometria da ferramenta topo esférico e área de contato ferramenta-peça

Fonte - Ning (2001)

Na região da ponta da ferramenta, próxima ao centro, o diâmetro será tão pequeno que não ocorrerá nessa região o cisalhamento e sim o esmagamento (Figura 2.3), deteriorando a qualidade da superfície (NEVES, 2002). Isto explica por que a forma do cavaco não é um cone completo (Figura 2.4). No centro da ferramenta a velocidade de corte é zero, o ideal é que a ferramenta fique inclinada em relação a normal da superfície, numa posição em que ocorra o corte efetivo (SCHULZ, 1995).

Figura 2.4 – Cavaco estável em forma de cone e a aparência da superfície

Fonte - Ning (2001)

A formação do cavaco estável considerando-se um processo de corte estável ocorre no momento em que a aresta de corte toca a peça, o cavaco move-se sobre a superfície de saída da ferramenta e começa a se enrolar quando toca o fundo da cavidade de saída, terminando no momento que a aresta sai do material (NING *et al.*, 2001). A alta temperatura gerada no corte é praticamente transferida toda para o cavaco, sendo que no lado de baixo do cavaco a temperatura será maior, devido mais à alta deformação do processo que ao atrito na saída do cavaco. Isto pode ser verificado pela cor do cavaco, geralmente mais escura na ponta devido à oxidação causada pela alta temperatura.

Segundo Toh (2005) há diversas fontes de calor durante o corte, na interface ferramenta/peça na zona primária de cisalhamento, na interface ferramenta/cavaco na zona secundária de cisalhamento e na face de contato com a superfície de folga. A maior parte do calor gerado, de 80% a 90%, é transferido para o cavaco enquanto de 10% a 15% do calor é transferido para a peça. Entretanto, com altas velocidades, a taxa de transferência do calor para o cavaco aumenta e conseqüentemente reduz a transferência para a ferramenta e para a peça.

Em seus experimentos, Ning *et al.* (2001) analisou quimicamente o cavaco e verificou que não houve transferência do material da cobertura para o cavaco, indicando que o atrito é insignificante. O tipo de desgaste predominante foi o desgaste de flanco, sendo maior onde a velocidade de corte é maior.

Figura 2.5 – Movimento da ferramenta no cavaco estável ACB

Fonte - Ning (2001)

Cavaco de forma II - *chatter*

É o cavaco formado de um corte não estável e ocorre quando a aresta de corte vibra durante a rotação da ferramenta, quando é estabelecido plenamente o “*chatter*” (fenômeno de vibração do conjunto máquina-ferramenta-peça).

Durante o corte de um dente, a aresta de corte não permanece em contato constante com a peça, ela salta para fora da peça quando cisalha um cavaco, e retorna para formar outro cavaco, de forma cíclica, até a aresta de corte deixar a peça, formando múltiplos cavacos, de tamanho e forma idênticos; na Figura 2.6 podemos observar que o corte ocorre quando a linha sólida intercepta a linha tracejada.

Figura 2.6 - Movimento da ferramenta e área na formação do cavaco tipo *chatter*

Fonte - Ning (2001)

A superfície acabada terá aparência brilhante e opaca alternadamente como na Figura 2.7, apresentando um padrão, que sugere que a vibração da ferramenta seja de período e amplitudes constantes.

Figura 2.7 - Cavaco *chatter* em forma de agulha e aparência da superfície

Fonte - Ning (2001)

Cavaco de forma III - crítico

É um cavaco não totalmente segmentado como o tipo II, ele é formado por elementos conectados, como mostra a Figura 2.8, já que a aresta de corte gera apenas um único cavaco durante o período de contato. Nota-se que a superfície também tem aparência diferente do caso anterior.

Figura 2.8 - Cavaco crítico e aparência da superfície

Fonte – Ning (2001)

O cavaco apresenta pequenas áreas com concentração de deformações, consequência de vibração auto-excitada, acompanhada de variações cíclicas em espessuras não deformadas, ou seja, o cavaco possui uma variação periódica de

espessura, devido ao fato de que a vibração não é suficiente para forçar a ferramenta a perder contato com a peça (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Movimento da ferramenta e área em corte na formação do cavaco tipo crítico

Fonte - Ning (2001)

Cavaco de forma IV – severo

É o cavaco obtido através da utilização de uma profundidade de corte muito maior do que aquela que formaria um cavaco estável de forma I (Figura 2.10). Apesar de ter a forma parecida com um cavaco do tipo I, nota-se uma expansão horizontal do cavaco sem ocorrer o enrolamento, apresentando marcas de compressão na superfície, provenientes do movimento da aresta de corte.

Figura 2.10 - Cavaco severo e aparência da superfície

Fonte - Ning (2001)

Figura 2.11 - Movimento da ferramenta e área na formação do cavaco tipo severo

Fonte - Ning (2001)

Para Schulz *et al.* (2001), a mudança na forma do cavaco no processo de torneamento, de contínua a segmentado é dependente de vários parâmetros. O tratamento térmico e o tipo de microestrutura do material usinado são importantes na segmentação. O aumento da velocidade de corte e da velocidade de avanço incrementam a severidade dessa segmentação. A tecnologia de corte usada, ascendente/descendente, também tem influência na formação do cavaco. Entretanto, nos experimentos, verifica-se que o fator dominante no tipo de cavaco são as propriedades microestruturais, e que os parâmetros de usinagem como a velocidade de corte e as taxas de avanço determinam o grau de segmentação.

Dolinšek *et al.* (2004) também cita que a segmentação e morfologia do cavaco é resultado de variáveis dependentes das características mecânicas, térmicas e químicas do material da peça, dos parâmetros de corte, das mudanças de características na zona primária de cisalhamento e sua interação com a zona secundária, das mudanças das condições tribológicas e do comportamento dinâmico do sistema máquina-ferramenta-peça. O aumento da velocidade incrementou a segmentação do cavaco e diminuiu sua espessura e ainda propiciou um alívio térmico no material.

Essas variações também foram observadas por Hoffmeister *et al.*, (2001). Na usinagem da liga Ti6Al4V, independente da teoria escolhida, teoria do cisalhamento catastrófico ou teoria da formação periódica, a formação do cavaco se deu em duas fases distintas. Na primeira fase, o material sobre a superfície de saída aumenta à medida que a aresta de corte penetra, até o momento em que se

inicia o cisalhamento. Na segunda fase, o segmento de cavaco é empurrado para fora sob efeito de um novo nível de cisalhamento. A passagem de uma fase para outra é o momento mais importante para o entendimento da segmentação do cavaco, pois é o início da falha.

2.1.2 Forças na usinagem

A força total de usinagem, ou simplesmente força de usinagem (F_u) é a resultante de várias componentes de força: força de corte (F_c), força de avanço (F_f), força de apoio (F_{ap}) e força de profundidade (F_p), mostrados de forma tridimensional na Figura 2.12, consideradas como forças que a peça exerce sobre a ferramenta, ou seja, são forças que agem em direção e sentido sobre a ferramenta.

Figura 2.12 - Componentes ortogonais das forças de corte no fresamento

Fonte - Diniz (2001)

Essas forças estão divididas em forças ativas e forças passivas de usinagem. Forças ativas são aquelas descritas sobre o plano de trabalho e contribuem para a potência de usinagem e as forças passivas são aquelas descritas em um plano perpendicular ao plano de trabalho e afetam a ferramenta na sua deflexão elástica, que pode, dependendo da intensidade, provocar vibrações no sistema.

A força de usinagem não pode ser medida, pois não se conhece com precisão sua direção e tão pouco seu sentido. Por isso se trabalha com suas componentes, projetadas em planos ortogonais e em direções conhecidas (DINIZ *et al.*, 2001).

Segundo Gorczyca (1987), as forças de usinagem podem ser representadas num sistema cartesiano, como na Figura 2.13. A componente X, chamada de F_x , é a força de avanço F_f , que é a medida de resistência que a ferramenta encontra na direção de avanço. A componente Y, chamada de F_y , é a força de corte F_c , que é a medida de resistência que a ferramenta encontra no sentido de corte, e por fim, a componente Z, chamada de F_z , é a força de profundidade F_p , que é a medida de resistência que a ferramenta encontra no sentido da profundidade de corte a_p .

Figura 2.13 – Forças X, Y e Z atuando na ponta da ferramenta

Fonte – adaptado de Gorczyca (1987)

Durante o processo de corte, a ferramenta sofre efeito de tensão, principalmente compressiva, mas às vezes de cisalhamento, a partir do plano de cisalhamento que se reduz ao longo da superfície de saída de diversas maneiras – exponencialmente, parabolicamente, ect (BRAGHINI, 1998).

Para Gomes (2001), formular uma equação que leve em conta todas as variáveis influentes na força de usinagem ainda não é possível no atual estado de conhecimento da usinagem. Entretanto, cita que grande parte dos trabalhos na área de usinagem são baseados nas pesquisas de Kienzle e Kronenberg (1966), contudo, devem ser consideradas como uma solução aproximada, em vista das divergências de resultados práticos e teóricos.

A força de corte (FERRARESI, 1977) é dada pelo produto da pressão específica de corte (K_s) e a área da seção do cavaco (A), mostrada na expressão abaixo:

$$F_c = K_s \cdot A$$

Entretanto, vários autores concordam que K_s é dependente do material da peça, mas não é diretamente proporcional, mostrando que além da tensão de ruptura do material (σ_r), outros parâmetros influenciam a pressão específica de corte, como o grau de recalque e o tipo de estrutura do material. Quanto à secção do corte, que é o produto do avanço (f_z) pela profundidade de corte (a_p), a pressão específica de corte diminui com o aumento da secção. Isto principalmente pelo aumento do avanço, que proporciona um aumento do fluxo de material diminuindo o coeficiente de atrito (μ). A velocidade de corte v_c é outro fator que influencia a pressão específica de corte, que tende a diminuir com o aumento da velocidade. Outros fatores também influenciam a pressão específica de corte como os ângulos da ferramenta, condições de lubrificação, etc (DINIZ *et al.*, 2001).

Quanto ao tipo de cavaco, se contínuo ou segmentado, não mostrou influência nas forças de corte na usinagem da liga AlZnMgCu 1.5. Entretanto a tecnologia de corte concordante ou discordante mostrou-se bastante influente (SCHULZ *et al.*, 2001).

Na usinagem com fresas de topo esférico, posicionadas normais à superfície, Souza (2004) verificou em seus experimentos que quando o centro da ferramenta está na região de corte tem-se uma usinagem pouco eficiente e as

forças de corte tendem a dobrar o valor. “A qualidade da superfície usinada também fica comprometida onde a ferramenta corta com seu centro”.

Para Wang *et al.* (2004), a geometria em hélice da aresta de corte das fresas, provoca uma mudança constante e dinâmica do sentido das forças de usinagem. Como resultado disso, a força de corte resultante é o vetor soma dessas forças que ocorrem no gume de corte ativo, a cada instante do corte.

2.1.3 Usinabilidade dos metais

“De um modo geral, usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão” (FERRARESI, 1977).

A usinabilidade é medida por um valor comparativo, assim é utilizado como referência o aço AISI B1112 com dureza Brinell 179-229, atribuindo a este material o índice de usinabilidade I.U. de 100%, quando torneado a uma velocidade de corte $V_c=54\text{m/min}$, avanço $f_z=0,178\text{mm/rot}$ e utilizando-se ferramentas de aço rápido (composição química de 18%W, 4%Cr, 1%W) com dureza 63-65HRc. A partir do Índice de Usinabilidade – I.U. de 100% do aço AISI B1112, o *The Independent Research Committee on Cutting Fluids*, da AISI, estabeleceu o I.U. para diversos materiais, ferrosos e não-ferrosos.

Pode-se ainda entender usinabilidade como a capacidade de um material de aceitar usinagem, pode-se dizer que um mesmo material é fácil ou difícil de usar, dependendo do critério utilizado, fato muito comum na indústria de formação de cavaco (TRENT, 1991). Ou a falsa idéia de que usinabilidade está ligada somente à dureza ou a resistência mecânica do material (DINIZ, *et al.* 2001), embora Poulachon, *et al.* (1998) avalie que é a dureza a principal propriedade no mecanismo de formação do cavaco e conseqüentemente a usinabilidade. Um material pode ser considerado fácil ou difícil de usar dependendo das condições de usinagem que foi submetido. Segundo os autores citados acima, usinabilidade de um material deve ser mensurada segundo um critério que leve em conta as propriedades do processo como: a vida da

ferramenta, forças de corte, produtividade, acabamento superficial, temperatura e forma do cavaco.

Diferentemente de outras grandezas, não existe uma unidade de medida para usinabilidade (FERRARESI, 1977), devido à enorme variedade de fatores combinados como: envolver mais de um material – ferramenta/peça, fluido refrigerante, a diversidade de materiais, suas características e evolução e, o envolvimento de considerações econômicas. O I.U. deve ser utilizado com cautela devido ao grande número de variáveis envolvidas e/ou aos critérios utilizados, por exemplo, a utilização de outro tipo de ferramenta como as de metal duro ou cerâmicas, podem alterar o índice, ou que pequenas variações na composição química da peça, ainda que se mantenham dentro da tolerância da norma, podem ser suficientes para se obter variações.

Dentre os critérios para avaliação da usinabilidade, a vida da ferramenta talvez seja aquele que mais implique em custos e afete as demais condições. Para Godoy (2003) a vida útil de uma ferramenta de corte pode ser entendida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente até que se atinja um critério previamente estabelecido. Um dos critérios de fim de vida utilizados é a profundidade da cratera (K_T), definida para materiais convencionais pela norma ISO 3685/93, que determina um valor máximo (em função do avanço) para a profundidade da cratera localizada na superfície de saída da ferramenta. Desta forma os critérios de vida da ferramenta de corte são medidas bidimensionais e não levam em conta que variações por desgaste em uma superfície são medidas tridimensionais. Têm-se ainda outros tipos de desgastes que serão citados na seção 2.3.2 (Vida útil e desgaste de ferramenta).

Segundo Diniz *et al.* (2001), o método de medição da usinabilidade mais aceito é o de longa duração onde o material é usinado até o fim da vida útil da ferramenta ou até um valor determinado de desgaste da ferramenta (V_{C20} – 20 min ou V_{C60} – 60 min), em diferentes velocidades de corte. A fórmula abaixo para o cálculo do índice de usinabilidade mostra a relação entre o material ensaiado e o padrão, que pode ser também o V_{C60} .

$$I.U. = \frac{V_{C20(material_ensaiado)}}{V_{C20(pad\tilde{r}\tilde{a}o)}}$$

Existem ainda os ensaios de curta duração, onde sob condições forçadas de usinagem, a ferramenta é forçada a um desgaste prematuro ou ensaios baseados na força de usinagem ou rugosidade da peça.

Diversas variáveis estão envolvidas na determinação da usinabilidade de um material, tais como: o material da peça, a máquina-ferramenta (características como rigidez estrutural, potência entre outras), o tipo de operação, a ferramenta de corte, o fluido, os dados de corte, etc (SANDVIK, 1994). Quanto ao material da peça e suas propriedades, podemos fazer diversas considerações. Os elementos de liga presentes nos aços aumentam ou diminuem a usinabilidade, conforme a tabela 2.1 abaixo, o conhecimento dos elementos de liga nos diz bastante sobre a usinabilidade. Além disso, certos elementos químicos da ferramenta podem ter uma afinidade com o material da peça sendo usinada que facilita a formação de aresta postiça e compromete a integridade da superfície da peça.

Tabela 2.1 - Efeitos dos elementos de liga sobre a usinabilidade

Afeta negativamente	Afeta positivamente
Mn	
Ni	Pb
Co	S
Cr	P
V	
C < 0.3%	C 0.3%-0.6%
C > 0.6%	
Mo	
Nb	
W	

Fonte – Sandvik (1994)

Outra característica que traz indícios sobre a usinabilidade é a estrutura metalográfica (quantidade e tipos de inclusões, homogeneidade, tamanho dos grãos) e tratamento aplicado. Uma estrutura martensítica é difícil de usinar, mas uma estrutura perlítica dependendo da relação de tamanho da ferrita-cementita, pode ser tão difícil quanto. A esferioidização transforma o grão em forma esférica, diminuindo as tensões internas e melhorando a usinabilidade; para aços com

carbono abaixo de 0,5% a normalização é suficiente para melhorar a usinabilidade. O cromo, presente em muitos aços ferramentas, facilita o endurecimento na têmpera na formação de uma estrutura martensítica, diminuindo a capacidade de usinar.

A usinagem de materiais endurecidos, acima de 42 HRc, por processos de corte, se tornou possível com o desenvolvimento de novas ferramentas, tecnologias e equipamentos. Apesar dessa evolução, o custo das ferramentas requeridas para o corte de materiais endurecidos, como as PcBN ou cerâmicas, de custo extremamente altos, são um obstáculo ao trabalho, que envolve altas temperaturas e pressões na zona de corte, grandes variações de forças, fadiga na superfície da peça usinada, desgaste ou quebra da ferramenta, materiais pouco homogêneos (SANDVIK, 1994).

Dentre os aços para construção mecânica, segundo Sokolowski *et al.* (2003) existem inúmeros métodos para a melhoria da usinabilidade. O método mais conhecido e utilizado é a adição de enxofre ao aço, que conduz à formação de sulfetos de manganês na matriz. Essas inclusões possuem baixo ponto de fusão e alta deformabilidade, tendo um efeito positivo na usinabilidade, pois causam um efeito lubrificante na aresta de corte e facilitam a quebra do cavaco na zona de cisalhamento. Outros métodos utilizam a adição de elementos como selênio, chumbo, telúrio e bismuto. Entretanto, na maioria das vezes, a melhoria da usinabilidade é acompanhada da queda de outras propriedades. Em particular, podem ser prejudicadas as propriedades de resistência à corrosão, ductilidade e tenacidade e soldabilidade.

Sandvik (2000) cita que inclusões não metálicas como os óxidos têm efeito muito negativo na usinabilidade com prejuízo para vida da ferramenta. Cita também que apesar do aumento da usinabilidade propiciada pelos sulfatos, altos valores de enxofre prejudicam a obtenção uma boa qualidade superficial.

Na fabricação de moldes e matrizes, utilizando-se a tecnologia HSC, o critério mais comum para se avaliar a usinabilidade é, segundo Toh (2004), a rugosidade superficial, sendo que esta textura superficial é uma importante resposta do processo.

2.2 Fresamento

2.2.1 Generalidades

O fresamento, ou o processo de remover cavacos pelo ato de fresar - do latim *frésus*, part. pas. de *frendère* 'quebrar com os dentes, mastigar, triturar, quebrar, moer' - é um processo de fabricação, definido pelo pesquisador Ferraresi (1977) como: “processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes”. Processo que pode ser tangencial ou frontal à superfície da peça, ou ambos.

Segundo Diniz *et al.* (2001), este processo é caracterizado pelo movimento de corte gerado pela rotação da fresa – ferramenta de corte – que gira em torno do seu eixo, e o movimento de avanço, geralmente da peça, que é fixada sobre a mesa da máquina - a fresadora. É um processo muito versátil, principalmente pelo fato de existirem variados formatos de fresas (Figura 2.14) que, combinado com as possibilidades de movimentos das fresadoras, podem executar formas variadas de peças e substituir diversos processos de usinagem como o brochamento externo, aplainamento e retificação.

Figura 2.14 – Tipos de fresas e formas de superfícies

Fonte – Sandvik (2000)

As máquinas-ferramentas de fresar, assim como o fresamento, são classificadas de acordo com a posição da árvore, ou seja, temos fresadora e

fresamento vertical para árvore vertical e fresadora e fresamento horizontal para árvore horizontal. E existem máquinas que perfazem ambos os casos.

No fresamento, têm-se os sentidos de corte concordante e discordante. Uma maneira de se verificar o sentido de corte é pela espessura inicial e final do cavaco. Para tanto vamos definir o ângulo de contato do dente ϕ , “que é o ângulo entre uma linha radial da fresa que passa pelo ponto de contato da aresta peça e uma outra linha radial que passa pelo ponto onde a espessura do cavaco - h_d - formado é zero” (Figura 2.15).

Figura 2.15 - Sentidos de corte no fresamento (a) concordante (b) discordante

Na Figura 2.15 (a) observa-se que, quando o ângulo ϕ vai de $h_d =$ zero ao $h_d =$ máximo, temos o sentido concordante, ou seja, a espessura do cavaco h_d tem o valor máximo na entrada do dente da fresa e espessura zero na saída do dente da fresa; na situação inversa - Figura 2.15 (b) - tem obviamente o sentido discordante. Nos softwares de CAM encontraremos o fresamento concordante com os nomes: *downmilling*, *downcut* ou *climb*, e o fresamento discordante como *upmilling* ou *upcut*.

Para Klocke e Krieg (1999) se na estratégia de usinagem em desbaste de cavidades de materiais temperados houver mudanças constantes no sentido de fresamento, haverá a ruptura prematura da aresta de corte.

É aconselhável que se use o sentido concordante, principalmente para fresas de topo longas. No estado endurecido, a ferramenta tem dificuldade de iniciar o corte no sentido discordante, pois quando a aresta toca a peça, tem-se um atrito excessivo e ocorre deformação plástica na região de contato até que se inicie a formação do cavaco com os valores mais altos de k_s (DINIZ *et al.*, 2003).

Já no corte concordante, como a aresta de corte “vê” a maior seção do cavaco de frente, o corte se inicia mais facilmente, já que a espessura do cavaco influencia k_s , que diminui à medida que o cavaco cresce.

Quando se usa o corte discordante, um aquecimento excessivo é obtido na ferramenta devido ao elevado atrito gerado para formar o cavaco a partir de espessura zero e também as forças radiais são consideravelmente altas neste sentido de usinagem, afetando negativamente os rolamentos do eixo árvore.

O fresamento com ferramentas de topo esférico (*ball nose*), tem características particulares, como o fato da espessura do cavaco ser variável. Este formato de fresa permite transições suaves entre os passes e o esforço de corte é gradativamente distribuído na aresta (SANDVIK, 2000).

2.3 Ferramentas de corte

2.3.1 Materiais das ferramentas de corte

No desenvolvimento dos processos de usinagem, as ferramentas de corte são as que têm o mais intenso desenvolvimento. Segundo Ferraresi (1977), desde a utilização de ferramentas de aço carbono temperado, passando pelo aço rápido desenvolvido por Taylor e White, o metal duro desenvolvido por Voigtlander e Lohmann e produzido pela empresa Friedrich Krupp A. G, até o uso de ferramentas de diamante policristalino e as modernas coberturas para ferramentas, passamos a usinar uma peça que demoraria 100 minutos em menos de um minuto. Se o aço rápido foi a grande descoberta no século passado, seguido do metal duro, a velocidade de desenvolvimento atual está extremamente acelerada, mas sem tantos sobressaltos e atrelado à melhoria da produtividade (Sandvik, 1994).

Segundo Gorczyca (1987) as condições de corte e o desempenho esperado é que dirá com quais materiais a ferramenta de corte deve ser fabricada, visto a influência dos materiais no desempenho da ferramenta. As ferramentas de corte trabalham sob condições extremas de tensões, temperatura e abrasão, por isso os materiais com os quais ela é construída devem ser capazes de suportar essas condições sem perder suas características, como a

resistência à abrasão, absorção de choques, dureza a alta temperatura e baixa resistência ao atrito.

As novas tecnologias de corte como o HSC e o HPC, a usinagem a seco ou a usinagem com mínima quantidade de lubrificante - MQL e novos processos requerem ferramentas especiais para suportar condições muito severas. Além disso, as ferramentas de corte devem combinar propriedades opostas como a dureza e tenacidade, além da necessidade de serem quimicamente estáveis. Ter essas três características básicas leva a necessidade de ferramentas de materiais combinados, substratos, camadas e coberturas de diferentes combinações de materiais e métodos de sua fabricação (BYRNE *et al.*, 2003).

Sucintamente tem-se abaixo uma descrição de materiais de ferramentas de corte mais utilizadas atualmente e suas principais características e avanços tecnológicos, segundo Diniz *et al.* (2001), Byrne *et al.* (2003) e Coelho *et al.* (2006).

O metal duro, produzido pela metalurgia do pó, usa geralmente o tungstênio combinado com cobalto. O tamanho do grão e as porcentagens dos elementos é que determinaram as propriedades das ferramentas. Um dos maiores avanços foi à utilização de grãos ultrafinos, a partir de 0,2 μm , que proporcionaram uma melhor uniformidade e maior compactabilidade. Atualmente, o desenvolvimento está na fabricação de ferramentas com gradientes de elementos, fases e tamanho de grãos, na região próxima à superfície. Isto possibilita uma alta resistência superficial a altas temperaturas influenciando levemente a microestrutura do substrato.

O uso das ferramentas de Cermet está crescendo devido à aplicação em usinagens a seco, pois juntamente com a estrutura de carbonetos sinterizados tem uma fase cerâmica, que proporciona uma alta dureza mesmo em elevadas temperaturas, além de ser quimicamente mais estável. Entretanto sua aplicação em HSC ainda é restrita pelo fato de ter uma resistência mecânica inferior à do metal duro, limitando as taxas de avanço.

As ferramentas cerâmicas têm excelentes características como dureza a quente, resistência ao desgaste e difusão química. Entretanto, apesar dos avanços como o uso de compósitos de micro grãos de carboneto de silício que proporciona grandes ganhos de resistência mecânica, seu uso em HSC é muito

restrito, devido a menor resistência aos choques, se comparada ao metal duro e a baixa condutividade térmica que dificulta a transferência de calor.

As ferramentas de Nitreto cúbico de Boro policristalino - PcBC – vem sendo aplicadas cada vez mais devido ao fato de possuir praticamente todas as propriedades necessárias ao corte, se considerarmos as possibilidades de cobertura de sua superfície.

Esses materiais, entre outros, contam ainda com diversas possibilidades de cobertura superficial, que possibilitam melhorias tribológicas e outras propriedades adicionais ao substrato.

2.3.2 Vida e desgaste da ferramenta

Como o fresamento é caracterizado como um processo de usinagem intermitente, os choques mecânicos são os principais fatores desencadeantes de avarias, como quebras, lascamento ou trincamento, das superfícies de folga e saída nas ferramentas de corte.

Através do controle de diversos fatores numa operação de usinagem, pode-se saber quando a ferramenta deve ser substituída e estabelecer o limite econômico de uma ferramenta, utilizando-a ao máximo e prolongando sua vida.

Para Silva *et al.* (2002) a ferramenta de corte é a variável que afeta mais criticamente o bom desempenho da usinagem, principalmente na usinagem HSC. Os principais fatores que proporcionam um melhor desempenho do processo, segundo os autores são: seleção do material da ferramenta, geometria da ferramenta, método de usinagem, velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, etc. O controle desses parâmetros pode prolongar a vida da ferramenta e tornar o processo viável.

Segundo Gomes (2001):

“A influência que cada parâmetro exerce na vida de uma ferramenta de corte é variada. Deste modo, para a obtenção de parâmetros de corte com máximo rendimento da ferramenta de corte, é necessário o conhecimento dos efeitos dos mesmos”.

Os fatores que determinam o limite de desgaste de uma ferramenta são vários. Sucintamente, segundo Diniz *et al.* (2001), a ferramenta deve ser

substituída quando: os desgastes forem elevados e indique falha catastrófica; os desgastes comprometerem tolerâncias e/ou acabamento; a elevação da temperatura devido ao desgaste leve a perda do fio de corte e, o aumento da força de usinagem devido aos desgastes interfira no funcionamento da máquina.

A norma INTERNATIONAL STANDARTIZATION FOR ORGANIZATION – ISO (1997), recomenda e estabelece para ferramentas de metal duro, aço-rápido e cerâmicas, níveis padrões de desgaste de flanco na ordem de:

Desgaste de flanco médio, $VB = 0,3 \text{ mm}$;

Desgaste de flanco máximo, $V_{b\text{máx}} = 0,6 \text{ mm}$;

Vieira e Ezugwu (2001) em seus ensaios com ferramentas de metal duro, concluíram que a diferença de desgaste da ferramenta com e sem uso de fluídos de corte diminui com o aumento da velocidade de corte, chegando a ser quase imperceptível a partir de valores de velocidade de corte específicos para cada material usinado, sugerindo que a temperatura não tem tanto efeito sobre o desgaste da ferramenta.

O calor gerado pelo processo de corte dos metais e suas implicações na vida da ferramenta e na integridade da superfície não têm se mostrado um grande problema, devido ao uso de fluídos refrigerantes. Entretanto, os elevados custos com estes insumos e seu manuseio, a crescente consciência ecológica e o rigor da legislação ambiental têm provocado uma mudança no uso desses fluídos. Tecnologias como a usinagem a seco ou o uso de mínima quantidade de lubrificante MQL (pulverização de óleo em um fluxo de ar comprimido), direcionado a região em corte, tem sido desenvolvidas e aplicadas com sucesso.

No fresamento, a aplicação de fluído em abundância e o corte interrompido provocam choques térmicos que levam a diminuição da vida da ferramenta. Em seu trabalho de fresamento de um aço ferramenta endurecido a 51-53 HRc, Rael e Diniz (2005) verificaram que, o uso da tecnologia MQL apresentou resultados muito atrativos para a vida da ferramenta de corte, em relação à usinagem a seco, e ainda melhores se comparados com o uso de fluído em abundância. Resultados atrativos no uso da tecnologia MQL também foram obtidos por Brandão *et al*, (2006) na furação do aço AISI H13 com dureza de

55HRc, verificando redução da força de avanço e momento torçor comparado ao uso de fluido em abundância e sem uso de fluido.

Segundo Schulz *et al.* (2001), além da tendência do uso do corte a seco ou o uso da MQL, os avanços em revestimentos de ferramentas de corte tem se mostrado como uma tecnologia que apresenta resultados positivos na redução do desgaste das ferramentas de corte. Em seus experimentos, sugere que a adoção de revestimentos com compostos lubrificantes, além de facilitar a saída do cavaco devido à redução do coeficiente de atrito, evita que excessivo calor gerado pela usinagem, em especial a HSC, seja transferido para o substrato da ferramenta.

Os principais desgastes (Figura 2.16) são:

Desgaste frontal - VB – é verificado na superfície de folga. Este desgaste acontece principalmente por excesso de atrito ou baixa resistência ao desgaste da ferramenta, limitando a vida da ferramenta pelo acabamento e dimensões da peça usinada insatisfatórios.

Desgaste de cratera ou profundidade de cratera (KT), é verificado na superfície de saída, acontece principalmente pela adesão e transferência das micro asperezas para o cavaco, em função das altas temperaturas desenvolvidas, além da ocorrência de difusão que altera as propriedades originais do material na superfície da saída.

Figura 2.16 – (a) Desgaste frontal e (b) desgaste de cratera

Fonte – Sandvik (2000)

A figura 2.17 (BRINK¹, 1997 *apud* QUIRINO, 2000) mostra os mecanismos geradores dos desgastes da ferramenta durante a usinagem em função da velocidade e da temperatura de corte.

Figura 2.17 - Componentes do desgaste frontal de uma ferramenta

Fonte - Quirino (2000)

Onde :

A = Deformação da aresta de corte

B = Abrasão mecânica

C = Cisalhamento da aresta postiça de corte

D = Difusão intermetálica

E = Oxidação

F = Desgaste resultante

Em baixas velocidades, partículas do cavaco, sob a pressão de corte na zona de aderência, mantêm este contato sem movimento relativo um espaço de tempo suficiente para se aderirem à superfície de saída da ferramenta, formando a aresta postiça de corte. Ciclicamente, esta aumenta gradualmente e se rompe, de forma que partes da aresta postiça cisalhada, extremamente endurecidas, removam partículas da superfície de folga da ferramenta, aumentando muito o desgaste frontal e prejudicando o acabamento superficial da peça. Esta saída de partículas da aresta postiça de corte ocorre com freqüência, sendo diretamente

¹ BRINK, R. (1997). **Manufacturing aspects for coated tools**. Switzerland: Balzers Aktiengesellschaft. *Apud* QUIRINO, J.B. (2000). **Controle de vida de ferramenta caracol – parâmetro técnico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

proporcional à velocidade de corte. Com o aumento da velocidade de corte e conseqüentemente da temperatura, alcançasse a temperatura de recristalização do material do cavaco e a partir deste ponto, este fenômeno reduz-se, pois com a formação de novos grãos no cavaco, não existe mais a possibilidade de encruamento do mesmo, que é fundamental para a formação da aresta postiça.

Wang e Liu (1999) sugerem que o aumento no desgaste de flanco promove um aumento na temperatura gerada no corte, entretanto, com o desgaste, há uma diminuição da transferência de calor para a peça. Em HSM, Ning (2001) também verificou o aumento da temperatura com o aumento da velocidade de corte e também com o aumento da profundidade de corte a_p . Em velocidades mais altas, os fatores críticos são: desgaste por abrasão, difusão e oxidação.

Ko *et al.* (2001) estudou diferentes ângulos de posicionamento de uma fresa *ball nose* em relação a superfície a ser usinada e sugere que há um desgaste excessivo no centro de uma ferramenta *ball nose* quando posicionadas normais à superfície devido ao fato da velocidade de corte ser nula no centro. Entretanto esta é uma situação inevitável no fresamento com máquinas de 3 eixos.

2.4 Rugosidade

A textura superficial (CALIL e BOEHS, 2004) pode afetar significativamente varias propriedades como atrito, desgaste, transmissão de calor, resistência mecânica, fadiga, e fluxo de fluidos. Especificamente para moldes e matrizes estas propriedades estão intimamente ligadas ao seu desempenho em serviço. Portanto, a rugosidade nos moldes e matrizes é extremamente importante e deve ser avaliada por seus parâmetros externos, assim como pela sua integridade superficial.

2.4.1 Definições

Uma superfície ideal que não contenha erros de forma ou textura secundária (erros macrogeométricos) e de acabamento ou marcas de fabricação (erros microgeométricos) não existem na realidade, são uma referência (Camargo, 2002). Após os processos de usinagem, tem-se uma superfície efetiva que pode ser medida e avaliada com relação com a superfície ideal. Se passar-se um plano perpendicular à superfície efetiva, tem-se o perfil efetivo da peça usinada. Deste perfil efetivo, depois de medido e filtrado para minimizar os erros macrogeométricos, obtém-se o perfil de rugosidade.

A rugosidade pode ser enquadrada, segundo a norma DIN 4761 como um desvio de conformação de 3ª ordem, que são desvios cíclicos ou não, nos quais a relação entre a distância entre cristas e a profundidade é da ordem de 100:1 a 5:1; e como desvio de 4ª ordem, que são estrias ou escamas originadas de fenômenos específicos durante o processo de formação do cavaco. Portanto são os objetos deste estudo.

Os desvios de 1ª e de 2ª ordem são aqueles, relativos à forma em toda extensão do corpo e com relações de amplitude muito maiores, respectivamente. Os desvios de 5ª e de 6ª ordem são aqueles, respectivamente, relativos à constituição da estrutura e de constituição da matéria

(CAMARGO, 2002 e ÇOLAC *et al* 2005). Geralmente ocorre a sobreposição de um ou mais tipos de desvios na formação do perfil.

A rugosidade de uma superfície usinada pode ser avaliada por vários parâmetros que levam em conta uma ou mais características da superfície, como o comprimento da rugosidade (1), o comprimento da ondulação (2), a amplitude das cristas (3), a amplitude da ondulação (4) e sua orientação (5), como mostrado na Figura 2.18 (CAMARGO, 2002).

Figura 2.18 – Elementos de uma superfície usinada

Fonte - Camargo (2002)

Destes parâmetros que medem as diversas características da superfície, os que medem a amplitude da rugosidade são os mais utilizados na indústria. Segundo Camargo (2002), o parâmetro R_a (*Root Mean Square*) é o mais utilizado e aceito, por ser aplicável a maioria dos processos, por filtrar grandes variações que alterariam fortemente o valor medido e também por ser utilizado como indicação do estado de superfícies por equivalência a classe de rugosidades, como na norma NBR8401/1984.

A rugosidade R_a , segundo ÇOLAC (2005) e COELHO *et al.* (2006), é a altura da área entre o perfil de rugosidade e uma linha média ou a integral dos valores absolutos de altura do perfil no comprimento de medição (l_m), como na Fórmula 2.1 abaixo:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} f(x) dx \quad [2.1]$$

Çolac (2005) cita ainda que diferentes perfis podem ter o mesmo valor de rugosidade R_a , como mostrado na Figura 2.19.

Figura 2.19 – Diversos perfis com mesma rugosidade R_a

Fonte - Camargo (2002)

Existem outros parâmetros de medição que fornecem informação dos valores reais de altura entre os picos e vales do perfil de rugosidade, como os parâmetros R_z , $R_{máx}$, e R_t . O parâmetro R_z é a média aritmética de 5 valores de maiores picos e vales dentro do comprimento de amostragem (l_e). O parâmetro $R_{máx}$ é o valor de maior altura crista/vale entre cinco valores medidos dentro do comprimento de medição. O valor R_t é o valor da rugosidade total ou a medida entre o maior e o menor ponto dentro do comprimento de medição. Existem ainda outros parâmetros como o R_q e R_{3z} (CAMARGO, 2002).

2.4.2 Fatores influentes na rugosidade

O acabamento superficial, segundo Çolac *et al.* (2005), é um fator importante para se avaliar a qualidade do produto. Os parâmetros de corte como

a velocidade, avanço, profundidade de corte, forças, etc, as características do material sendo usinado e da ferramenta afetam o resultado final em termos de rugosidade, como pode ser visto no diagrama espinha de peixe Figura 2.20.

Dolinšek *et al.* (2004) e Ozcelik e Bayramoglu *et al.* (2005) também sugerem que a qualidade de um molde tem como indicador principal a rugosidade, além da precisão dimensional e integridade superficial após a usinagem. As características tribológicas e de escoamento do material dentro do molde são diretamente dependentes da qualidade superficial.

Çolak *et al* (2005) também concordam que a melhoria da rugosidade promove uma melhoria de certas características como diminuição do atrito, diminuição da fadiga, desgaste e conseqüente aumento da vida útil, melhor capacidade de distribuir e reter lubrificantes e melhor capacidade de aceitar coberturas superficiais, ou seja, atributos extremamente importantes para moldes.

Figura 2.20 – Fatores que influenciam na rugosidade

Fonte – adaptado de ÇOLAC *et al.* (2005)

Para Toh (2004), na usinagem do aço ferramenta H13 com 52HRC de dureza, o sentido de corte também influenciou na rugosidade, sendo que o sentido de corte concordante resultou em uma textura bastante ruim com cristas irregulares, além de ter obtido maiores valores de força de corte e deflexão da

ferramenta. O melhor resultado de rugosidade foi obtido empregando-se sentido de corte discordante e com trajetória de ferramenta em sentido único, na vertical, independente das condições de corte.

Segundo Korkut & Dornetas (2005), o aumento da velocidade de corte proporcionou, em seus experimentos, uma redução da rugosidade na usinagem de faceamento, conforme mostra a Figura 2.21. Este fato foi verificado por Souza (2004), que ainda constatou uma diminuição da força de corte com aumento da velocidade de corte.

Figura 2.21 – Redução da rugosidade superficial com o aumento da velocidade de corte

Fonte - adaptado de Korkut e Dornetas (2005)

Em HSC, as interações entre ferramenta e superfície são diferentes em relação à usinagem convencional, provocando alterações microestruturais na superfície que modificam as propriedades e a qualidade da superfície acabada. Os efeitos térmicos e mecânicos provocados pelo processo de corte alteram os passos laterais e subsequentes. O aquecimento gerado pela deformação plástica na formação do cavaco não é dissipado suficientemente rápido do material, o que leva a uma expansão térmica e uma compressão plástica na superfície gerando uma tensão residual. Estas influências das propriedades da superfície podem alcançar espessuras entre 15µm a 60µm dependendo do material e do tipo de usinagem utilizado. Nestas profundidades, esta mudança altera o comportamento de formação cavaco no acabamento e conseqüentemente a rugosidade final (SCHULZ, 2001).

Com altas taxas de remoção do cavaco, o processo de corte torna-se mais estável. Nesta situação, segundo Elbestawi *et al.* (1997) em seus ensaios utilizando ferramentas de PcBN na usinagem do aço H13 endurecido, a integridade e a qualidade superficial não são significativamente afetadas. Interessante salientar que, especificamente com ferramentas *ball nose* de PcBN, com um pequeno desgaste na ponta, conseguiu-se resultados melhores que com ferramentas novas, pois, segundo os autores, o corte perfeito de uma ferramenta nova resulta em um perfil de crista perfeito aumentando a rugosidade final. Entretanto, Ozcelik e Bayramoglu (2005), citam que, geralmente o aumento do desgaste da ferramenta promove um aumento da rugosidade.

Outro aspecto importante foi verificado por Souza (2004) que quando o centro da ferramenta está na região de corte tem-se uma usinagem pouco eficiente, instável e as forças de corte tendem a dobrar o valor. “A qualidade da superfície usinada também fica comprometida onde a ferramenta corta com seu centro”.

A falta de rigidez da ferramenta quando se usa uma relação comprimento em balanço/diâmetro da ferramenta (l/D) muito grande é outro fator que influencia diretamente no acabamento, principalmente em altas rotações. Quando esta relação é maior que 10, temos uma situação severa (KECELJ *et al.* 2004). O autor sugere que se monte a ferramenta com o menor balanço possível ou, pelo menos, $l/D < 5$, o que colabora para evitar a quebra de ferramenta.

Segundo Ramos *et al.* (2003), a estratégia escolhida no software de CAM para o acabamento da superfície afeta a rugosidade. Em seus experimentos na usinagem de uma hélice a estratégia de 3D *offset* obteve a menor rugosidade. O autor sugere que a correta escolha da estratégia e o sucesso da usinagem dependem fortemente da habilidade dos operadores de *softwares* de CAD/CAM.

2.4.3 Geometria da rugosidade com fresas esféricas

No acabamento de superfícies planas utilizando fresas de ponta esférica, Chen *et al.* (2005a) cita que não tem-se apenas a superfície final acabada formada geometricamente pela seção das pautas de trajetória da ferramenta.

Como mostrada na Figura 2.22, duas formas teóricas existem, a primeira forma chamada de crista-1 e o segundo tipo, chamada de crista-2.

A crista-1 é o perfil da fresa de ponta esférica sobreposto a uma distância igual a profundidade de corte radial. A crista-2 é formada a partir de um material residual deixado nos espaços entre sucessivos giros da aresta de corte durante o movimento de avanço. A rugosidade é afetada por ambos tamanhos, da crista-1 e da crista-2, e podemos perceber que a superfície final é uma geometria tridimensional e a rugosidade é uma relação entre os valores de crista-1 e de crista-2. Portanto os valores dos parâmetros f_z e a_e afetam diretamente a rugosidade.

Entretanto, muitos *softwares* CAM oferecem a possibilidade de se programar o valor de crista-1 e para superfícies planas usa esse valor para determinar o valor de a_e . Mas isto não considera que o valor de f_z também afeta a rugosidade final.

Figura 2.22 – Geometria tridimensional da rugosidade

Os *softwares* de CAM deixam para o usuário a obrigação de escolher o valor certo de f_z . Frequentemente a escolha do valor f_z está focada na redução do tempo de corte, aumentando o avanço e diminuindo a qualidade da superfície. Como mostrado na Figura 2.23, Chen *et al.* (2005a) propôs um modelo teórico para calcular o ponto de contato “C” de uma aresta de corte durante o movimento

dinâmico de uma fresa *ball nose* parcialmente mergulhada no material. Chen *et al.* (2005a) empregou simulação computacional para confirmar que é possível se prever a textura da superfície acabada. Isto considera ambos os parâmetros f_z e a_e na rugosidade final.

Figura 2.23 – Geometria de contato de uma fresa *ball nose* parcialmente imersa

Fonte - adaptado de Chen *et al.* (2005a)

Para Chen *et al.* (2005b) a tecnologia HSC possibilitou, com o aumento da velocidade de corte e avanço a possibilidade de redução da profundidade de corte radial (a_e) sem o aumento do tempo de corte. Isso permitiu uma redução da rugosidade pela diminuição da altura das cristas remanescentes do processo.

Na Figura 2.24(A) temos a usinagem convencional de acabamento utilizando uma fresa com raio esférico entre 5 e 10mm, $a_p=0,5$ e 1mm, $f_z=0,1-0,3$ mm/rot e 6000rpm.

Na Figura 2.24(B) tem-se uma usinagem HSC em acabamento utilizando fresas com diâmetros menores, raio esférico entre 1 e 3mm, $a_p=0,1$ mm e 0,3mm, $f_z=0,1$ mm/rot e 0,3mm/rot e 30000rpm.

Nota-se que na figura 2.24(B) a redução de pauta obtida promoveu diminuição das alturas de crista, ou seja, para um mesmo avanço e com fresas de diâmetros menores consegue-se um resultado melhor obtido com mesmo tempo de corte.

Figura 2.24 – Comparação entre usinagem convencional e HSC na altura de cristas

Fonte - adaptado de Chen *et al.* (2005a)

Em superfícies curvadas, os sistemas CAM pós-processam os dados CL em arquivos CNC; neste processo, a trajetória da ferramenta é dividida em um grande número de segmentos de reta. Segundo Boujelbene (2004), isso gera uma superfície facetada e conseqüentemente uma rugosidade maior, aumentando o volume de material a ser removido posteriormente. Um modelo proposto pelo autor, chamado C^0 *continuous path*; segue uma trajetória tangencialmente contínua a superfície, dessa forma, tem-se uma trajetória suave que não formará uma superfície facetada, melhorando a textura superficial.

Pode-se ver como a geração de trajetória contínua pode melhorar a textura da superfície (Figura 2.25-a), se comparado à geração de trajetória por seguimentos de reta (Figura 2.25-b), atualmente ainda muito utilizada.

Figura 2.25 – Influência do caminho da ferramenta na textura, (a) trajetória de segmentos de retas, (b) trajetória de tangenciamento contínuo

Fonte - Boujelbene *et al.* (2004)

Existem outros modelos de geração de trajetórias, como o “*spline*” estudado por Souza (2004), onde se conseguiu um menor valor de rugosidade, além de outros benefícios como um menor tamanho de arquivos NC, desvios cordais menores e boa precisão geométrica. Entretanto em seus estudos, verificou que a oscilação do avanço influenciou fortemente na rugosidade, devido ao fato de reduções de velocidade provocada pelo tempo de resposta da máquina ser inferior ao tempo de processamento da máquina em HSC, provocando oscilações nos movimentos da máquina.

2.5 Moldes e matrizes

2.5.1 Manufatura

Os moldes ou matrizes usados nos processos de conformação e injeção de plásticos podem ser definidos como ferramentas usadas para reproduzir as formas geométricas de um produto. Essa ferramenta é constituída de várias partes mecânicas formando um conjunto (VOLPATO, 1993), mas basicamente tem-se duas partes, cada umas dessas partes contém uma gravura (macho ou fêmea), que quando unidas formam uma cavidade onde será produzida a peça. A vida útil desse molde pode ser definida pelo número de vezes que ele é capaz de reproduzir o produto, mantendo as características geométricas e dimensionais dentro das respectivas tolerâncias.

Segundo Altan *et al.* (1999): “A seleção adequada do material da matriz e da técnica de fabricação determina, de uma forma geral, a vida útil da ferramenta de conformação”. Além da correta seleção do material, o uso de uma técnica adequada de fabricação da matriz determina a vida do molde e, que o fim da vida é determinado por uma série de fatores como: “mudanças dimensionais devido ao desgaste ou deformação plástica, deterioração do acabamento superficial, interrupção de lubrificação, trincas ou quebras”. Após o fim da vida, pode-se recuperar esse molde da seguinte forma: rebaixar o bloco do molde ou preencher a região da gravura com uma “almofada” de solda e em seguida refazer a gravura. Se não houver essas possibilidades o molde deve ser descartado.

Essa cavidade do molde possui características especiais como o ângulo de saída ou extração do produto, arredondamento dos cantos devido às características do processo, dimensões maiores que o produto devido à dilatação térmica, sobremetal para os produtos que serão usinados e uma linha de partição onde será feita a divisão do molde.

No passado, os processos para a fabricação de moldes eram limitados, pois os processos de usinagem tradicionais (torneamento, fresamento e retificação) não eram capazes de produzir a complexidade de contornos das

cavidades e usinar muitos dos materiais utilizados na fabricação de moldes (VOLPATO, 1993).

Muitas matrizes de forjar eram construídas por cunhagem, cravação ou *hobbing*, onde uma peça de aço-ferramenta no formato do produto é forçada a penetrar num bloco aquecido, que se tornaria a matriz. Posteriormente, a confecção da matriz era feita por meio de fresadoras copiadoras, onde um modelo padrão de madeira ou resina, ou gabaritos, construídos artesanalmente, eram colocados paralelamente ao bloco da matriz e um apalpador, hidráulico ou eletroeletrônico, corria sobre o modelo e reproduzia as formas usinando o bloco da matriz (Figura 2.26). Nestes dois últimos casos, os trabalhos manuais posteriores eram extremamente longos e demorados e, conseqüentemente, a qualidade dimensional e de forma eram dependentes exclusivamente da habilidade dos ferramenteiros (TAKEUCHI *et al.*, 1989).

Figura 2.26 – Fresadora copiadora

Fonte – Sandvik (2000)

O surgimento e a aplicação da tecnologia de eletroerosão por penetração ou EDM – *electrical discharge machining* - aplicada na construção de moldes e matrizes trouxeram vantagens em relação aos métodos anteriores como: melhor qualidade na reprodução, repetibilidade, diminuição dos ajustes manuais e a possibilidade de usinar o molde endurecido. Nesse processo, um eletrodo, feito geralmente de cobre ou grafite e polarizado negativamente, é avançado contra o bloco do molde, polarizado positivamente, e a certa distância é provocada uma descarga elétrica que terá um efeito erosivo no molde; a repetição desse efeito a

uma frequência e corrente elétrica controladas produzirá a gravura do eletrodo no molde, mas na forma inversa, ou seja, se o eletrodo for macho produzirá uma gravura fêmea ou vice versa. Este processo tem um alto nível de consumo de energia e temos a necessidade de um monitoramento constante do eletrodo e do processo para se evitar danos à integridade da superfície da peça (KECELJ *et al.*, 2004).

No início, a utilização da tecnologia de eletroerosão por penetração continuou dependente da habilidade humana, pois os eletrodos utilizados, com o formato do produto, continuavam sendo feitos de forma semi-artesanal, ou seja, produzia-se o modelo padrão e a partir dele se copiava os eletrodos por fresamento. Esta etapa de confecção do eletrodo não agrega valor ao produto.

Temos também a fabricação de moldes por usinagem eletroquímica, semelhante a eletroerosão, porém com taxa de remoção de material maior, mas com desgaste imprevisível do modelo; e ainda a fundição de matrizes de aço-liga a base de níquel ou cobalto, difíceis de usinar (ALTAN *et al.*, 1999). E também a utilização do corte a *laser*, para execução de pequenos e complexos detalhes, onde os pulsos de laser são controlados para vaporizar o material em camadas de aproximadamente 5 μm (ALTAN, 2001).

Segundo Volpato (1993), o setor de fabricação de moldes, que utiliza os processos convencionais descritos acima, está limitado a três principais problemas: “os longos prazos de entrega, a falta de precisão e o custo elevado do molde”. Se levarmos em conta a possibilidade e/ou necessidade de alterações no produto, todos esses processos, ou parte deles, teria de ser executado novamente, elevando ainda mais o já alto custo.

A evolução na construção de moldes e matrizes foi muito acelerada no século passado com o advento dos sistemas computacionais CAD e CAM e das máquinas CNC, que propiciaram excelentes resultados no setor de moldes e foram vistos como uma resposta a crescente necessidade do mercado de se projetar e alterar produtos, com formas cada vez mais complexas (SANT’ANA, 2002). Essas tecnologias foram primeiramente aplicadas na confecção dos eletrodos (linha A da Figura 2.27), que puderam ser usinados e reproduzidos em máquinas CNC e suas formas, primitivas ou livres (*free forms*), modeladas por computador. Assim sendo era desnecessária a confecção do modelo e dando total liberdade à criação de formas complexas, reduzindo

enormemente o ciclo de manufatura e tendo um ganho de qualidade de superfície, forma e dimensão do molde. Contudo, o processo de eletroerosão continua sendo um processo caro e demorado. Convencionalmente ainda, (ALTAN, 2001), a cavidade, construída e programada em CAD/CAM, é desbastada por usinagem, depois tratada termicamente, o que pode causar distorções, e então é dado acabamento em EDM. Existe ainda o processo onde a gravura é desbastada no estado recozido e após o tratamento térmico e dado o acabamento por fresamento a duro (linha B da Figura 2.27).

A atual tendência é a usinagem completa da gravura (linha C da Figura 2.27) – desbaste e acabamento em um único “set-up”, diminuindo assim o tempo total de manufatura. Para tanto é necessário o desenvolvimento de técnicas de usinagem capazes de remover grandes quantidades de material no estado endurecido, além da usinagem de cavidades profundas, comuns nos moldes, onde são usadas ferramentas longas e finas. Nestas condições, o desgaste e a possibilidade de quebra da ferramenta de corte são grandes.

Figura 2.27 – Sequência de fabricação de moldes

Fonte - Sandvik (2000)

A usinagem de moldes endurecidos (MILES, 1998) é aquela que produz moldes a partir do tratamento térmico final, retirando-se assim, a etapa de tratamento térmico do meio do processo de usinagem, ou seja, o desbaste e o acabamento são feitos consecutivamente, num único “*set-up*” na máquina CNC. Isto significa uma redução drástica dos tempos de manufatura, por reduzir ou eliminar várias etapas como o acabamento manual e eletroerosão e possibilitando que o bloco de aço-ferramenta receba tratamento térmico antes de iniciar o processo.

A usinagem de aços endurecidos não é a resposta para todo tipo de trabalho, mas se bem aplicada ela pode levar a um ganho significativo. Muitos estudos têm sido realizados a respeito da usinagem a duro, entretanto o custo da ferramenta de corte e seu desgaste excessivo nessas condições de usinagem torna essa economia de tempo muito cara, às vezes inviabilizando-a, tendo-se que recorrer a eletroerosão (KECELJ *et al.*, 2004). No entanto, a importância do êxito no fresamento de moldes endurecidos fica clara com o ganho na velocidade da seqüência do processo, onde o fator competitividade é determinante.

2.5.2 Tecnologias aplicadas - CAE, CAD, CAM, HSC

Diversas siglas, comuns no vocabulário da área de manufatura de moldes e matrizes, merecem uma conceituação nessa altura do trabalho. Com o desenvolvimento dos sistemas computacionais e suas aplicações na engenharia, mais intensamente na década de 70, iniciando-se com os sistemas CAD, diversos sistemas foram surgindo e aplicações específicas para cada um deles levaram a necessidade de agrupá-los segundo sua finalidade.

“As primeiras aplicações de computadores para auxiliar as etapas de engenharia tiveram início na década de 50, quando o Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) iniciou a discussão sobre a tecnologia CAD/CAM” (Souza e Coelho, 2003). Nos anos 80 outros sistemas computacionais surgiram baseados nos sistemas CAD, para integrar as atividades de engenharia, até chegarmos ao CIM – manufatura integrada por computador - onde todo o ambiente fabril é controlado por computador.

A sigla CAD, do inglês *Computer Aided Design*, representa todo sistema computacional ou *software* que tem como função auxiliar o projetista a definir a geometria da cavidade dos moldes, possuindo ferramentas que ajudam a definir características especiais como: linha de partição, ângulos de extração ou saída, expansão térmica, etc. No início, esses sistemas eram capazes somente de fazer representações de elementos simples como retas e arcos, servindo apenas como uma “prancheta eletrônica”. Atualmente, esses *softwares* são capazes, a partir de curvas matematicamente complexas, elaborar superfícies em 3D com as mais variadas e complexas formas - *free forms* - (SCHÜTZER, 2000).

A sigla CAM, do inglês *Computer Aided Manufacturing*, segundo Ahrens (1994), é todo programa capaz, através de especificação dos planos de processo de operações de usinagem, simulação e geração das trajetórias das ferramentas, apoiar a geração de códigos NC para a usinagem do molde. Nestes *softwares* temos, como utilitário, um Pós-processador que transforma o arquivo de trajetória de ferramenta gerado pelo CAM em código NC, específico para a máquina onde será executada a usinagem.

Os softwares CAE, do inglês *Computer Aided Engineering*, ainda segundo Ahrens (1994), trata-se de programas capazes de auxiliar o desenvolvimento e projeto, usando cálculos matemáticos como o Método de Elementos Finitos (FEM). Na fabricação de moldes auxiliam na simulação dos processos de conformação, escoamento e fluxo do material, desgaste do molde, e estimando as tensões, deformações e temperatura (ALTAN *et al.*, 1999).

Entende-se, o sistema CAE/CAD/CAM, como o agrupamento dos módulos ou sistemas descritos anteriormente, formando uma base de dados única e centralizada, às vezes podendo ser oferecidos separadamente ou ainda módulos CAE/CAD ou CAD/CAM. Os módulos de CAD podem fornecer geometrias em arquivos de formatos universais como o IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*), VDAFS (*Verband der Automobil-Industrie*), DXF (*Autodesk Exchange Format*) e estes serem lidos pelos módulos de CAE e CAM de outros fabricantes, porém um sistema integrado com o CAD evita incompatibilidades, erros de transformação e facilita o uso (Volpato, 1993) e (Zeid, 1991).

Figura 2.28 - Fluxograma das tecnologias CAE/CAD/CAM/CNC

Segundo Altan *et al.* (1983): “A tendência parece ser ainda na direção de amplas aplicações desta tecnologia para o processo de simulação, projeto e fabricação de matrizes”. Ainda, que o uso desses sistemas pode ter dois caminhos: o uso para produção do desenho e geração de programas NC para produção de eletrodo ou fresamento direto da matriz, no caso dos sistemas CAD/CAM, ou o uso do sistema CAE/CAD para análise, simulação e previsões dos processos. Para esses sistemas são necessários um *hardware* e um *software*, além de suporte e manutenção desde a implantação.

Atualmente, segundo Souza *et al.* (2003), os sistemas CAM permitem a geração de programas NC para operações de torneamento, eletroerosão e fresamento, que corresponde a sua principal aplicação. Nas operações de fresamento podemos destacar *softwares* CAM para geração de usinagens simples com 2½ eixos de movimentação, usinagens com três eixos, e usinagens mais complexas com até cinco eixos programáveis. A possibilidade de usinagem por diferentes trajetórias de ferramenta, assim como a interface para operação destes sistemas tem se tornado o diferencial na competição entre fornecedores.

No setor de moldes e matrizes, Yue *et al.* (2003) confirma o sucesso da aplicação integrada das tecnologias CAE/CAD/CAM, com redução do ciclo de projeto e fabricação. Porém sugerem que existe necessidade de pesquisas do sistema de forma integrada para criação de “sistemas inteligentes”, onde as informações processadas e analisadas sejam inseridas e armazenadas para criação de um banco dados confiável.

É evidente a necessidade de redução de tempo, a redução do ciclo de vida dos produtos e a busca por mais qualidade. Portanto, o desenvolvimento da tecnologia HSC tornou-se essencial e hoje é considerada como estado da arte na indústria de manufatura, segundo o importante pesquisador alemão Prof. Dr. Eng. Herbert Schulz, depois de muitos anos de incertezas quanto ao seu uso. Os primeiros testes datam de 1930, quando se avaliou particularmente a relação força de corte *versus* velocidade de corte e percebeu-se o acréscimo da temperatura com aumento da velocidade, o método desenvolvido por C. Salomon foi patenteado e concedido a Friedrich Krupp, em 1931, na Alemanha. Mas somente com o desenvolvimento de árvores de alta rotação as pesquisas sobre HSC puderam crescer (SCHULZ, 2001).

Este incremento da velocidade de corte proporciona uma alta produtividade nos processo de corte, melhora o acabamento superficial, aumenta a taxa de remoção de cavacos e dissipação do calor, diminui as forças de corte e possibilita assim a usinagem de materiais endurecidos, como os aços-ferramentas. Por outro lado o incremento no desgaste das ferramentas de corte e as alterações no seu comportamento demonstraram que a questão deve ser vista de forma holística, uma visão ampla das diversas variáveis envolvidas, que já nos anos 80 começaram a ser pesquisadas.

O primeiro instituto de pesquisa na Europa a estudar a usinagem HSC e considerá-la um problema holístico foi o Instituto de Gerenciamento da Produção, Tecnologia e Máquinas Ferramentas (PTW - Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen) da Universidade Técnica de *Darmstadt*, que também avançou nas pesquisas de componentes como eixos árvores de alta velocidade, motores, sistemas de controle de avanços e sistemas CAD/CAM. Mesmo com diversas pesquisas na área, ainda hoje não se tem total domínio sobre a tecnologia HSC e seus fenômenos intrínsecos. Vários fatores envolvidos na usinagem HSC ainda exigem pesquisa como a formação do cavaco em altas velocidades, as variações de forma, os processos térmicos envolvidos, integridade metalúrgica da peça, que evidencia que a tecnologia HSC é um desafio para várias ciências.

Figura 2-29 - Tecnologias na fabricação de moldes/matrizes

Fonte - Fallböhmer *et al.* (1996)

Ecologicamente (Kecelj *et al.* 2004), o uso da tecnologia HSC se destaca em relação ao uso da eletroerosão pelo menor consumo de energia, menor ou nenhum uso de fluidos lubrificantes e/ou refrigerantes, formação de gases e aquecimento. Entretanto, o uso da tecnologia HSC ou EDM não teve ter o caráter competitivo, e sim complementar, dependendo da geometria do molde e usinabilidade do material. Uma informação interessante obtida por Kecelj *et al.* (2004) foi que a vida do molde usinado em alta velocidade foi 30% maior que o molde produzido por EDM.

2.5.3 Estratégias de usinagem para molde e matrizes

Para Wang (1998), ainda é lento o desenvolvimento das estratégias de otimização, para a seleção das condições econômicas de corte no planejamento do processo, se pensamos que há aproximadamente um século Taylor² já reconhecia a importância da máxima remoção de material. A seleção das

² Taylor, F. W. engenheiro americano, que teve como característica mais marcante do seu estudo a busca de uma organização científica do trabalho, enfatizando tempos e métodos, e por isso é visto como o precursor da *Teoria da Administração Científica*.

condições de usinagem e estratégias continuam baseadas na experiência, indicações e recomendações de manuais.

No atual estágio de desenvolvimento de equipamentos e sistemas, seria ingênuo pensar apenas na seleção do avanço f_z e da velocidade de corte v_c para se fazer otimização de usinagem; a quantidade de variáveis envolvidas nos leva ao uso de *softwares* e simulações, que tem se mostrado benéfico, ao invés de se basear em recomendações de manuais.

Os *softwares* oferecem pacotes de estratégias que propiciam soluções globais ótimas, embora isso não seja suficiente para identificar e alcançar os melhores modos com os quais se possam vencer os obstáculos da usinagem de moldes. Ainda segundo Wang (1998), é necessário se desenvolver aplicações com as quais se possam mostrar os efeitos de diferentes estratégias, garantindo assim uma “solução global ótima”.

Como expõe Cavalheiro (1998), o termo “geração automática de trajetórias de usinagem” remete a idéia de que o programador de CAM apenas preencha ou clique em campos no *software*, não revelando a complexa tarefa de manuseio e criação de um bom programa de usinagem.

Segundo Beard (2001), até pouco tempo atrás os programadores de CAM deixavam o próprio *software* decidir a trajetória da ferramenta sem preocupação com a mesma, situação que está mudando rapidamente. Os desenvolvedores de *softwares* de CAM têm se empenhado em conhecer profundamente a usinagem HSC e, a partir de informações coletadas com seus clientes, formarem um banco de dados ou um sistema baseado no conhecimento - *Knowledge Based Systems* - das técnicas mais efetivas de usinagem HSC - *best-practices* -, coletarem variáveis como a deflexão e desgaste das ferramentas e características das máquinas-ferramentas.

A qualidade do molde está diretamente ligada a um bom planejamento. Gastar um maior tempo na elaboração de um bom programa de usinagem certamente será compensado, pois o ganho se dará na sua repetibilidade. Assim, criar um programa rapidamente, sem critérios, muitas vezes baseado em outro programa CAM já existente para outro modelo, terá como resultado um programa de usinagem demorado, e que será futuramente repetido, acumulando assim preciosos tempos de máquina.

Segundo Monreal e Rodriguez (2003), o tempo de usinagem e a qualidade superficial são funções das estratégias de caminho da ferramenta e que existem diversos aspectos a serem considerados como o tipo de movimento – zig-zag, espiral - a orientação do caminho da ferramenta e os movimentos de entrada e saída do material. Ainda segundo os autores, certas estratégias que criam muitas mudanças de sentido ocasionam um aumento no tempo de usinagem, uma vez que a máquina irá acelerar e desacelerar mais vezes; seria possível mensurar o tempo de usinagem se a velocidade de avanço " v_{fa} " fosse constante, o que não ocorre.

Para Beard (2001) talvez o mais importante seja o fato que o caminho da ferramenta seja criado pela pessoa que executa a usinagem, possibilitando assim, que elas mesmas escolham suas próprias estratégias, aquelas que se sintam mais a vontade ao invés de copiar e reproduzir estratégias provenientes da engenharia. O autor cita o Sr. Yigal Ziv, presidente da empresa americana de *softwares Lemoine Multinational Technologies*, que declara: "Pessoas não são máquinas, seus cérebros devem estar envolvidos com o que eles fazem ou então irão perder o interesse".

Miles (1998) sugere que a criação dos programas de usinagem seja feita por especialistas em usinagem com experiência no "chão de fábrica" e que, inclusive, o sistema CAM esteja próximo da máquina, obviamente em ambiente confortável. Assim, os resultados e alterações sejam feitos imediatamente a usinagem. O autor propõe que todas as atividades sejam feitas pelo setor de usinagem, ou seja, desde o modelamento da cavidade até a programação e usinagem, pois só assim se evitaria o modelamento de formas impossíveis de usinar.

2.6 Resumo da revisão bibliográfica

Vê-se que, atualmente (Kovac e Sidjanin, 1997), o processo de formação do cavaco tem sido alvo de diversos estudos, com vistas ao conhecimento deste fenômeno, das inúmeras variáveis envolvidas e em suas diversas circunstâncias, com atenção especial a usinagem de aços endurecidos. A atual e constante necessidade de redução dos ciclos de manufatura e aumento de produtividade e concorrência são incentivos para a busca deste conhecimento. Na construção de moldes e matrizes, a aplicação da tecnologia HSC mostra-se como uma resposta a essa intensa necessidade de redução de *lead time* e a necessidade de fabricação de formas cada vez mais complexas.

O conhecimento do processo de formação do cavaco é intrínseco ao conhecimento e uso da usinagem em altas velocidades, pois não se conhece claramente o regime de corte nesta faixa de trabalho. Nas diversas literaturas consultadas nota-se que a tecnologia de usinagem em altas velocidades, apesar de bastante difundida, ainda requer muito conhecimento, tanto no desenvolvimento das tecnologias envolvidas - CAD/CAE/CAM/CNC, máquinas, ferramentas, etc. -, mas, principalmente no conhecimento da usinagem e dos fenômenos envolvidos (forças, comportamento termoquímico, interações material-ferramenta, comportamento dinâmico do cisalhamento, etc).

Souza (2004) e Boujelbene (2004) concordam que ainda não é possível colocar em uso um molde que foi somente usinado por fresamento, ainda são necessárias etapas posteriores de polimento, principalmente na área de injeção de plásticos. Existe a necessidade de se produzir moldes por fresamento e obter a rugosidade superficial necessária à sua aplicação direta na produção, assim conseguindo uma redução de custos e tempos pela eliminação das etapas de polimento.

Paralelamente ao conhecimento de usinagem, as necessidades de preservação ambiental e uso consciente dos recursos naturais são mais alguns desafios que devem ser vencidos para o sucesso na aplicação da tecnologia HSC. Neste aspecto o uso da mínima quantidade de fluido ou usinagem sem

fluido, a redução dos tempos de usinagem, redução de etapas do processo, menores forças de corte resultando em menor consumo de energia, são alguns aspectos positivos da usinagem HSC.

Dessa forma, o fator limitante de uma usinagem ágil e robusta é a falta de previsão dos resultados quanto à qualidade superficial, que deve ser como a resultante das variáveis do processo de usinagem Çolac *et al.* (2005). Ainda, segundo Çolac *et al.* (2005), é possível aplicar técnicas de simulação computacional que determine o resultado final antes de se executar a usinagem e que é necessário o monitoramento dos parâmetros de usinagem para alimentar um “sistema inteligente” de dados.

Chen *et al.* (2005), desenvolveram sistemas computacionais gráficos capazes de gerar uma visualização tridimensional da textura superficial, antes da usinagem, de superfícies planas utilizando-se fresas *ball nose*. Feng e Li (2001) propuseram um método de geração de trajetória para fresas *ball nose* que mantenham constante a altura de crista. Ko *et al.* (2001) estudaram a geometria de contato das fresas *ball nose* com o material, em diversos ângulos de contato, avaliando que o melhor ângulo é de 15° em relação ao ângulo normal à superfície. Ramos *et al.* (2003) estudaram, entre as diversas estratégias de usinagem de acabamento oferecidas pelos *softwares* de CAM, aquela que produziu a menor rugosidade. Assim, confirma-se quanto é importante o resultado satisfatório da usinagem quanto à qualidade superficial.

Chen *et al.* (2005) comprovaram que, usando fresas *ball nose*, a altura de crista-1, que é função da profundidade de corte radial e do raio da fresa, não é o único fator que influencia a rugosidade, uma vez que considera a ferramenta apenas em rotação. Um segundo tipo de crista, chamado de crista-2, influenciada pelo avanço, compõe a superfície final acabada, mostrando que existe uma inter-relação entre essas cristas e que outros parâmetros de corte também devem ser considerados.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Todos os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Otimização de Processos de Manufatura - OPF, no Núcleo de Manufatura Avançada – NUMA, da Escola de Engenharia de São Carlos-USP.

3.1 Equipamentos

3.1.1 Centro de Usinagem e acessórios

Para os ensaios de fresamento com altas velocidades de corte foi utilizado o centro de usinagem vertical de três eixos HERMLE, modelo C800U (Figura 3.1). A árvore tem rotação máxima de 24000 RPM e potência de 18 kW. Os cursos dos eixos são de 800 x 600 x 500, nas direções X, Y e Z respectivamente.

Figura 3.1 – Centro de Usinagem Hermle C800U

Este centro de usinagem é equipado com um medidor automático do comprimento das ferramentas de corte - *tool setter*- (Figura 3.2a) e um apalpador eletrônico (Figura 3.2b) que faz o referenciamento da peça na mesa da máquina.

Figura 3.2 – Acessórios (a) medidor de ferramentas (b) apalpador eletrônico

Para registro dos ensaios de fresamento, do corpo de prova e acessórios, foi utilizada uma câmera fotográfica digital CANON G6 com resolução de 7.1 *Megapixels* e com zoom ótico de 4x.

3.1.2 Equipamentos de inspeção

A rugosidade foi obtida por um rugosímetro da marca Mitutoyo modelo SJ201. Este equipamento é capaz de fazer medição de rugosidade nos parâmetros R_a , R_y , R_z , R_q e medição da distância entre picos – S_m . Tem a possibilidade de se configurar o valor do comprimento da amostragem (*cut-off*). Para o experimento, o equipamento foi configurado com *cut-off* de 0,8 mm, com cinco repetições; este valor foi determinado por ser comum ao processo de fresamento, por ser um perfil periódico e por se esperar uma distância entre picos – S_m - de 0,1 à 0,32 mm, visto que este valor resulta da exigência de o comprimento de onda limite seja de 2,5 a 8 vezes o valor da distância entre sulcos.

Antes das medições, o rugosímetro SJ201 foi calibrado com o padrão fornecido pelo fabricante e seguindo seu procedimento. Para facilitar o trabalho, o

rugosímetro foi montado em um traçador de alturas, de forma a se manter uma pressão de medição constante, posicionado o apalpador do aparelho numa altura sempre igual em todas as regiões medidas (Figura 3.3). Os valores registrados das medições da rugosidade são a média de pelo menos cinco medições de cada região.

Figura 3.3 – Rugosímetro montado sobre o corpo de prova

Para a avaliação microscópica foi utilizado um microscópio Axiotech da marca Carl Zeiss (Figura 3.4), equipado com uma câmera digital colorida AxioCam MRc5. Nestas avaliações microscópicas foram observadas as texturas da usinagens de todas as regiões em ampliações de 100x, 200x e 500x.

Figura 3.4 - Microscópio e câmera integrada

3.1.3 Ferramentas e corpos de prova

Nos ensaios foram utilizadas ferramentas *ball nose* com diâmetro de 6 mm e cobertura TiAlN do fabricante Sandvik, código R216.42-06030-AK10G 1610 classe K10. Os dados da ferramenta estão na Tabela 3.1 e a geometria da ferramenta na Figura 3.5.

Tabela 3.1 – Parâmetros geométricos da ferramenta de corte

Parâmetros	n° arestas	diâm. ponta	diâm. haste	raio ponta	compr. total	prof. corte max.	compr. aresta	ângulo saída	ângulo hélice	gamma 0
nomenclatura fabricante	Z_n	D_{c2}	d_{m_m}	r_e	l_2	a_p	l_3	α_0	-	γ_0
valor	2	6	6	3	80	10	10	14	35,5	1,5

Figura 3.5 – Geometria da ferramenta utilizada nos ensaios

Fonte – Sandvik (2006)

Durante todos os ensaios, a ferramenta foi mantida com balanço $l = 30$ mm. Foi utilizado um sistema de fixação de ferramenta hidro-mecânico (CoroGrip model 92828). A montagem ferramenta/fixação pode ser vista na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Ferramenta *ball nose* e sistema de fixação de ferramentas hidro-mecânico

Os corpos-de-prova utilizados são de aço ferramenta para trabalho a quente WNr 1.2367 com composição química mostrada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química do corpo de prova (em porcentagem)

C	Cr	Mn	Mo	Ni	V
0,38	5	~	3	~	0,6

O aço ferramenta WNr 1.2367 está classificado na norma AFNOR como Z38CDV53 e na norma DIN como X38CrMoV53. Estes blocos foram tratados termicamente, têmpera e revenimento, é obtve-se uma estrutura martensítica, que pode ser vista na Figura 3.7. A dureza obtida ficou entre 50HRc e 52 HRc, medida no durômetro UH250 marca Reicherter Stiefelmayer segundo a norma DIN EN ISO 6508-1.

Figura 3.7 – Estrutura metalográfica do corpo de prova

Estes blocos possuíam as seguintes dimensões: comprimento de 120 mm, largura de 80 mm e altura de 30 mm (Figura 3.8). As faces, superior e inferior, foram retificadas para eliminarem saliências e produzir um paralelismo entre as faces mais preciso, de forma a se evitar falsos valores de profundidade de corte.

Figura 3.8 – Corpo de prova

3.2 Delineamento dos experimentos

Na usinagem de moldes e matrizes, onde a relação do custo do molde - custo da ferramenta de corte é extremamente grande, a rugosidade mostra-se como um bom parâmetro de controle. A utilização máxima da ferramenta não estaria ligada apenas a um determinado valor de desgaste, mas até onde se consiga manter a qualidade superficial, dimensional e geométrica dentro de valores aceitáveis, independente da condição da ferramenta. Como problemas de qualidade superficial podem ser visualizados mais facilmente, acredita-se que este possa preceder os demais.

Um dos focos deste trabalho é avaliar a influência de alguns parâmetros de usinagem na qualidade superficial, que será considerada como variável de saída do processo. Para tanto um delineamento fatorial foi aplicado para possibilitar se avaliar as interações entre os fatores em estudo. Foram ensaiados 3 níveis de a_e , 3 níveis de f_z e os 2 sentidos de corte, totalizando 18 combinações (3 x 3 x 2). A Tabela 3.3 mostra os valores dos parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

Tabela 3.3 – Delineamento dos ensaios

	Teste N°	crista-1 (μm)	a_e (mm)	f_z (mm/aresta)	Vf_a (mm/minuto)
SENTIDO CONCORDANTE	1	1 μm	0,155	0,05	2400
	2	1 μm	0,155	0,1	4800
	3	1 μm	0,155	0,15	7200
	4	3 μm	0,268	0,05	2400
	5	3 μm	0,268	0,1	4800
	6	3 μm	0,268	0,15	7200
	7	5 μm	0,346	0,05	2400
	8	5 μm	0,346	0,1	4800
	9	5 μm	0,346	0,15	7200
SENTIDO DISCORDANTE	10	1 μm	0,155	0,05	2400
	11	1 μm	0,155	0,1	4800
	12	1 μm	0,155	0,15	7200
	13	3 μm	0,268	0,05	2400
	14	3 μm	0,268	0,1	4800
	15	3 μm	0,268	0,15	7200
	16	5 μm	0,346	0,05	2400
	17	5 μm	0,346	0,1	4800
	18	5 μm	0,346	0,15	7200

A profundidade de corte foi mantida constante em 0,2 mm, nesta condição o diâmetro efetivo - D_e - foi calculado pela Fórmula 3.1:

$$D_e = 2 * \sqrt{a_p(D - a_p)} \quad [3.1]$$

Onde:

- D = diâmetro nominal da ferramenta (mm);
- a_p = profundidade de corte.

Calculando-se obtém o valor $D_e = 2,154$ mm. Portanto, a velocidade de corte $v_c = 162$ m/min, usada nos ensaios, foi limitada pela rotação máxima da máquina, que é de 24000 rpm, inferior à velocidade de corte indicada pelo fabricante da ferramenta de 200 m/min. Porém, deve-se salientar que para aços endurecidos valores de velocidade de corte acima de 150 m/min são considerados valores de altas velocidades de corte (DOLINŠEK *et al.* 2004).

O parâmetro de rugosidade R_z mede a maior altura de pico a vale, em cada uma das cinco regiões dentro do comprimento de amostragem (*cut-off*), e nos fornece a média. Como o perfil de rugosidade é periódico e constante, o parâmetro de rugosidade R_z foi considerado ideal para se medir a altura de crista

Considerando a geometria de contato de uma fresa de ponta esférica, posicionada normal à superfície, em um plano transversal ao sentido de avanço (Figura 3.9), a rugosidade R_z (altura de crista teórica) pode ser calculada pela Fórmula 3.2:

$$R_{z_{teórico}} = \left[r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{a_e}{2} \right)^2} \right] * 10^3 \quad [3.2]$$

Onde:

- r = raio da ponta da ferramenta esférica (mm);
- a_e = profundidade de corte radial (mm).

Entretanto, nos ensaios, os valores de crista-1 foram definidos previamente, e a partir destes, calculados os valores de a_e , do mesmo modo como os softwares CAM geram as distâncias entre as pautas de usinagem.

Assim, os valores definidos de crista-1 (c) foram de 1 μm , 3 μm e 5 μm , considerados como valores de pico a vale, como mostrado em um corte transversal ao sentido de avanço da ferramenta (Figura 3.9). Estes valores de crista-1 foram considerados valores teóricos de rugosidade no parâmetro R_z .

Figura 3.9 - Usinagem de topo em linhas paralelas com a_e constante

Os valores de c citados acima foram utilizados para se calcular a_e pela Fórmula 3.3:

$$a_e = 2 * (c^2 + \sqrt{2 * r * c}) \quad [3.3]$$

Para estes valores de rugosidade, foram calculados os seguintes valores de a_e : 0,155 mm, 0,268 mm e 0,346 mm, respectivamente. Esta fórmula é válida somente para esta condição de ensaio, onde a ferramenta de topo esférico está posicionada normal à superfície sendo usinada.

A rugosidade também foi medida no parâmetro R_a no sentido transversal ao sentido de avanço e comparada com seu valor teórico que, para processo de fresamento com fresas de ponta esférica, geometricamente pode ser calculado pela Fórmula 3.4:

$$Ra_{teórico} = \frac{2}{a_e} \cdot \left[\left(\frac{a_e \cdot r}{2} (1 - \cos \theta) \right) - \left(\frac{r \cdot a_e}{4} \right) + \left(\frac{a_e \cdot r \cdot \cos \theta}{4} \right) \right] \cdot 10^3 \quad [3.4]$$

Onde:

- $\theta = \arcsin.(a_e/2.r)$;
- a_e = profundidade de corte radial (mm).

A Figura 2.22 mostra o sentido de avanço e o sentido transversal ao avanço na geração da rugosidade final, formado pela altura de crista-1 e altura de crista-2 (CHEN et al. 2005a). Portanto esses valores de crista são afetados diretamente por a_e e f_z . Assim os valores de rugosidade, além de serem medidos no sentido transversal ao avanço, foram medidos também no mesmo sentido do avanço para mostrar a influência de f_z .

Para cada “set” de parâmetros foi testado no sentido de corte concordante e discordante, como pode ser visto na tabela 3.3.

A estratégia de usinagem utilizada foi a de passos paralelos, que usa o valor de a_e como distância constante entre pautas (Figura 3.10). Esta estratégia é chamada em alguns *softwares* de CAM como *cmill*, *offset*, *parallel mill*, etc.

Na Figura 3.9 podemos observar os dois sentido de corte.

Figura 3.10 – Sentido de corte (a) concordante e (b) discordante

Para se evitar desvios, os ensaios foram realizados de forma aleatória (Tabela 3.4), assim como a réplica, como segue:

Tabela 3.4 – Ordem aleatória do 1º e 2º ensaio

Ordem das usinagens	1º ensaio	2º ensaio
	Teste N°	Teste N°
1	7	1
2	11	11
3	17	13
4	5	7
5	16	18
6	12	9
7	1	14
8	8	15
9	4	6
10	18	3
11	2	17
12	6	5
13	10	8
14	13	2
15	9	10
16	14	4
17	3	12
18	15	9

As superfícies da ferramenta de corte foram analisadas durante os ensaios utilizando-se o microscópio Carl Zeiss modelo Axiotech. Foi observado foi o desgaste de flanco, segundo a Norma ISO 8688-2 (1989). De acordo com a literatura consultada, o desgaste de flanco é aquele que de acordo com as características do ensaio, é o de maior relevância, entretanto, as demais superfícies foram sempre observadas durante os ensaios para se avaliar o estado da ferramenta de corte para se evitar a influência do desgaste na rugosidade.

Figura 3.10 – Corpo de prova e ferramenta montados para ensaios

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da qualidade superficial

4.1.1 Avaliação da altura de crista-1

A Figura 2.22 mostra o sentido de avanço e o sentido transversal ao avanço na geração da rugosidade final, formado pela altura de crista-1 e altura de crista-2

A rugosidade R_z foi medida no sentido transversal ao percurso de avanço, como visto na Figura 3.9, de forma a se medir a altura de crista-1. Na Figura 4.1 temos um gráfico tridimensional dos resultados das medições para uma análise global da influência dos parâmetros estudados.

Figura 4.1 – Inter-relação entre os parâmetros a_e e f_z na rugosidade R_z

Observando-se o gráfico 4.1 fica claro que existe uma influência significativa do sentido de corte na rugosidade. Utilizando-se o sentido

discordante no acabamento, os valores de rugosidade obtidos são menores que os obtidos na usinagem no sentido concordante para um mesmo valor de f_z .

Para o valor de profundidade de corte radial $a_e=0,155$ mm era esperado, pelo cálculo teórico, que a rugosidade R_z fosse de $1\mu\text{m}$, para $a_e=0,268$ $R_z=3\mu\text{m}$ e $a_e=0,346$ $R_z=5\mu\text{m}$. Portanto neste gráfico percebe-se que em nenhuma das condições, o valor teórico da rugosidade foi alcançado.

Na Tabela 4.1 temos os valores das medições (desvio padrão $s = 1,4$). Cada valor obtido é a média de 5 medições de R_z em cada região. Pode-se observar, pelos valores obtidos a influência do avanço f_z , de a_e e do sentido de corte na rugosidade.

Tabela 4.1 – Valores da rugosidade R_z medidos no sentido transversal ao avanço

rugosidade transversal Rz (μm)						
				avanço/aresta		
				Fz 0,05	Fz 0,1	Fz 0,15
prof. de corte radial	0,155	sentido concordante	1	8,05		
			2		8,95	
			3			8,80
	0,268		4	9,36		
			5		9,71	
			6			8,77
	0,346		7	10,01		
			8		10,09	
			9			10,98
prof. de corte radial	0,155	sentido discordante	10	5,67		
			11		6,30	
			12			7,94
	0,268		13	6,46		
			14		6,04	
			15			7,99
	0,346		16	8,08		
			17		7,68	
			18			8,82

Pelos valores da Tabela 4.1 verifica-se que a influência da profundidade de corte radial é maior que a influência do avanço na formação da rugosidade final.

Dessa forma percebe-se que a altura de crista-1 é predominante na formação da rugosidade, que é extremamente influenciada por a_e . O avanço por aresta influencia também a rugosidade por influenciar a altura de crista-2,

entretanto, o aumento da rugosidade começa a ser sensível a partir do avanço $f_z=0,10$ mm/aresta.

A princípio isto concorda com uma determinação apenas geométrica da altura de crista-1, como se encontra nos softwares de CAM ou com a falsa idéia que se utilizar um valor de avanço baixo melhora o acabamento. Entretanto, para otimização do processo, deve-se considerar a inter-relação dos parâmetros. Durante o processo de formação do cavaco, as rebarbas formadas entre os passes paralelos, alteram o valor da altura de crista-1 e o valor excessivo do avanço deixa material sem ser retirado, como veremos adiante, na avaliação microscópica.

Os valores de rugosidade R_z quando usinado com sentido discordante e com $a_e=0,155$ mm e $a_e=0,268$ mm foram praticamente os mesmos. O valor de rugosidade começa a aumentar a partir de $a_e=0,268$ mm. Assim, nota-se que somente a geometria de contato da fresa *ball nose* imersa no material não define o valor da rugosidade, tampouco a geometria da superfície. Realmente existe a necessidade de uma avaliação tridimensional da superfície. Neste ponto vê-se que há um ponto limitante para se melhorar a rugosidade, ou seja, a redução dos valores dos parâmetros estudados levaria a um aumento do tempo de corte e não resultariam em melhorias da rugosidade.

O sentido de corte discordante em todos os casos apresentou melhores resultados que o sentido concordante. Este fato confirma o que foi verificado por Toh (2004) na usinagem do aço ferramenta H13 com 52HRC de dureza, que ainda verificou um aumento da força e flexão da ferramenta no sentido concordante.

Outros fatores do processo de corte influenciam a rugosidade, como visto na literatura e precisam ser considerados e ensaiados para diversos materiais, avaliando o comportamento das inter-relações entre as variáveis. Isto concorda com as afirmações de Schulz (2001) de que em HSC as interações da ferramenta e superfície provocam alterações na superfície e os efeitos térmicos e mecânicos alteram o processo de formação do cavaco e os passos subseqüentes da ferramenta.

Para uma análise comparativa, a rugosidade foi medida e analisada no parâmetro R_a , por ser o mais usado na indústria para indicação de estados de superfícies segundo a norma NBR 8481/1984.

A Figura 4.3 mostra os resultados dessa medição feita no sentido transversal ao sentido de avanço, ou seja, onde se espera valores maiores de rugosidade.

Figura 4.3 – Rugosidades Ra medidas no sentido transversal ao sentido de avanço

Pode-se observar pequenas variações nos valores de rugosidade Ra com a variação de a_e . Nota-se que usando-se $a_e=0,155\text{mm}$ e $a_e=0,268\text{mm}$, na maioria dos casos, houve pouca variação do valor de Ra, e com $a_e=0,346\text{mm}$ percebe-se algum aumento de Ra. Comparando-se os valores obtidos com o Ra teórico nota-se que o comportamento de crescimento é observado a partir de $a_e=0,268\text{mm}$, o que mais uma vez mostra um imperfeito processo de formação do cavaco neste tipo de fresamento e que, em nenhum caso, conseguiu-se produzir uma rugosidade com valores próximos a rugosidade teórica.

Pode-se observar também que há uma pequena variação nos valores de rugosidade Ra com a variação do avanço.

O sentido de corte discordante foi o que apresentou os menores valores de rugosidade no parâmetro Ra, confirmando essa característica observada nos valores medidos de rugosidade no parâmetro Rz.

4.1.2 Avaliação da altura de crista-2

Para medição da altura de crista-2, a rugosidade foi medida no mesmo sentido do avanço. A Figura 4.2 mostra o gráfico com os resultados desta medição no parâmetro R_z .

Figura 4.2 – Rugosidades R_z medidas no mesmo sentido do avanço

Fica evidente que o avanço é extremamente influente na altura de crista-2, que por sua vez ajuda a compor a rugosidade final do molde. Este fato evidencia definitivamente que somente a consideração geométrica da rugosidade baseada no perfil da ferramenta (crista-1) é insuficiente para determinação da rugosidade.

Ainda, vê-se que com valor $f_z = 0,15$ mm/aresta no sentido concordante, o valor de R_z é maior que os valores medidos no sentido transversal ao avanço.

Nota-se também que, o valor de R_z na maioria dos casos, pouco se altera com a variação de a_e , o que sugere que este parâmetro de corte tem pouca influencia na altura de crista-2.

O aumento da rugosidade R_z com o aumento do avanço confirma que a intensificação do fenômeno cíclico do corte interrompido durante o movimento de rotação e avanço da ferramenta aumenta o volume de material que não é removido nos intervalos do corte das arestas.

A rugosidade R_a foi medida no mesmo sentido de avanço da ferramenta (Figura 4.4), onde se imaginou encontrar valores menores de rugosidade por ser o sentido onde se observa a altura de crista-2.

Figura 4.4 – Rugosidades R_a medidas no sentido do avanço

Pode-se observar que o avanço por aresta tem forte influência na altura de crista-2, influenciando o resultado final da rugosidade, como previsto.

Os valores de rugosidade observados para $f_z=0,05$ mm/aresta e $f_z=0,10$ mm/aresta, nos dois sentidos de corte estão muito próximos, uma variação sensível foi observada somente com uso de avanço de 0,15 mm/aresta.

Neste caso nota-se que a variação de a_e tem muito pouca influência na rugosidade. Este fato era esperado por se medir dentro dos sulcos deixados pela usinagem, ou seja, o apalpador do rugosímetro percorre a geometria no mesmo sentido da velocidade de avanço da ferramenta e a influência de a_e não é percebida pelo equipamento. Neste caso pode-se observar que a medição da rugosidade R_a fornece um indicativo da influência do avanço no processo.

Assim, nas duas medições dos valores de rugosidade no parâmetro R_a (medidos no sentido transversal e no mesmo sentido do avanço) revelam somente alguma influência dos parâmetros de corte. Isso pode ser explicado pelo fato desse parâmetro calcular a área entre o perfil e uma linha média, o que filtra os valores extremos de picos e vales e ainda que fornece o mesmo valor para diferentes perfis de rugosidade como mostrado na Figura 2.19.

Nas duas medições utilizando-se o parâmetro R_a , os valores obtidos de rugosidade foram baixos, entre 0,5 μm e 3,0 μm . Aplicando-se a Norma

NBR8481/1984, pode-se classificar, por equivalência, estes valores entre a classe N5 e N8. Esta classe de rugosidade é a mesma obtida por processos comuns de retificação, assim, segundo esta classificação, o processo de fresamento HSC é eficiente e consegue uma alta qualidade superficial, entretanto para moldes de injeção plástica ou metálica, é ainda insuficiente, como cita Boujelbene *et al.* (2004), o que sugere mais uma vez que deve-se ter cautela na avaliação da rugosidade no parâmetro Ra.

Como cita Dolinšek *et al.* (2004), o principal indicador da qualidade do molde/matriz é integridade superficial e geométrica (rugosidade e precisão dimensional). Neste trabalho, vê-se que, quanto à rugosidade, os parâmetros avanço e profundidade de corte radial e sentido de corte têm grande influência neste resultado implicando diretamente neste indicador, mostrando a importância do conhecimento dos fenômenos da usinagem HSC e da correta utilização dos parâmetros de corte na programação CAM para criação de programas eficientes.

4.2 Avaliação microscópica

A utilização do microscópio em diferentes ampliações possibilitou reconhecer o caminho da ferramenta e analisar as várias texturas geradas nas 18 regiões ensaiadas e os efeitos provocados pela inter-relação dos parâmetros em estudo.

Foi possível verificar o efeito de esmagamento que ocorreu no centro do caminho da ferramenta, onde não houve corte, como observam diversos autores. Na usinagem com ferramentas *ball nose*, a formação do cavaco é muito mais complexa de se analisar do que com outros tipos de ferramenta. Ao longo da trajetória de uma ferramenta *ball nose*, a orientação da aresta de corte é dinâmica e periodicamente trocada durante o movimento de rotação do eixo-árvore e do deslocamento em avanço, ambos responsáveis pela geração da geometria da superfície final. O fenômeno cíclico, citado por Chen *et al.* (2005), pôde ser observado, principalmente onde o avanço foi maior ($f=0,15$ mm/aresta).

Na figura 4.5, temos os aspectos das superfícies usinadas. Observando a usinagem onde se utilizou um avanço $f_z=0,1$ mm/aresta, nota-se que o fenômeno cíclico ocorre com menor intensidade, o que favoreceu um resultado melhor de rugosidade. Já na usinagem com avanço $f_z=0,15$ mm/aresta, a superfície na região onde houve corte efetivo (parte clara em forma de elipse) apresenta um aspecto mais prolongado, o que intensifica o fenômeno de esmagamento na região escura onde o corte não foi perfeito (grifado na cor verde) e a porção de material que não foi removido também é maior.

Figura 4.5 – Aspecto das superfícies usinadas

Na Figura 4.6 observa-se que na área central da ferramenta não aparenta ter um corte perfeito mas um fenômeno de esmagamento.

Figura 4.6 – Microscopia - de superfície usinada (região do ensaio 5)

A aresta de corte no centro da ferramenta não produz um cisalhamento perfeito nesta área e influencia os valores da rugosidade. Este cisalhamento imperfeito no centro da ferramenta fez uma parcela do material ser esmagado e empurrado para fora do centro da ferramenta e não foi removido pela próxima aresta de corte, principalmente com alto avanço ($f_z = 0,15$ mm/aresta).

Nas figuras 4.7 e 4.8, tem-se uma amostra do aspecto típico das superfícies dos 18 ensaios realizados. A Figura 4.7 mostra as superfícies das nove regiões usinadas no sentido concordante e a Figura 4.8 mostra as superfícies das nove regiões usinadas no sentido discordante, seguindo a ordem como descrito na Tabela 3.3. Em todos os casos as marcas deixadas pela ferramenta são bem definidas e mantêm um padrão constante, o que demonstra ausência significativa de vibração da ferramenta.

Figura 4.7 – Aspecto típico das superfícies fresadas no sentido concordante

As regiões claras mostram a trajetória da aresta de corte, as regiões escuras entre os passes laterais (no sentido horizontal), formam os picos de altura de crista-1. Esta formação é constante em todos os casos devido ao uso de passes paralelos (*offset*).

Observando-se a trajetória da ponta de ferramenta *ball nose*, que é mais nítido para os valores de $f_z = 0,10$ mm/aresta e $f_z = 0,346$ mm/aresta em ambas Figuras 4.7 e 4.8, verifica-se a intensificação do fenômeno cíclico, na formação de uma trajetória em formato espiral com passo intensificado com o aumento do avanço.

Figura 4.8 – Aspecto típico das superfícies fresadas no sentido discordante

É importante perceber que nas Figuras 4.7 e 4.8, em todas as regiões usinadas com avanço de 0,15 mm/aresta, pode-se observar que na trajetória da ferramenta, devido à alta velocidade de avanço, tem-se uma aparência de arrastamento da ponta da ferramenta sobre o material. Isto revela que uma porção do material foi deixada, sem ser removida, entre os intervalos do avanço por aresta, prejudicando a rugosidade e o aspecto visual da superfície, indicando a necessidade de demasiado polimento para remoção desse material residual.

A ferramenta de corte utilizada foi monitorada durante os ensaios com avaliação microscópica. Em cada bloco de ensaio, o tempo de corte foi de 176s e o percurso de corte 12020mm, totalizando 352s em corte. Segundo a literatura consultada, para este tipo de usinagem, o tipo de desgaste mais comum de ocorrer é o desgaste de flanco, entretanto nenhum tipo de desgaste foi verificado,

sugerindo que a ferramenta possa ser utilizada num tempo de corte maior e que o fator desgaste de ferramenta não influenciou os resultados dos ensaios.

Como demonstrado na revisão bibliográfica, existem vários trabalhos de investigações a respeito do processo de corte em altas velocidades e muitos desenvolvimentos de modelos matemáticos para simular os processos de usinagem capazes de fornecer previamente o resultado final. Este conhecimento científico deve ser agrupado e integrado e os sistemas computacionais devem ser contemplados com tais informações. Portanto, os sistemas computacionais CAE, CAD e CAM devem ser fortemente integrados e trabalharem alicerçados em um banco de dados cientificamente consistente e alimentados por dados experimentais. Somente assim poderão oferecer apoio as decisões, principalmente quanto à usinagem.

5 CONCLUSÕES

Após o trabalho experimental da influência dos parâmetros f_z , a_e e do sentido de corte concordante e discordante na rugosidade da superfície, pode-se concluir que:

- A textura da superfície usinada é uma geometria tridimensional determinada pela combinação da geometria da ferramenta em corte e as condições de corte, como o avanço f_z , a_e e sentido de corte.
- O parâmetro de rugosidade R_a não é suficiente para representar as características geométricas da superfície, entretanto seu valor pode ser usado como um indicativo para escolha correta dos parâmetros de corte.
- Aplicando a estratégia de corte discordante, em todos os testes houve uma diminuição da rugosidade (R_a e R_z), independente do avanço por aresta ou da profundidade de corte radial.
- A diferença da rugosidade (R_a ou R_z), para os valores de avanço $f_z=0,05$ e $f_z=0,10$ mm/aresta, nos dois sentidos de corte, não é tão significativa. Um aumento significativo da rugosidade ocorreu para o avanço de $f_z=0,15$ mm/aresta. Isto faz concluir que, para as condições testadas, utilizar $f_z=0,10$ mm/aresta é a melhor escolha para obter um bom resultado sem comprometer o tempo de corte e o desgaste de ferramenta.
- O fenômeno de esmagamento do material não ocorre apenas pela velocidade de corte igual à zero no centro da ferramenta, mas por causa do alto avanço também.
- As diferenças de valores de rugosidade R_z medida no sentido transversal ao sentido de avanço, para as regiões usinadas com $a_e=0,155$ mm e $a_e=0,268$ mm não são tão significantes. Assim, o valor $a_e=0,268$ mm é a melhor escolha por economizar tempo de corte e reduzir o desgaste da ferramenta.

- Considerando os dados experimentais deste trabalho, a melhor escolha de parâmetros seria $f_z=0,1\text{mm/aresta}$ e $a_e=0,268\text{mm}$ usando o sentido de corte discordante para o acabamento de superfícies planas no material testado.
- Com relação à conclusão anterior, nota-se que há um ponto limitante para se melhorar a rugosidade, ou seja, a redução dos valores dos parâmetros estudados levaria a um aumento do tempo de corte e não resultariam em melhorias da rugosidade.
- Os resultados mostram que, na usinagem de superfícies planas usando ferramentas *ball nose*, realizar a programação considerando apenas do valor da crista-1, como acontece na maioria dos sistemas CAM, não é suficiente para definir e alcançar as condições de rugosidade desejadas.
- Em todos os testes o valor calculado de rugosidade não foi alcançado, portanto, é necessária a aplicação de novos métodos para predizer o real resultado da rugosidade da superfície, incluindo modelos teóricos.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da rugosidade para superfícies inclinadas e esféricas.
- Estudo comparativo entre o uso de fresas de topo esférico com fresas de topo plano e suas influências no acabamento.
- Avaliação dos efeitos do desgaste da ferramenta na rugosidade e estudo de desgaste de fresas de topo esférico em diferentes ângulos de contato com rotação constante.
- Elaboração de um modelo estatístico de avaliação da rugosidade para diversos tipos de materiais para usinagem.
- Elaboração de algoritmo para cálculo da rotação instantânea, calculado no diâmetro efetivo e aplicação no programa CNC.
- Estudo da viabilidade da integração de modelos matemáticos para cálculo prévio do resultado da rugosidade em *softwares* de CAM.

REFERÊNCIAS

ABELE, E. (2003). HSC “experiences, progresses and potentials”. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA, 8., 2003, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: UNIMEP. p.1-28.

ALTAN, T.; OH, S.I.; GEGEL, H.L. (1999). **Conformação dos metais: fundamentos e aplicações**. Tradução de Reginaldo Teixeira Coelho. São Carlos: EESC/USP.

ALTAN, T.; LILLY, B. (2001). Manufacturing of dies and molds. **Annals of CIRP**, Paris, v.50, n.2, p.405-423.

AHRENS, C.H. (1994). **Características desejáveis para a implantação e o emprego de sistemas CAE/CAD/CAM no setor de moldes de injeção de plásticos**. 204f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1994.

BEARD, T. (2001). **Rethinking mold making**. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/029603.html>>. Acesso em: 28 June 2004.

_____. (2004). **Programming for high speed machining**. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/089708.html>>. Acesso em: 15 May 2004.

BOUJELBENE, M. et al. (2004). Productivity enhancement in die and molds manufacturing by the use of C¹ continuous path. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Amsterdam, v.44, n.1, p.101-107, Jan.

BRAGHINI JUNIOR, A. (1998). **Investigação do desgaste de ferramentas de PCBN e metal duro no fresamento de topo de metais endurecidos**. 106f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BRANDÃO, L.C.; COELHO, R.T.; BRAGA, D.U. (2006). **Influência dos sistemas de refrigeração na furação do aço AISI H13 endurecido com variação da velocidade de corte**. Apresentado ao Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 4., Recife, 2006.

BYRNE, G.; DORFELD, D.; DENKENA, B. (2003). Advancing cutting technology. **Annals of CIRP**, Paris, v.52, n.2, p.483-502.

CAMARGO, R. (2002). **Rugosidade superficial nas operações de torneamento**. Santa Bárbara D'Oeste: SENAI.

CALIL, L.F.P.; BOEHS, L. (2004). A atenção dada pelas empresas à textura das superfícies usinadas. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v.41, n.466, p.142-153, nov.

CAVALHEIRO, A.Z. (1998). **Sistematização do planejamento da programação via CAM do fresamento de cavidades de moldes para peças injetadas**. 212f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

CHEN, J.S.; HUANG, Y.K.; CHEN, M.S. (2005a). A study of the surface scallop generation mechanism in the ball-end milling process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Amsterdam, v.45, n.9, p.1077–1084, July.

_____. (2005b). Feedrate optimization and tool profile for the high-efficiency ball-end milling process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Amsterdam, v.45, n.9, p.1070-1076, July.

COELHO, R. T., EU-GENE N., ELBESTAWI M.A. 2006. A study of wear on coated PcBN tools when turning hardened AISI 4340 using FEM simulation. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Amsterdam, no prelo.

ÇOLAC, O.; KURBANOGU, C.; KAYACAN, M.C. (2005). Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. **Materials & Design**, Oxford, v.28, n.2, p.657-666.

DINIZ, A.E.; NEVES, D. (2003). O fresamento de material endurecido com fresa de ponta esférica - análise da influencia dos parâmetros de usinagem de desbaste na força de corte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2., 2003, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: [s.n.]. 1 CD-ROM.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. (2001). **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber.

DOLINŠEK, S.; EKONOVIC, S.; KOPAC, J. (2004). A contribution to the understanding of chip formation mechanism in the high speed cutting of hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.157/158, p.485-490, Dec.

ELBESTAWI, M.A. et al. (1997). High-speed milling of dies and moulds in their hardened state. **Annals of CIRP**, Paris, v.46, n.1, p.57-62.

ERZURUMLU, T.; OKTEM, H. (2006) Comparison of response surface model with neural network in determining the surface quality of moulded parts. **Materials & Design**, Oxford, v.28, n.2, p.459-465.

FALLBÖHMER, P. et al. (1996). Survey of the die and mold manufacturing industry. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.59, n.1/2, p.158-168, May.

FENG, H.Y.; LI, H. (2001). Constant scallop-height tool path generation for three-axis sculptured machining. **Computer Desing Aided**, London, v.34, n.9, p.647-654, Aug.

FERRARESI, D. (1977). **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher.

GODOY, C. (2003). Análise topográfica por perfilometria do desgaste de cratera em ferramenta de metal duro revestida com TiN. **Revista Matéria**, v.8, n.2, p.145-154. Disponível em:<<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10194>>. Acesso em: 12 set. 2004.

GOMES, J.O. (2001). **Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de alumínio AMP8000 e na liga de cobre Cu-Be**. 179p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GORCZYCA, F.E. (1987). **Application of metal cutting theory**. New York: Industrial Press.

HOFFMEISTER, H.W.; GENTE, A. (2001). Chip formation in machining Ti6Al4V at extremely high cutting speeds. **Annals of CIRP**, Paris, v.50, n.1, p.49-52.

IMANI, B.M.; SADEGHI, M.H.; ELBESTAWI, M.A. (1998). An improved process simulation system for ball-end milling of sculptured surfaces. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Amsterdam, v.38, n.9, p.1089-1107, Sept.

INSTITUT FÜR PRODUKTIONSMANAGGMENT TECHNOLOGIE UND WERKZEUGMASCHINEN (2006). Disponível em:<www.ptw.maschinenbau.tu-darmstadt.de>. Acesso em: 05 June 2006.

INTERNATIONAL STANDARTIZATION FOR ORGANIZATION (1993). **ISO 3685** - Tool-life testing with single-point turning tools. 2nded. Geneva.

KECELJ, B. et al. (2004). Speciality of HSC in manufacturing of forging dies. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.157/158, p.536-542, Dez.

KO, T.J.; KIM, H.S.; LEE, S.S. (2001). Selection of the machining inclination angle in high-speed ball end milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v.17, n.3, p.163-170, Jan.

KOVAC, P.; SIDJANIN, L. (1997). Investigation of chip formation during milling. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v.51, n.1/2, p.149-153, Aug.

KLOCKE, F.; KRIEG, T. (1999). Coated tools for metal cut-features and application. **Annals of CIRP**, Paris, v.48, n.2, p.515-525.

KORKUT, I.; DORNETAS, M.A. (2005). The influence of feedrate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling. **Materials & Design**, Oxford, v.28, n.1, p.308-312.

KRONENBERG, M., 1966. **Machining Science and Application - Theory and Practice for Operation and Development of Machining Processes**. 1st Edition, UK: Pergamon Press.

MERCHANT, M.E.; MOEHRING, S.M. (2003). **An Interpretive review of 20th century US machining and grinding research**. Cincinnati: Techsolve. Disponível em: <http://www.techsolve.org/pdf/Review_of_mc_rsch_MEM_8_20_03.pdf>. Acesso em: 12 oct. 2004.

MILES, A. (1998). **High performance machining**. Cincinnati: Hanser Gardner.

MONREAL, M.; RODRIGUEZ, C.A. (2003). Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling. **Computer-Aided Design**, London, v.35, n.4, p.395-401, Apr.

NEVES, D. (2002). **Uma contribuição ao fresamento de matrizes com fresa de topo esférico**. 142p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

NING, Y.; RAHMAN, M.; WONG, W.S. (2001). Investigation of chip formation in high speed end milling. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.113, n.1/3, p.360-367, June.

OZCELIK B., BAYRAMOGLU M. (2005). The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, no prelo.

POULACHON, G.; MOISAN, A. (1998). A contribution to the study of the cutting mechanisms during high speed cutting of hardened steel. **Annals of the CIRP**, Paris, v.47, n.1, p73-76.

QUIRINO, J.B. (2000). **Controle de vida de ferramenta caracol – parâmetro teórico**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

RAEL, V.; DINIZ, A.E. (2005). Utilização do corte a seco, com MQL e com fluido em abundância no fresamento do aço endurecido. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v.41, n.468, p.58-74, jan.

RAMOS, A.M.; RELVAS, C.; SIMÕES, J.A. (2003). The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.136, n.1/3, p.209-216, May.

SANDVIK COROMANT (1994). **Modern metal cutting** – a practical handbook. Sweden: Sandvik Coromant Technical Editorial Departmentdept.

_____. (2000). **Die & mould making**: aplication guide. Sweden.

_____. (2006). Disponível em:<www.coromant.sandvik.com>. Acesso em: 17 Aug. 2006.

SANT'ANA, F.S. (2002). O uso do CAM na construção de moldes e matrizes. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v.39, n.443, p.138-147, dez.

SCHULZ, H. (1995). High speed machining. **Annals of the CIRP**, Paris, v.44, n.1/2, p.637-643.

SCHULZ, H.. (2001). **Scientifics fundamentals os HSC**. Cincinnati: Hanser Gardner.

SCHULZ, H.; ABELE, E.; SAHM, A. (2001). Material aspects of chip formation in HSM machining. **Annals of the CIRP**, Paris, v.50, n.1, p.45-48.

_____. (2000). Quais são e para que servem os revestimentos. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v.36, n.416, p.38-45.

SILVA, L.R. et al. (2002). Influência da geometria da aresta na usinagem de superliga à base de níquel. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.436, p.76-101.

SOKOLOWSKI, A.; BARBOSA, C.A. (2003). Aços inoxidáveis - usinabilidade melhorada - linha USIFAc. In: **O MUNDO da usinagem**. 2.ed. Disponível em:<<http://www.cimm.com.br/cimm/geral/jsps/frame.jsp?pagina=http://www.omundodausinagem.com.br/edicao2-03/usinabilidade.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2005.

SOUZA, A.F. (2004). **Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades**. 171p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SOUZA, A.F.; COELHO, R.T. (2003). Definições e estado da arte da tecnologia CAD/CAM visando auxiliar a implantação desta tecnologia em um ambiente fabril. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23., 2003, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: ABEPRO. 1 CD-ROM.

TAKEUCHI, Y.; SAKAMOTO, M.; ORITA, R. (1989). Development of a personal CAD/CAM system for mold manufacture based on solid modeling techniques. **Annals of the CIRP**, Paris, v.38, p.429-432.

TOH, C.K. (2004). Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. **Precision Engineering**, Guildford, v.28, n.4, p.386-398, Oct.

_____. (2005). Comparision of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.167, n.1, p.110-118 Aug.

TRENT, E.M. (1991). **Metal cutting**. 3thed. Londres: Butterworth-Heinemann.

VIEIRA, J.M.; EZUGWU, E.O. (2001). Influence of cutting fluids during face milling steels. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.116, n.2/3, p.244-251, Oct.

VOLPATO, N. (1993). **Recursos CAD/CAM voltados ao modelamento e à usinagem de cavidades para moldes, com estudo de casos de aplicação**. 146p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

WANG, J. (1998). Computer-aided economic optimization of end-milling operations. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v.54, n.3, p.307–320, May.

WANG, J.Y.; LIU, C.R. (1999). The effect of tool flank wear on the heat transfer, termal damages and cutting mechanics in finish hard turning. **Annals of the CIRP**, Paris, v.48, p.53-58.

WANG, S.M.; CHIOU, C.H.; CHENG, Y.M. (2004). An improved dynamic cutting force model for end-milling process. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.148, n.3, p.317-327, May.

YUE, S. et al. (2003). Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for die casting dies. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.139, n.1/3, p.465-468, Aug.

ZEID, I. (1991). **CAD/CAM theory and practice**. New York: McGraw-Hill.

ANEXO 1 – Programa CNC-1 usado nos ensaios concordantes

;ENSAIO RUGOSIDADE MACRO-CONCORDANTE

;TESTES SENT_LONGITUDINAL

;R220 COORD PTO PARTIDA

N10 G17 G40 G90 G71

N20 T01; FRESA D6

N30 M6

N40 G56; X-68.646 Y18.509 Z49.147

N50 S5000 M3

N60 F1000

N70 R220=15;

N80 R221=0.310; Ae

N90 G1 X103 Y=R220

N100 Z10

N110 INICIO:

N120 G91 Y=R221

N130 G90 G1 Z0

N140 Z-0.07

N150 X-3

N160 Z10

N170 Z103

N180 REPEAT INICIO P10

N190 Z200

N200 M30

ANEXO 2 – Programa CNC-2 usado nos ensaios discordantes

;ENSAIO RUGOSIDADE MACRO-DISCORDANTE

;TESTES SENT_LONGITUDINAL

G17 G40 G90 G71

T01; FRESA D6

;M6

G56; X-68.646 Y18.509 Z49.147

S5000 M3

F1000

R220=15; PTO PARTIDA +6mm

R221=0.155; Ae

R222=0.1; Ap Cte

G1 X=R220 Y=-3

Z10

INICIO:

G91 X=R221

G90 G1 Z0

Z-R222;

Y15

Z10

Y-3

REPEAT INICIO P=64

Z200

M30