

**ULISSES BORGES SOUTO**

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DE  
FERRAMENTA NO PROCESSO DE FRESAMENTO  
VIA EMISSÃO ACÚSTICA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2007

**ULISSES BORGES SOUTO**

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTA  
NO PROCESSO DE FRESCAMENTO VIA EMISSÃO  
ACÚSTICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

**UBERLÂNDIA – MG**

**2007**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

S728m Souto, Ulisses Borges, 1966-

Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento  
via emissão acústica / Ulisses Borges Souto. - 2007 .  
168 f. : il.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

I. Fresagem (Trabalhos em metal) - Teses. I. Silva, Márcio Bacci da.  
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.914

---

Aos meus pais, Maria do Rosário e Jarbas,  
Ao meu filho, Gabriel,  
Aos meus irmãos, Homero, Myriam,  
Mara, Mônica e Maria Isabel.  
À todos os meus sobrinhos,  
E também aos demais familiares e amigos,  
que de forma direta ou indireta possibilitaram  
a conclusão deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

- Ao Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva pela confiança, incentivo, orientação e paciência ao longo deste trabalho.
- Aos Profs. Dr. Álisson Rocha Machado e Dr. Helder Barbieri pelo apoio e incentivo durante a realização do trabalho.
- A todos os colegas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU): Anderson Clayton Alves de Melo, Alexandre Martins Reis, Rhander Vianna, Rosemar Batista da Silva, Luiz Carlos da Silva, Paulo Rosa Mota, Ildeu Siqueira, Vinicius Torres Lima, André Luis Beloni dos Santos, Éder Silva Costa, Nélis Evangelista.
- À doutoranda Tatiana Meola e ao Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte pelo apoio decisivo durante a tese.
- Ao aluno de iniciação científica Rodrigo Henriques Lopes da Silva e aos alunos da iniciação científica da engenharia elétrica Fúlvio Queiroz Barbosa e Artur Carrijo, pelo apoio durante a realização dos ensaios.
- Ao técnico do LEPU Reginaldo Ferreira de Souza, aos técnicos da Oficina Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica e a todos os funcionários da UFU que de alguma forma apoiaram a execução deste trabalho.
- À Faculdade de Engenharia Mecânica, à Coordenação do Curso de Pós-Graduação e também à Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade e pela infra-estrutura fundamentais à realização deste trabalho.
- Aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pelos conhecimentos transmitidos.
- À FAPEMIG, ao IFM e a CAPES pelo apoio financeiro. Ao CNPq pelo apoio financeiro e a bolsa de doutorado.
- E a todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

Souto, U. B., 2006, "Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento via Emissão Acústica", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

## Resumo

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de técnicas para a aplicação da emissão acústica no monitoramento de desgaste de insertos de metal duro no fresamento frontal. Neste trabalho foi utilizado um equipamento da Sensis (DM 42) para aquisição do sinal de emissão acústica durante o fresamento frontal de um aço microligado perlítico de forja (Din 38MnS6). Foi utilizada uma fresa com especificação R245 125Q40-12M, de 125 mm de diâmetro e com possibilidade de montagem de até oito insertos. Os insertos utilizados são de metal duro R245-12 T3 M-PM 4030 revestidos com TiN. A fresa e os insertos foram fabricados pela Sandvik Coromant. Os testes foram divididos em duas partes. A primeira consistiu no monitoramento do desgaste e também de alguns fenômenos que ocorrem na usinagem através da construção de um mapa de intensidade luminosa. Nestes testes foram utilizados um, dois, quatro e oito insertos simultaneamente. Nesta etapa foi empregado o sinal RMS da emissão acústica. Na segunda etapa dos ensaios utilizou-se o sinal bruto de emissão acústica. Foram estimados parâmetros estatísticos destes sinais e destes foram escolhidos os que melhor se relacionavam com o fenômeno estudado. Este procedimento foi realizado através da ferramenta estatística *boxplot*. Finalmente, os parâmetros escolhidos foram usados para treinar e validar uma Rede Neural Probabilística, que teve a função de reconhecer e classificar os estágios de desgaste da ferramenta. Os índices de acerto nas classificações da rede indicam que a emissão acústica apresenta bons resultados no reconhecimento de níveis de desgaste das ferramentas na operação de fresamento.

---

**Palavras-chave:** Fresamento, desgaste, monitoramento, emissão acústica, redes neurais.

Souto, U. B., 2006, "Tool Wear Monitoring in the Milling Process by Acoustic Emission", Ph.D Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG.

### Abstract

The main goal of this work is the development of techniques for application of acoustic emission signal in tool wear monitoring in face milling operation. In this work a Sensis (DM 42) equipment for acquisition of the acoustic emission signal was used during the milling of a high strength low alloy steel (Din 38MnS6). A milling cutter with 125 mm diameter for eight inserts with specification R245 125Q40-12M was used. The ISO specification of the inserts were SEMN 12 04 AZ TiN coated. The tests were divided into two parts. In the first part, wear and some other machining phenomena were monitored through the construction of a luminous intensity map. For these tests it was used one, two, four or eight inserts simultaneously. In this stage the acoustic emission signal was evaluated using the RMS values. In the second part of this work the acoustic emission raw signal was used. Amongst the statistical parameters that correlate to tool wear extracted from the raw signal, the best fit ones were selected to train and validate a Probabilistic Neural Network. The results of the PNN indicate that the acoustic emission signal can be used to recognition of tool wear levels in the milling process.

## Lista de Símbolos

A/D = Conversor analógico/digital.

AC = Corrente alternada.

$a_e$  = Penetração de trabalho.

$Al_2O_3$  = Óxido de alumínio.

$a_p$  = Profundidade ou largura de corte.

APC = Aresta postiça de corte.

CBN = Nitreto cúbico de boro.

CNC = Comando numérico computadorizado.

D = Diâmetro.

DC = Corrente contínua.

Din 38MnS6 = Aço microligado perlítico de forja otimizado.

E = Sinal de erro.

EA = Emissão acústica.

$EA_{RMS}$  = Filtro RMS aplicado ao sinal de emissão acústica.

f = Avanço por rotação.

$f_c$  = Avanço de corte.

fdp = Função densidade de probabilidade.

FEM = Método de elementos finitos.

FFT = Transformada rápida de Fourier.

$f_i$  = Freqüência qualquer que compõe o espectro.

$f_k(X)$  = Densidade de membros da classe k ao redor de uma amostra desconhecida.

$f_m$  = Freqüência média.

FRF = Função de resposta em freqüência.

$F_x$  ou  $F_f$  = Força de avanço.

$F_y$  ou  $F_r$  = Força radial.

$F_z$  ou  $F_t$  = Força principal.

h = Espessura máxima do cavaco.

$h_i$  = Espessura de corte em um plano determinado de corte.

$h_m$  = Espessura média do cavaco.

k = Condutividade térmica do material.

K = curtose.

k = Neurônio da camada intermediária.

KT = Profundidade da cratera.

L<sub>c</sub> = Percurso de corte.

LDV = *Laser Doppler velocimetry*.

L<sub>f</sub> = Percurso de avanço.

LEPU = Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem.

L<sub>e</sub> = Percurso efetivo.

m = Neurônio da camada de saída.

M<sub>2</sub> = Momento de segunda ordem.

M<sub>3</sub> = Momento de terceira ordem.

M<sub>4</sub> = Momento de quarta ordem.

MEV =Microscópio eletrônico de varredura.

MgO = Óxido de manganês.

MLP = Redes *perceptron* multi-camadas.

Mo<sub>2</sub>C = Carboneto de molibdênio.

n = Número de rotações por segundo.

n<sub>1</sub> e n<sub>2</sub> = Números de dados dos grupos 1 e 2 respectivamente.

NUMA = Núcleo de Manufatura Avançada.

OFHC= Liga de cobre.

PCBN = Nitreto cúbico de boro policristalino.

PCD = Diamante sintético policristalino.

PNN = Rede neural probabilística.

PVD = Deposição física por vapor.

$\dot{q}$ = Taxa de geração de calor.

r<sub>k</sub> = Coeficiente de correlação.

RLS = *Recursive least square filter*.

RMS = *Root mean square*.

RNA = Redes neurais artificiais.

S = Skewness.

S<sub>i</sub> = Energia do sinal de emissão acústica em uma freqüência i.

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> = Nitreto de silício.

s<sub>1</sub><sup>2</sup> e s<sub>2</sub><sup>2</sup> = Estimativa das variâncias dos grupos 1 e 2 respectivamente.

t<sub>α</sub>= Distribuição t de Student.

TaC = Carboneto de tântalo.

TiC = Carboneto de titânio.

TiN = Nitreto de Titânio.

TiNAL = Nitreto de titânio alumínio.

$t_m$  = Valores reais desejados.

$t_o$  = Distribuição normal.

$u_m$  = Respostas estimadas por uma rede.

VB<sub>B</sub> = Desgaste de flanco médio.

VB<sub>Bmáx</sub> = Desgaste de flanco máximo.

VB<sub>N</sub> = Desgaste de entalhe.

V<sub>c</sub> = Velocidade de corte.

V<sub>e</sub> = Velocidade efetiva de corte.

V<sub>f</sub> = Velocidade de avanço.

V<sub>RMS</sub> = Filtro RMS aplicado ao sinal de voltagem.

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  = Estimativas das médias dos grupos 1 e 2 respectivamente.

W(d) = Função de ponderação ou função Kernel.

WC = Carboneto de tungstênio.

Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = Óxido de ítrio.

Z = Número de dentes da fresa.

$\Delta T$  = Diferença de temperatura.

$\nabla^2 T$  = Laplaciano de temperatura.

## Símbolos Gregos

$\alpha$  = Fator de amortecimento.

$\alpha_t$  = Nível de confiança.

$\chi_r$  = Ângulo de posição.

$\delta_m$  e  $\delta_k$  = Erros das camadas.

$\phi$  = Ângulo do plano de cisalhamento.

$\gamma_f$  = Ângulo de saída radial.

$\gamma_o$  = Ângulo de saída.

$\gamma_p$  = Ângulo de saída axial.

$\eta$  = Ângulo de direção efetiva de corte.

$\eta$  = Taxa de aprendizagem.

$\varphi$  = Ângulo de direção de avanço.

$\lambda_s$  = Ângulo de inclinação.

$\rho C$  = Parte constante da equação da energia.

$\sigma$  = Parâmetro de escala que define a curva sino centrada em cada membro da coleção de dados.

$\tau_k$  = Resistência ao cisalhamento dinâmico.

$\frac{\partial T}{\partial t}$  = Variação de temperatura no tempo.

# SUMÁRIO

	Página
<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
<b>CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>05</b>
<b>2.1 Processo de Fresamento.....</b>	<b>05</b>
<b>2.1.1 Introdução.....</b>	<b>05</b>
<b>2.1.2 Definições e nomenclatura.....</b>	<b>06</b>
<b>2.1.3 Tipos de fresamento.....</b>	<b>09</b>
<b>2.1.4 Nomenclatura e relação geométrica entre a ferramenta e a peça.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.5 Fresamento com movimento concordante e discordante.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.6 Efeitos do número de dentes da fresa.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.7 Efeitos do posicionamento da fresa sobre a mesa.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.8 Materiais para ferramentas de corte no fresamento.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Avarias, Desgaste e Mecanismos de Desgaste de Ferramentas no Fresamento.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.1 Desgaste de ferramenta.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2 Avarias na ferramenta no processo de fresamento.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.3 Vida da ferramenta e critérios de final de vida.....</b>	<b>39</b>
<b>2.3 Monitoramento do Processo de Usinagem.....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.1 Monitoramento da usinagem através da temperatura.....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.2 Monitoramento da usinagem através de sinais de força.....</b>	<b>49</b>
<b>2.3.3 Monitoramento da usinagem através da vibração.....</b>	<b>51</b>
<b>2.3.5 Monitoramento da usinagem através dos parâmetros elétricos do motor.....</b>	<b>53</b>

<b>2.4 Emissão Acústica.....</b>	<b>55</b>
<b>2.4.1 Monitoramento da usinagem através da emissão acústica.....</b>	<b>60</b>
<b>2.4.2 Considerações a respeito de sensores de emissão acústica.....</b>	<b>67</b>
<b>2.4.3 Considerações sobre o ruído no sinal de emissão acústica.....</b>	<b>68</b>
<b>2.5 Redes Neurais Artificiais (RNA).....</b>	<b>69</b>
<b>2.5.1 Considerações sobre uma rede biológica.....</b>	<b>70</b>
<b>2.5.2 Modelo genérico de um neurônio artificial.....</b>	<b>71</b>
<b>2.5.3 Funções de ativação.....</b>	<b>72</b>
<b>2.5.4 Arquitetura das redes Neurais.....</b>	<b>75</b>
<b>2.5.5 Procedimento de aprendizado de uma rede neural.....</b>	<b>76</b>
<b>2.5.6 Método <i>Backpropagation</i>.....</b>	<b>78</b>
<b>2.5.7 Rede Neural Probabilística (PNN).....</b>	<b>80</b>
<b>CAPÍTULO III – METODOLOGIA.....</b>	<b>87</b>
<b>3.1 Testes com o Sinal RMS de Emissão Acústica.....</b>	<b>87</b>
<b>3.1.1 Materiais dos corpos de prova.....</b>	<b>88</b>
<b>3.1.2 Condições de corte e especificações da ferramenta.....</b>	<b>90</b>
<b>3.1.3 Aquisição dos sinais de emissão acústica.....</b>	<b>93</b>
<b>3.2 Testes com o Sinal Bruto de Emissão Acústica.....</b>	<b>96</b>
<b>3.2.1 Condições de corte, especificações da ferramenta e estágios de desgaste.</b>	<b>97</b>
<b>3.2.2 Processamento do sinal.....</b>	<b>98</b>
<b>3.2.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros estimados.....</b>	<b>102</b>
<b>3.2.4 Aplicação de inteligência artificial (RNA).....</b>	<b>106</b>
<b>3.2.5 Saída da rede.....</b>	<b>106</b>
<b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>107</b>
<b>4.1 Resultados Obtidos nos Testes com o Sinal EA<sub>RMS</sub>.....</b>	<b>107</b>
<b>4.1.1 Fresamento com quatro insertos.....</b>	<b>107</b>
<b>4.1.2 Fresamento com oito insertos.....</b>	<b>108</b>
<b>4.1.3 Fresamento com dois insertos e mudança de direção de avanço.....</b>	<b>109</b>

<b>4.1.4 Reprodução do fresamento de um bloco de motor.....</b>	110
<b>4.1.5 Reprodução do lascamento de uma aresta de corte.....</b>	111
<b>4.2 Resultados dos Testes com o Sinal Bruto de Emissão Acústica.....</b>	111
<b>    4.2.1 Determinação de possíveis parâmetros do sinal de EA indicativos do desgaste de <math>VB_{Bmáx}</math>.....</b>	112
<b>        4.2.2 Avaliação da influência da variação da distância da região de corte para o sensor no sinal de EA.....</b>	117
<b>        4.2.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros estimados.....</b>	120
<b>        4.2.4 Saída da rede (classificação do sinal de entrada).....</b>	130
<b>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES.....</b>	143
<b>5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	145
<b>CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	147
<b>ANEXO – Estudo da Relação Entre o Sinal de Emissão Acústica e a Rugosidade no Torneamento.....</b>	157

# **Capítulo I**

## **Introdução**

A pesquisa em usinagem tem importância fundamental frente aos demais processos de fabricação, pois este processo, que tem suas raízes na revolução industrial, continua expandindo suas fronteiras em resposta à crescente demanda de uma enorme gama de indústrias contemporâneas. A importância econômica da usinagem para a fabricação não pode ser subestimada: “Hoje, nos países industrializados, os custos que representam a parcela da usinagem no valor final de um produto manufaturado representam mais de 15 %” (Trent; Wright, 2000). Desta maneira, qualquer aumento de produtividade nesta área certamente causará um significativo impacto econômico.

Dentro deste contexto, o processo de fresamento, dentre todos os processos de usinagem empregados atualmente, apresenta-se como um dos mais importantes da indústria, tanto pela sua enorme versatilidade de aplicação como também por sua grande capacidade de remoção de cavaco.

O processo de fresamento caracteriza-se por ser um corte interrompido. Durante uma volta completa da ferramenta, esta passará por momentos em que estará cortando material da peça (ciclo ativo) e o restante da volta estará em vazio (ciclo inativo). Esta característica do corte interrompido faz com que a ferramenta esteja submetida, durante cada rotação, a elevadas variações térmicas e de tensões mecânicas que promoverão o aparecimento de avarias e desgaste da ferramenta. Portanto, o desgaste e eventuais falhas das ferramentas são fenômenos inevitáveis.

O problema principal quando o responsável pela observação do estado da ferramenta é o operador é que ele não é capaz de identificar o momento exato em que se deve realizar a troca da ferramenta, levando-se em conta a qualidade da peça que está sendo produzida e o limite de aproveitamento da vida da ferramenta. Além disto, a introdução de controles automatizados nas máquinas-ferramenta tornou o monitoramento visual extremamente difícil, além da impossibilidade física de se observar a região de corte, mesmo quando se fala em prevenção contra falhas repentinas e inesperadas da ferramenta (Dolinsk; Kopac, 1999).

O melhor momento da troca da ferramenta, para que não haja prejuízo da produtividade das indústrias, deve ser determinado em tempo real (*on-line*). Existem vários campos de pesquisa para o monitoramento em tempo real do desgaste, que vão desde a vibração, temperatura, forças de corte, emissão acústica, rugosidade, parâmetros elétricos do motor e até emissão sonora (Matsumoto e Diniz, 1997). Porém, a emissão acústica (EA) surge como uma área relativamente nova e promissora neste campo de pesquisa. Isto em função do alto número de fenômenos de usinagem que emitem este sinal, de sua rapidez de resposta, baixa interferência de ruídos, baixa intrusividade, facilidade de operação de seus equipamentos e custo relativamente baixo.

Segundo Dolinsek e Kopac (1999), emissão acústica em usinagem se refere à propagação de ondas elásticas acima de 20 kHz, geradas na região do corte. A EA é originada da liberação de ondas vibracionais na estrutura cristalina dos materiais devido a um rearranjo interno em sua estrutura. Dois tipos de sinais são associados à EA: o sinal contínuo, devido às deformações plásticas em materiais dúteis e o sinal de pico, oriundos da propagação de trincas e impactos do cavaco (Blum e Inasaki, 1990).

Para o emprego da emissão acústica no monitoramento do desgaste, é fundamental aliar este sinal com uma técnica que seja capaz de extrair informações que se relacionam com o fenômeno de desgaste para apresentar uma definição da sua condição. Existem algumas técnicas para este procedimento, sendo a utilização da inteligência artificial uma das principais. Uma Rede Neural Artificial possui grande capacidade de reconhecimento e classificação de padrões de conjuntos de dados. Como o sinal de EA é composto de informações de várias fontes (Li, 2002), torna-se praticamente indispensável o emprego de uma rede para o reconhecimento de padrões associados especificamente ao fenômeno estudado.

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de técnicas para a aplicação da emissão acústica no monitoramento de desgaste de flanco máximo de insertos de metal duro no fresamento frontal. Neste trabalho procurou-se empregar metodologias que forneçam resultados confiáveis, abrangentes e que possam ser aplicados, com acréscimo de devidas adaptações, em um monitoramento em tempo real. Toda a metodologia e meios empregados são de relativa simplicidade para compreensão e operação além de baixo valor de aquisição.

O sinal de emissão acústica contém informações sobre vários fenômenos que ocorrem durante a usinagem. Se for bem explorado, é possível observar, com maior ou menor grau de dificuldade, detalhes como: desgaste, falhas catastróficas na aresta de corte, rugosidade, formação de rebarbas e até problemas de batimento. Como o objetivo central do trabalho está direcionado para a evolução do desgaste da aresta principal de corte, empregou-se para avaliação deste fenômeno o sinal bruto da EA. Este tipo de sinal, apesar de exigir maiores

esforços computacionais, é mais indicado para buscar informações confiáveis deste fenômeno. Os outros fenômenos também foram observados e retratados. Porém, estes só foram observados e analisados quando se utilizou o filtro RMS no sinal de EA. O sinal  $EA_{RMS}$  foi reproduzido, a cada volta da fresa, em um mapa de intensidade luminosa. Através deste mapa foi possível visualizar com boa clareza estes fenômenos.

Os resultados deste trabalho indicam que a emissão acústica é um bom parâmetro para observação de alguns dos principais fenômenos da usinagem. O sinal  $EA_{RMS}$  revelou interessantes aspectos que acontecem durante o corte e que podem ser aplicado como uma ferramenta útil no seu controle. O sinal bruto da EA, empregado no acompanhamento do desgaste de flanco, também apresentou resultados bastante confiáveis e promissores.

A seguir, tem início a apresentação do trabalho com o Capítulo II (Revisão Bibliográfica). O capítulo é dividido em tópicos relacionados com o tema deste trabalho. Inicialmente, é apresentada a operação de fresamento. Logo após, uma revisão de alguns dos principais parâmetros empregados em monitoramento da usinagem. Depois, a emissão acústica e o seu emprego no monitoramento. Finalizando, são apresentadas as redes neurais artificiais e suas aplicações na usinagem.

A metodologia empregada neste trabalho é apresentada detalhadamente no Capítulo III. Este capítulo também é dividido em dois tópicos. No primeiro, é descrito como foram realizados os ensaios em que se utilizou o sinal  $EA_{RMS}$ . No segundo, é descrita a metodologia empregada na observação do desgaste através do sinal bruto de EA.

O Capítulo IV traz as discussões relativas aos resultados obtidos. Como consequência do capítulo anterior, este capítulo separa a avaliação dos dois tópicos descritos.

O Capítulo V apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, o Capítulo VI apresenta as Referências Bibliográficas.



## **Capítulo II**

### **Revisão Bibliográfica**

#### **2.1 Processo de Fresamento**

##### **2.1.1 Introdução**

Dentre os processos convencionais de usinagem existentes atualmente, o fresamento apresenta-se como dos mais importantes. Sua importância se deve principalmente pela boa versatilidade na manufatura de peças, alta taxa de remoção de material e também pela característica do cavaco produzido, que é relativamente curto, o que não compromete a qualidade da superfície gerada.

Uma das principais vantagens do processo de fresamento, segundo Diniz et al. (2001), é que esta operação é a mais versátil na geração de superfícies planas não de revolução. Sua versatilidade é possível devido principalmente a grande variedade de geometrias que suas ferramentas podem apresentar, tornando possível, por consequência, a geração de um número igualmente vasto de superfícies.

O fresamento pode ser definido como um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer, onde o material é removido pela rotação de ferramentas multicortantes denominadas fresas, sendo que cada dente remove uma pequena quantidade de material em cada revolução (Ferraresi, 1977). A rotação da ferramenta, aliada com o deslocamento da peça ou da própria ferramenta, compõem os principais movimentos do fresamento.

Alguns pré-requisitos devem ser levados em consideração para a utilização deste processo, dentre estes, um é fundamental: o fresamento requer uma máquina-ferramenta que apresente alta rigidez, pois durante o processo de corte há uma grande flutuação das cargas mecânicas (característica do corte interrompido). Esta variação de cargas que ocorre durante o corte se deve ao impacto de cada uma de suas arestas ao entrar em contato com o material e durante o período em que estas estiverem cortando. Este período é denominado fase ativa. Assim que a ferramenta sai do material, há uma queda brusca da carga a que a ferramenta está submetida. Esta fase é denominada inativa e não há remoção de material.

Estas grandes variações de cargas mecânicas que ocorrem nas fases (ativa e inativa) propiciam o aparecimento de elevados ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento. Durante

o corte, a ferramenta fica submetida a elevadas temperaturas, que são rapidamente atingidas. Mas, durante a fase inativa, a ferramenta também é submetida a um rápido resfriamento. Este agressivo ciclo térmico pode gerar na ferramenta trincas perpendiculares à aresta de corte, fragilizando-a diante das intensas solicitações mecânicas sofridas durante o corte.

### 2.1.2 Definições e Nomenclatura

Para uma melhor compreensão do fresamento, algumas definições sobre parâmetros de corte (ABNT NBR 6162/1989 – Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais – Terminologia, ângulos (ABNT NBR 6163/1980 – Conceitos da Técnica de Usinagem – Geometria da Cunha Cortante – Terminologia) e maneiras como esta operação pode ser executada (Figs. 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4) são apresentadas:

#### Parâmetros de corte

- . Penetração de Trabalho ( $a_e$ ): é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e numa direção perpendicular à direção de avanço.
- . Profundidade ou largura de corte ( $a_p$ ): é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho.

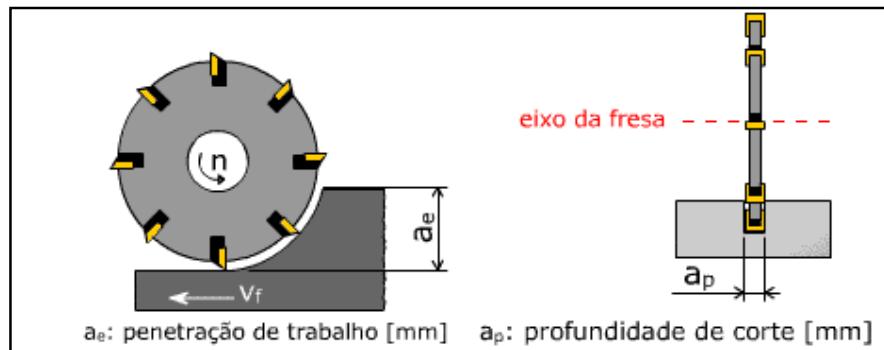


Figura 2.1 – Alguns dos parâmetros de corte aplicados na operação de fresamento tangencial (CIMM, 2006).

- . Velocidade de Corte ( $V_c$ ): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte. A Equação (2.1) expressa como é realizado o cálculo da velocidade de corte.

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \text{ (m/min)} \quad (2.1)$$

onde:

$D$  = diâmetro da peça ou da ferramenta (mm).

$n$  = número de rotações por minuto.

. Velocidade de Avanço ( $V_f$ ): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta segundo direção e sentido de avanço. A Equação (2.2) expressa como é realizado o cálculo da velocidade de avanço.

$$V_f = f \cdot n \text{ (mm/min)} \quad (2.2)$$

onde

$f$  = avanço (mm/rotação)

. Velocidade Efetiva de Corte ( $V_e$ ): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo direção e sentido efetivo do corte. A Equação (2.3) expressa como é realizado o cálculo da velocidade efetiva de corte.

$$\overline{V_e} = \overline{V_c} + \overline{V_f} \quad (2.3)$$

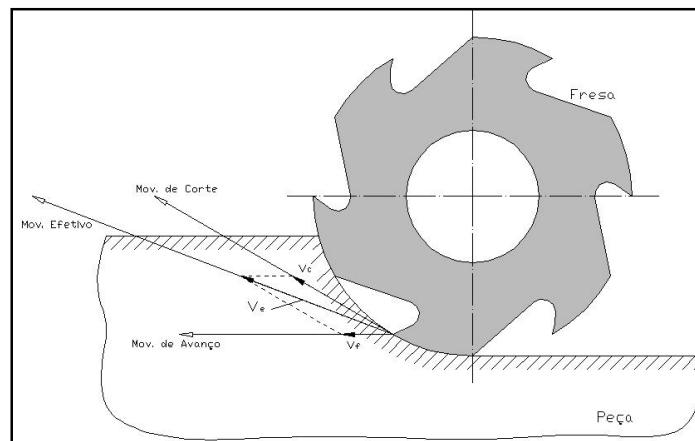


Figura 2.2 – Direção dos movimentos de corte, avanço e efetivo em uma operação de fresamento discordante.

. Avanço por Rotação ( $f$ ): é o percurso de avanço em cada volta da fresa. A Equação (2.4) expressa como é realizado o cálculo do avanço por rotação.

$$f = \frac{V_f}{n} \quad (\text{mm/rot}) \quad (2.4)$$

. Avanço por Dente ( $f_z$ ): é o percurso de avanço de cada dente da fresa, medido na direção de avanço da ferramenta, e corresponde à geração de duas superfícies consecutivas em usinagem. A Equação (2.5) expressa como é realizado o cálculo do avanço por dente.

$$f_z = \frac{f}{Z} = \frac{V_f}{Z \cdot n} \quad (\text{mm/dente}) \quad (2.5)$$

onde:

$Z$  = número de dentes da fresa.

. Avanço de Corte ( $f_c$ ): é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção de corte no plano de trabalho.

. Avanço Efetivo de Corte ( $f_e$ ): é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medidas na direção perpendicular à direção efetiva de corte no plano de trabalho.

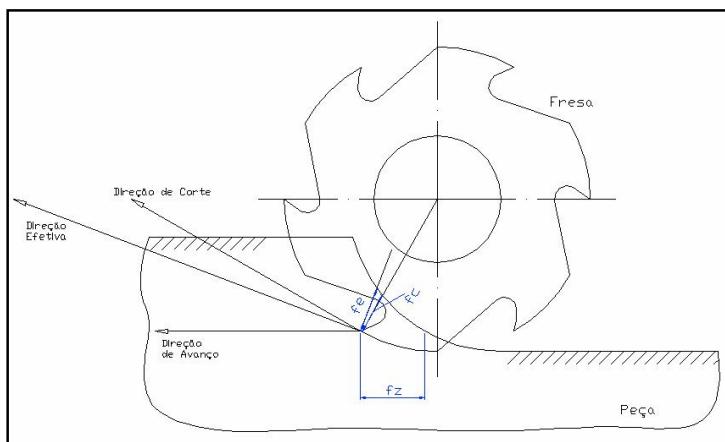


Figura 2.3 – Avanço por dente  $f_z$ , avanço de corte  $f_c$  e avanço efetivo  $f_e$  em uma operação de fresamento concordante.

- . Espessura de corte em um plano determinado do corte ( $h_i$ ): é a espessura calculada da seção transversal de corte a ser retirada no instante  $i$  de corte, medida normalmente à superfície em usinagem principal e segundo a direção perpendicular à direção de corte.
- . Percurso de Corte ( $L_c$ ): é a distância percorrida sobre a peça pelo ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção de corte.
- . Percurso de Avanço ( $L_f$ ): é a distância percorrida pela ferramenta, segundo a direção de avanço.

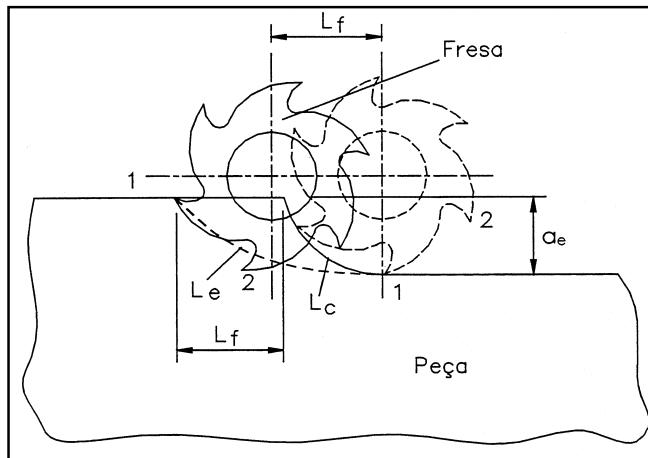


Figura 2.4 – Percurso de corte  $L_c$ , percurso de avanço  $L_f$  e percurso efetivo  $L_e$  para uma operação de fresamento discordante (ABNT NBR 6162/1989).

### 2.1.3 Tipos de fresamento

Existem três métodos principais de fresamento: frontal, tangencial e de topo (Metal's Handbook, 1989). Cada método de fresamento é determinado em função do tipo de fresa utilizada e da disposição do eixo de rotação da ferramenta em relação à superfície que está sendo fresada.

O fresamento tangencial é um processo de geração de superfície onde o corte é feito por uma ferramenta cujos dentes estão dispostos na sua periferia, conforme Fig. 2.5, e que tem o eixo de rotação paralelo à superfície fresada.

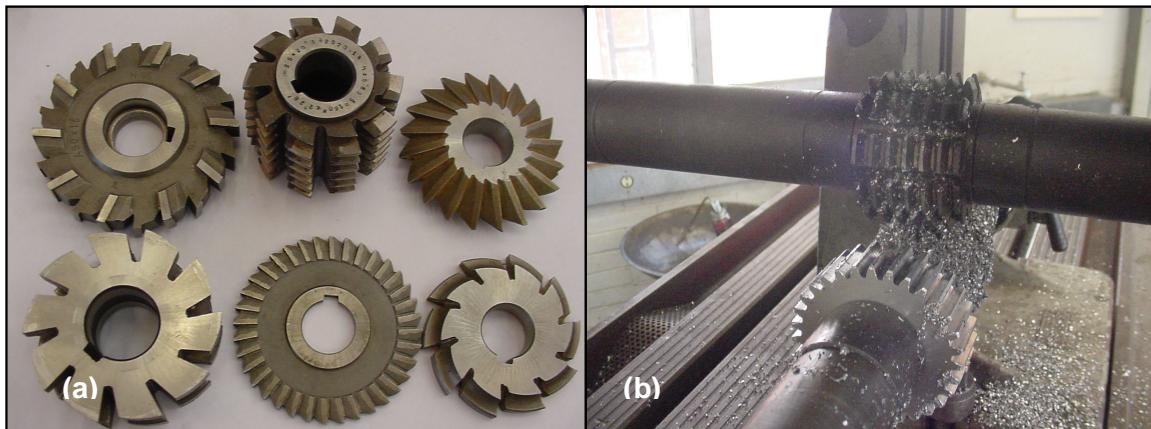


Figura 2.5 – Representação de fresamento tangencial. (a) Alguns exemplos de fresas tangenciais ou de disco; (b) Modelo de fresa caracol utilizada na fabricação de uma engrenagem de dentes retos.

As ferramentas para o fresamento tangencial são normalmente utilizadas em máquinas fresadoras universais e montadas em um trecho intermediário do eixo árvore da máquina.

O fresamento tangencial pode ser utilizado para remoção de material de superfícies planas além de confeccionar rasgos de chaveta, rasgos profundos, superfícies com dois ou mais planos e superfícies de formas complexas.

O fresamento frontal é uma operação para usinagem de superfícies planas, onde a fresa apresenta dentes na sua superfície frontal e cujo eixo é perpendicular à superfície que está sendo gerada. A Figura 2.6 mostra uma representação de uma fresa frontal.



Figura 2.6 – Representação de um fresamento frontal.

Ao contrário do que normalmente ocorre no fresamento tangencial, o frontal é profundo radialmente e estreito axialmente. Apesar disto, o fresamento frontal apresenta uma melhor relação de remoção de material por potência consumida por ter um maior número de dentes engajados no corte simultaneamente.

O fresamento frontal apresenta outras vantagens sobre o tangencial, tais como:

- Maior rigidez da fresa por esta ter menor comprimento em balanço e por estar presa diretamente ao eixo árvore da máquina, podendo assim usinar uma área maior;
- As forças de corte são uniformemente distribuídas.

Algumas das desvantagens do fresamento frontal que podem ser destacados são o uso restrito a superfícies planas e também o aumento dos esforços na direção do avanço à medida que aumenta o número de dentes simultaneamente no corte.

Uma ferramenta típica para o fresamento de topo apresenta arestas de corte tanto na face frontal como na sua face periférica. É considerada como uma combinação do fresamento frontal e tangencial e é diferenciado mais pelo tipo de aplicação que pela definição. A Figura 2.7 mostra uma representação de uma fresa de topo ou mista.

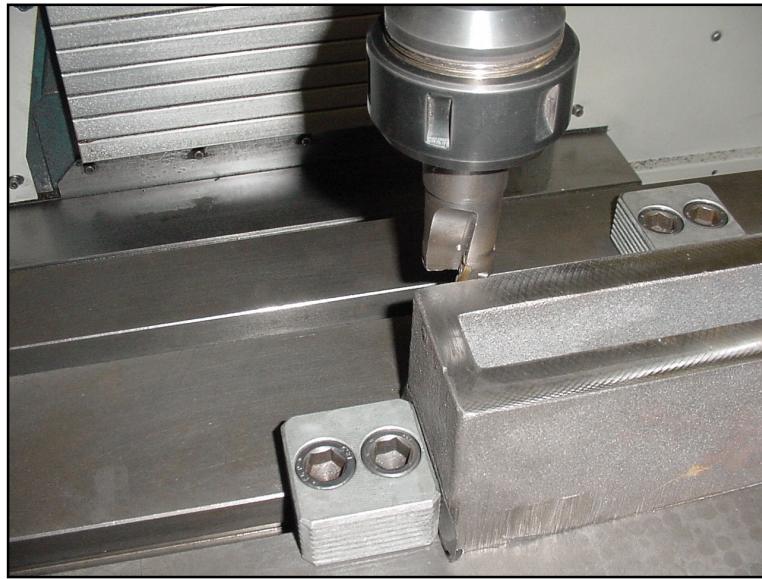


Figura 2.7 – Representação de um fresamento de topo ou misto.

É um processo desaconselhável para operações de corte mais severas, pois a relação comprimento-diâmetro da ferramenta é relativamente elevada, gerando deflexão na fresa.

As fresas de topo são ferramentas muito versáteis e de grande aplicabilidade, sendo utilizadas na confecção de cavidades como bordas, ranhuras, relevos, fresamento lateral etc.

#### 2.1.4 Nomenclatura e relação geométrica entre a ferramenta e a peça

A eficiência do corte no fresamento está diretamente ligada a uma boa escolha nas relações angulares entre ferramenta e a peça a ser usinada. Portanto, para que se consiga esta eficiência é preciso ter conhecimento de conceitos básicos sobre ângulos e geometria de uma ferramenta.

Torna-se também necessário a distinção destes ângulos quando se toma como referência apenas a ferramenta (ângulos da ferramenta) ou quando se toma como referência a ferramenta em operação (ângulos efetivos ou de trabalho).

Os principais ângulos que influenciam no corte, segundo Metal's Handbook (1989) são:

#### Ângulos Auxiliares

. Ângulo da Direção de Avanço ( $\varphi$ ): é o ângulo entre a direção de avanço e a direção de corte e no fresamento, este ângulo varia durante o corte.

. Ângulo de Direção Efetiva de Corte ( $\eta$ ): é o ângulo da direção efetiva de corte e a direção de corte. A Equação (2.6) expressa como é realizado o cálculo do ângulo de direção efetiva de corte.

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{V_f \operatorname{sen} \varphi}{V_f \operatorname{cos} \varphi + V_c} = \frac{\operatorname{sen} \varphi}{\operatorname{cos} \varphi + \frac{V_c}{V_f}} \quad (2.6)$$

#### Ângulos da Ferramenta

. Ângulo de Saída ( $\gamma_0$ ): é o ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência da ferramenta, medido no plano ortogonal da ferramenta.

. Ângulo de Inclinação ( $\lambda_s$ ): é o ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência da ferramenta, medido no plano de corte da ferramenta.

. Ângulo de Posição ( $\chi_r$ ): é o ângulo entre o plano de corte da ferramenta e o plano de trabalho, medido no plano de referência da ferramenta.

A Figura 2.8 mostra uma representação esquemática dos três ângulos citados anteriormente com uma pastilha para fresamento.

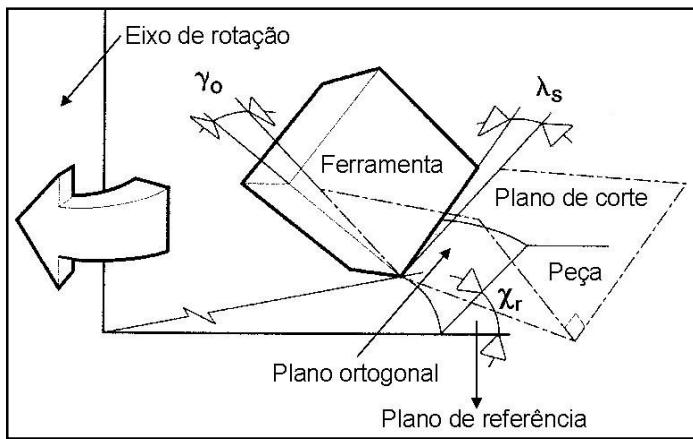


Figura 2.8 – Representação esquemática do ângulo de inclinação  $\lambda_s$ , do ângulo de posição  $\chi_r$  e do ângulo de saída  $\gamma_o$  (Modern Metal Cutting, 1994).

- . Ângulo de Saída Radial ( $\gamma_f$ ): é o ângulo entre o plano de referência da ferramenta e sua superfície de saída medido no plano de trabalho.
- . Ângulo de Saída Axial ( $\gamma_p$ ): é o ângulo entre o plano de referência da ferramenta e sua superfície de saída medido no plano dorsal.

A Figura 2.9 mostra uma representação esquemática do ângulo de saída axial e do ângulo de saída radial.

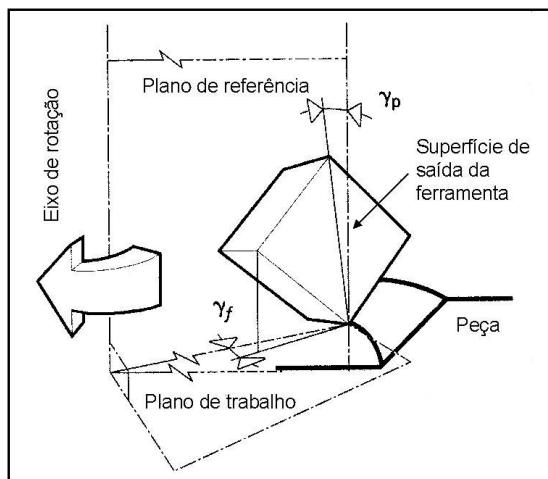


Figura 2.9 – Representação esquemática do ângulo de saída radial  $\gamma_f$  e do ângulo de saída axial  $\gamma_p$  (Modern Metal Cutting, 1994).

O ângulo considerado mais importante em uma operação de fresamento é o ângulo de saída efetivo  $\gamma_s$ . Este ângulo afeta diretamente o ângulo de cisalhamento durante o processo de formação do cavaco, tem grande influência sobre a força de corte, a potência e as temperaturas geradas na zona de corte. Normalmente, quanto mais positivo for este ângulo, menores as forças atuantes na ferramenta e a potência requerida para o corte, não esquecendo que o aumento ilimitado deste ângulo afeta diretamente na resistência mecânica da ferramenta. Valores positivos altos são indicados para matérias mais dúcteis.

Outro ângulo de grande importância é o de inclinação  $\lambda_s$ , que determina a direção de escoamento do cavaco da região do corte. No fresamento frontal, a adoção de ângulos de inclinação positivos direcionam o cavaco para fora da ferramenta, enquanto que os negativos os direcionam para o centro.

O ângulo de posição  $\chi_r$  influencia principalmente na espessura do cavaco, na direção das forças de corte, adequação da entrada da ferramenta no corte e também na potência consumida. Com relação à potência, à medida que  $\chi_r$  diminui, a largura de corte  $b$  aumenta e a espessura de corte  $h$  diminui. Portanto, ocorrerá uma maior pressão específica de corte, já que a força de corte necessária para o cisalhamento do material é então distribuída sobre uma seção transversal mais fina. Em operações de corte mais sensíveis ao aparecimento de vibrações, um maior equilíbrio das forças axiais e radiais é indicado e é conseguido com ângulos de posição variando entre 45º e 60º.

Em algumas aplicações mais específicas, como usinar rebaixos com paredes em esquadro ou livre de componentes axiais de força, ângulos de posição de 90º são aplicados. Mas esta situação é bastante limitada, pois gera altos níveis de vibração, favorecem a quebra da ponta da ferramenta além de dificultar a saída dos cavacos.

O ângulo de saída radial  $\gamma_f$  afeta principalmente a eficiência e quantidade de cavaco e também a vida da ferramenta. Ângulos de saída radiais para materiais com menor tenacidade costumam variar de zero para valores negativos enquanto para materiais dúcteis costumam ser positivos.

O ângulo de saída axial  $\gamma_p$  afeta principalmente a resistência das arestas de corte da ferramenta além de atuar também na facilitação do escoamento do cavaco e nas forças de corte.

As ferramentas, ou o processo de fresamento, podem ser classificados também de acordo com os ângulos de saída radial e axial. Nas fresas com geometria de inserto duplo-negativo, os ângulos de saída radial e axial da fresa são negativos, como é mostrado na Fig. 2.10a. Estas ferramentas podem ser usadas dos dois lados, o que significa uma boa economia e também arestas mais reforçadas. É uma geometria adequada para condições de corte mais

severas, em que se usina materiais de elevada dureza e fortes impactos de entrada, além desta geometria ser indicada para usinagem de ferro fundido.

Este tipo de geometria pode criar problemas na eliminação de cavacos, principalmente na usinagem de matérias que geram cavacos longos, além de elevar os esforços de corte devido a grande deformação causada nos cavacos.

Nas fresas com geometria duplo-positiva, mostrada na Fig. 2.10b, os ângulos de saída radiais e axiais da fresa são positivos. Estas ferramentas são menos econômicas pois suas pastilhas só podem ser usadas de um lado. Os esforços de corte são menores pois os cavacos estão submetidos a menores deformações além de terem menor contato com a superfície de saída da ferramenta. São indicados para usinar materiais que os esforços de corte são fortemente influenciados pelo ângulo de saída (não ferrosos, aços inoxidáveis e aços de baixo carbono), quando se emprega fresadoras de baixa potência e também quando a máquina e/ou peça tem pouca rigidez (Sandvik, 1989).

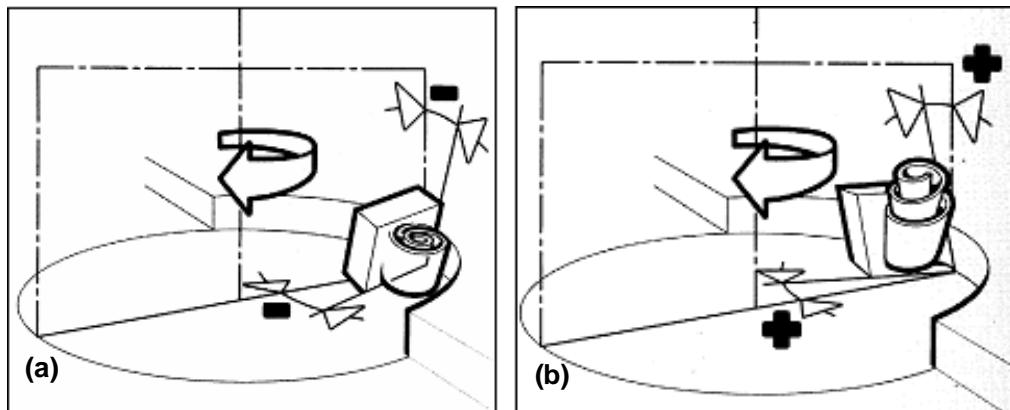


Figura 2.10 – a) Representação esquemática de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria duplo-negativo; b) Representação esquemática de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria duplo-positivo (Modern Metal Cutting, 1994).

Finalmente, as fresas com geometria positiva-negativa, mostrada na Fig. 2.11, o ângulo de saída radial é negativo e o ângulo de saída axial é positivo. Comparativamente, este tipo de geometria consome mais potência da máquina do que as fresas duplo-positivas e menos que as duplo-negativas. É indicada para o desbaste pesado, pois este tipo de geometria gera cavacos helicoidais que se levantam dos bolsões de armazenamento, além de conseguir altas taxas de remoção de material, altos avanços por dente e grandes profundidades de corte.

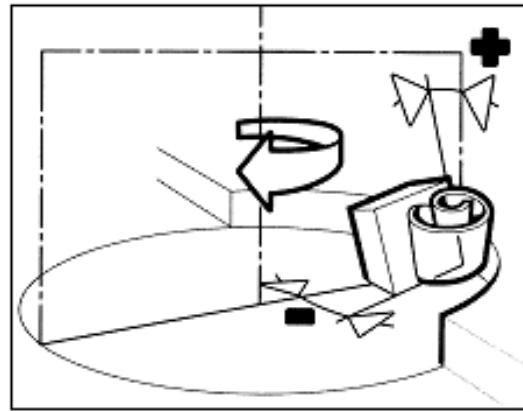


Figura 2.11 - Representação esquemática de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria duplo positiva-negativa (Modern Metal Cutting, 1994).

#### 2.1.5 Fresamento com movimento concordante e discordante

No fresamento, a relação entre o sentido de rotação da ferramenta e o avanço da peça também é de grande importância. De acordo com o sentido de rotação da ferramenta e o avanço da peça, distingui-se entre o fresamento concordante e o fresamento discordante. No fresamento discordante o avanço e o movimento de corte têm sentidos contrários, ao passo que no fresamento concordante eles apresentam o mesmo sentido, conforme ilustrado na Fig. 2.12. Porém, de acordo com posição da fresa em relação à peça, um processo de fresamento pode apresentar uma parte concordante e outra discordante.

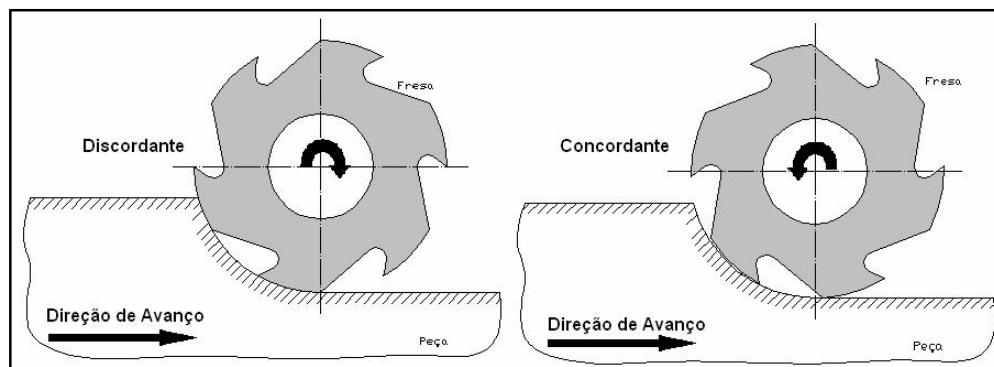


Figura 2.12 – Representação de uma operação de fresamento concordante e de uma de fresamento discordante.

No fresamento concordante puro, a aresta deixa a peça com uma espessura de usinagem igual a zero ( $h=0$ ). No fresamento discordante puro, a aresta de corte entra na peça

com a espessura de usinagem igual a zero, o que pode gerar esmagamento do material da peça e aumentando, portanto, a taxa de desgaste da ferramenta. O fresamento concordante é vantajoso sobre o discordante na maioria das situações, especialmente por que:

- . As fresas podem ter maiores ângulos de saída, fazendo com que a potência requerida seja menor;
- . O acabamento superficial é melhorado pois há uma menor possibilidade dos cavacos serem arrastados, o que danificaria a superfície usinada além de acabar com a tendência de escorregamento quando do início da formação do cavaco;
- . Os cavacos são jogados para parte de trás da ferramenta.

O fresamento discordante pode ser vantajoso nas seguintes situações (Metal's Handbook, 1989):

- . Se há folgas no mecanismo de avanço;
- . No fresamento de superfícies em que profundidade de corte varia excessivamente;
- . No fresamento de peças fundidas ou forjadas de superfícies muito rugosas, que contém carepa ou areia.

Pode haver situações no fresamento frontal em que o eixo de avanço da fresa está posicionado de maneira simétrica em relação à peça, como mostrado na Fig. 2.13. Quando isto ocorre, parte do fresamento será concordante e parte será discordante.

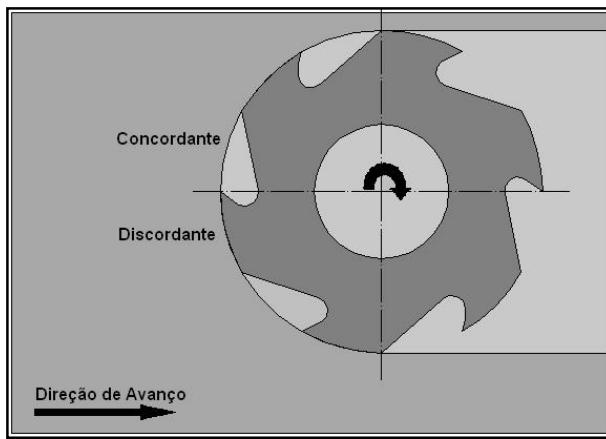


Figura 2.13 – Ocorrência de corte concordante e discordante simultaneamente em uma operação de fresamento frontal simétrico em relação à peça.

A formação do cavaco no fresamento segue os mesmos princípios básicos dos outros processos de usinagem. No entanto, o fresamento é uma operação em que o corte é

interrompido, a fresa normalmente passa a maior parte do tempo no ciclo inativo, sem usinar o material. Esta característica faz com que surjam consequências na qualidade da superfície gerada e também na vida da ferramenta.

A seguir, são mostradas algumas considerações sobre os efeitos de certas escolhas no fresamento.

#### 2.1.6 Efeitos do número de dentes da fresa

Normalmente, ao se escolher uma fresa mais indicada para uma determinada operação, alguns aspectos devem ser levados em consideração. Entre eles, o número de dentes que esta possui é de vital importância, como mostrado na Fig. 2.14. Um número excessivo de dentes (passo fino) pode causar problemas como o excesso de cavacos na região de corte e também elevar o consumo de energia. Já um número insuficiente de dentes (passo grande) pode causar problemas com o acabamento da superfície usinada, peças fora de dimensão requerida e também desgaste excessivo das arestas de corte.

Para se escolher uma fresa com número ideal de dentes deve-se levar em consideração as características do material a ser usinado. Para materiais frágeis, por exemplo, o mais indicado é um maior número de dentes, pois seus cavacos são menores causando menos interferência com a qualidade da superfície gerada.

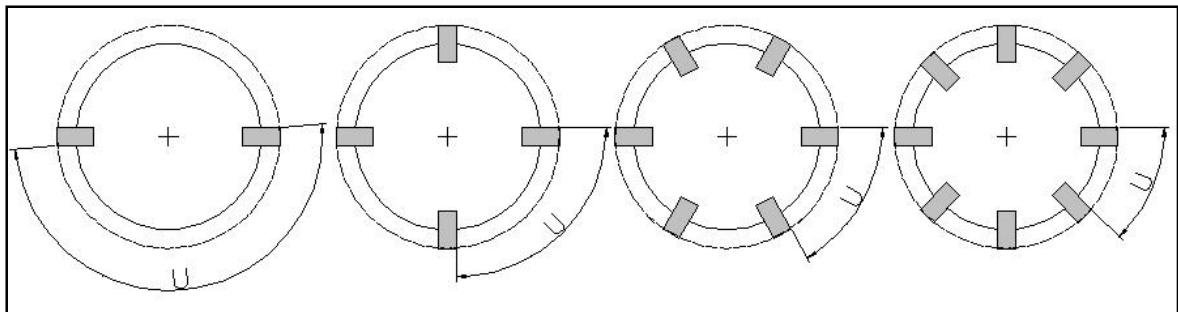


Figura 2.14 – Representação de fresas com vários números de dentes e passos ( $u$ ).

Em certas situações em que há limitação da potência e das velocidades disponíveis na máquina-ferramenta, o número de dentes também é um fator que deve ser considerado. Neste caso, o mais indicado é fazer um estudo prévio para adequar o número de dentes. Normalmente, no fresamento frontal, em que o comprimento de contato entre a ferramenta e a peça é longo, pode-se usar um número menor de dentes em casos onde a máquina-ferramenta dispõe de pouca potência.

Existem ferramentas cujas pastilhas não estão distribuídas uniformemente ao longo do perímetro da fresa. Estas ferramentas, mostradas na Fig. 2.15, são chamadas de ferramentas de passo diferencial e tem a função de evitar vibrações devido a problemas de ressonância, mesmo em condições de corte favoráveis, modificando a freqüência de entrada das arestas no corte.

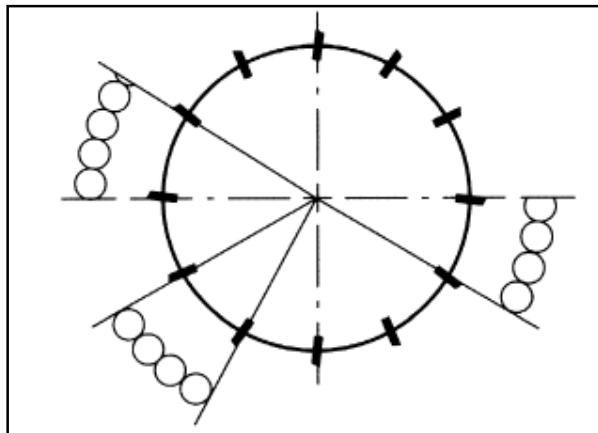


Figura 2.15 – Representação de uma fresa com o passo diferencial (Sandvik, 1989).

#### 2.1.7 Efeitos do posicionamento da fresa sobre a peça

O correto posicionamento relativo entre fresa e peça tem grande influência no resultado final da usinagem. Portanto, alguns parâmetros devem ser observados para garantir um contato favorável entre a aresta de corte e a peça a ser usinada.

A pastilha, ao entrar no corte, fica sujeita a impactos de maior ou menor magnitude. Para que esta entrada aconteça em condições mais favoráveis, um correto posicionamento relativo entre a ferramenta e a peça deve ser levado em consideração.

Quando o centro da fresa está posicionado dentro da peça, conforme Fig. 2.16b, o contato inicial é mais distante da aresta de corte, melhorando o suporte mecânico. O ângulo de entrada é negativo e o corte inicia mais favoravelmente. Quando o centro da fresa fica posicionado fora da peça de trabalho, mostrado na Fig. 2.16a, o contato é mais desfavorável entre a aresta e o material do que quando o centro da fresa fica posicionado sobre a peça. Considerando o caso do faceamento com o centro da fresa fora da peça, a ferramenta está mais suscetível à quebra, pois o ângulo de entrada é positivo.

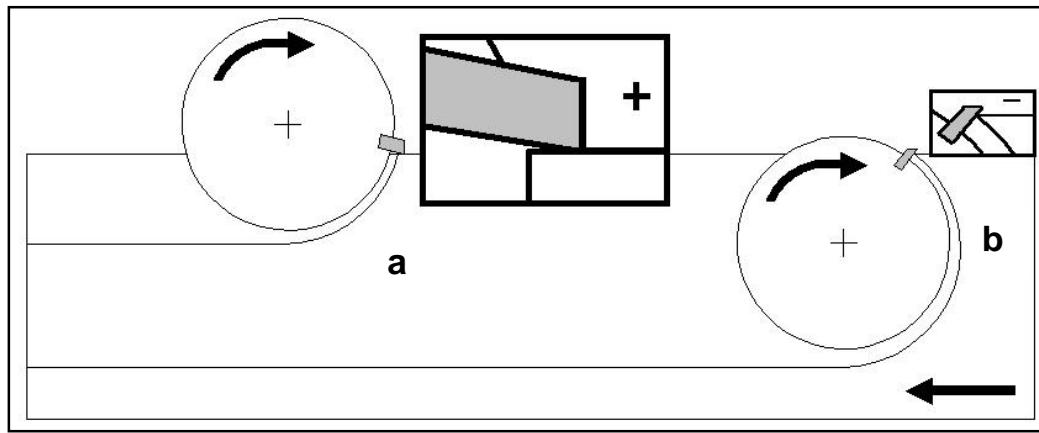


Figura 2.16 – Influência do posicionamento relativo ferramenta-peça na entrada da ferramenta no corte.

Durante a saída da ferramenta, a situação mais desfavorável é quando a pastilha sai do corte, se afastando da peça. No caso das pastilhas de metal duro, que foram feitas para resistir a tensões de compressão que ocorrem durante o corte, estarão submetidas a tensões de tração durante a saída. Isto poderá acarretar avarias nas arestas de corte.

Os ângulos negativo e positivo de saída do dente da peça, mostrados nas Fig. 2.17a e 2.17c, são os mais favoráveis, enquanto que a posição de saída do dente paralela à superfície da peça, visto na Fig. 2.17b e também no detalhe da Fig. 2.18, é o mais desfavorável, pois o ângulo de saída é zero, impondo tensões na aresta de corte e portanto diminuindo o tempo de vida da ferramenta (Sandvik, 1994).

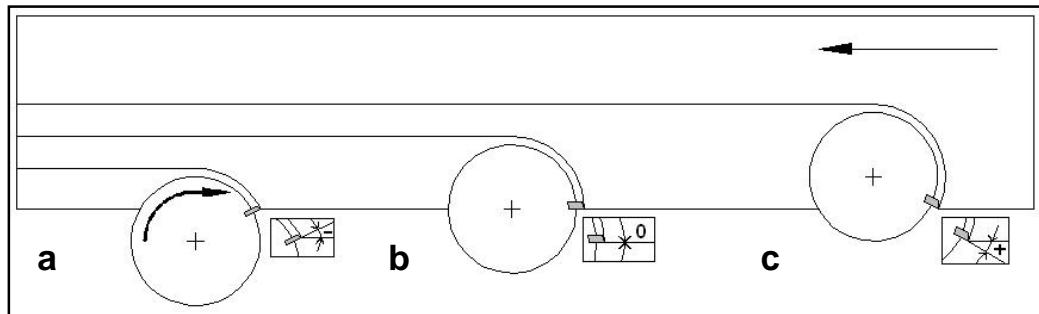


Figura 2.17 – Características da saída da ferramenta do corte conforme o posicionamento entre ferramenta-peça.

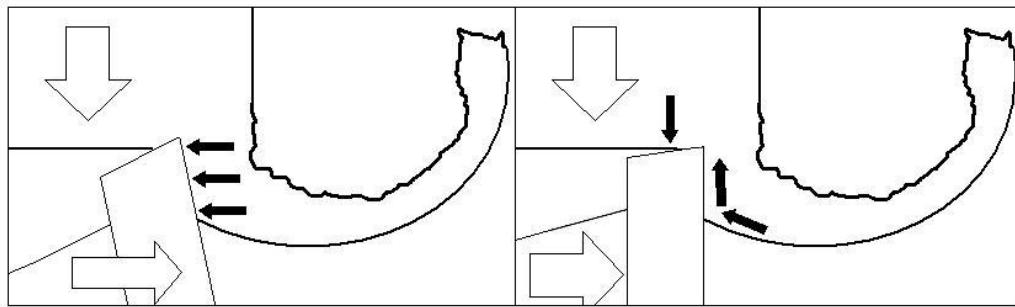


Figura 2.18 – Detalhe das tensões ocorridas na saída da ferramenta com ângulo zero em relação à peça.

A quantidade de arestas no corte também depende da posição da fresa. Se a fresa tiver um diâmetro muito maior que a largura da peça, pode ser vantajoso usar a disposição lateral para ter mais arestas no corte simultaneamente e, portanto, menores espessuras de cavaco, maior estabilidade no processo e consequentemente maior vida da ferramenta.

De acordo com a posição da peça, as resultantes da força radial de corte podem ter diversas direções. O posicionamento da fresa com o seu centro alinhado com a linha de centro da peça, como na Fig. 2.19a, pode ser vantajoso em certas situações, como a que a fixação da peça ou a máquina-ferramenta não apresentam rigidez suficiente e a fresa apresenta mais de um dente no corte simultaneamente. Caso não haja mais de um dente no corte simultaneamente, podem ocorrer vibrações devido ao desbalanceamento. Para esta situação, é indicado que se use o centro da fresa deslocado da linha de centro da peça, conforme Fig. 2.19b.

O controle da espessura do cavaco em operações de fresamento é um fator de extrema relevância quando se quer evitar sobrecargas, controlar a potência e volume de material removido, além de melhorar a performance da pastilha em termos de vida.

Estimar a espessura de um cavaco em um processo de fresamento não é uma tarefa simples. No fresamento, há um grande número de variáveis envolvidas, além do fato da espessura não ser constante ao longo do comprimento do cavaco.

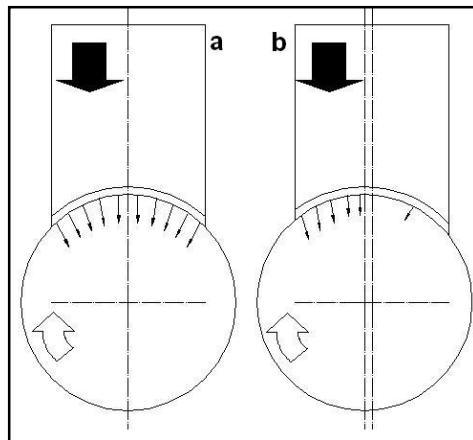


Figura 2.19 – Representação das forças resultantes com o centro da fresa alinhada com o centro da peça (a) e o centro da fresa fora da linha de centro da peça.

No fresamento é costume adotar uma espessura média do cavaco ( $hm$ ), Fig. 2.20, que é definida através de uma relação entre a penetração de trabalho  $a_e$  e o diâmetro da fresa que forma o arco “alfa” gerado pela ferramenta na peça.

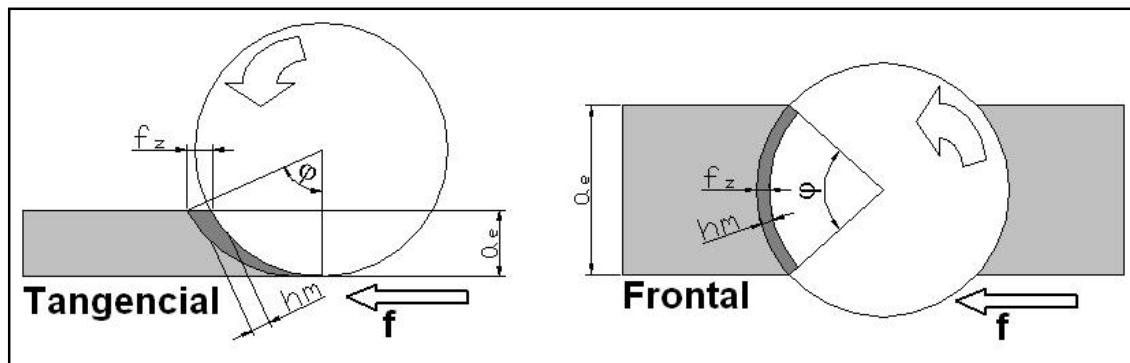


Figura 2.20 – Espessura média ( $hm$ ) em função do posicionamento entre a ferramenta e a peça.

Já a máxima espessura ( $h$ ), que é a representação da espessura do cavaco não deformado, é mostrada na Fig. 2.21. Esta espessura tem seu valor definido pela distância entre dois passos consecutivos da ferramenta de corte e é importante para estimar a força máxima que irá atuar durante o corte sobre a ferramenta.

A espessura do cavaco pode ser influenciada principalmente pelo diâmetro da fresa, seu posicionamento e também pelo ângulo de entrada das pastilhas na peça. No caso em que o eixo de avanço não intercepta a penetração de trabalho  $a_e$ , a espessura do cavaco assume

valores menores que o valor do avanço por dente  $f_z$ . Portanto, uma penetração de trabalho menor gera uma espessura de cavaco menor.

Na situação em que o eixo de avanço da fresa trabalha dentro da região da penetração de trabalho, a espessura máxima do cavaco será igual ao avanço por dente da ferramenta. Portanto, quanto maior o  $a_e$ , mais espessos serão os cavacos formados, até o limite em que o eixo de avanço coincide com a superfície lateral da peça.

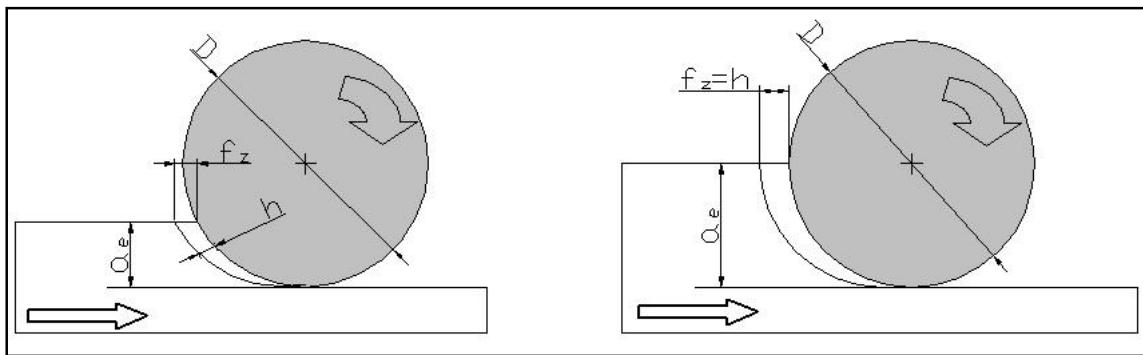


Figura 2.21 – Espessura máxima ( $h$ ) em função do posicionamento entre a ferramenta e a peça.

#### 2.1.8 Materiais para ferramentas de corte no fresamento

A seleção do material da ferramenta de usinagem deve levar em consideração vários fatores, tais como o material da peça, os parâmetros de corte, o processo de usinagem e também a geometria da ferramenta.

O surgimento nas últimas décadas de novos materiais e ligas estruturais com elevada dureza utilizadas para fabricação de ferramentas contribuiu para o aprimoramento dos processos de usinagem. Porém, as operações de corte interrompido (como é o caso do fresamento) e também a usinagem de materiais frágeis, requerem ferramentas com tenacidade adequada para suportarem os impactos mecânicos e variações de temperatura que estão submetidas.

Existe um número grande de materiais para ferramentas de fresamento. Não se pode esperar que qualquer um destes materiais forneça todas as qualidades que se espera de uma ferramenta. Quando se escolhe um aspecto mais relevante nas propriedades de um material para fresas, outros podem estar sendo sacrificados. Dureza e tenacidade são propriedades normalmente opostas, o que implica que se uma dessas propriedades tem valor elevado, a outra estará sendo prejudicada. Portanto, encontrar um meio termo entre estas propriedades em uma ferramenta é normalmente um desafio para os fabricantes e uma necessidade para a indústria. Atualmente existem no mercado ferramentas que conseguem conciliar alta dureza e

boa tenacidade, através de um rígido controle do processo de fabricação, novas composições químicas, grãos mais finos, tratamentos térmicos e aplicação de revestimentos, o que lhe conferem um grande campo de aplicação.

Desta forma, alguns materiais de ferramentas têm aplicação mais difundida no fresamento. Dentre estes, pode-se citar o aço-rápido, o metal duro, materiais cerâmicos, CBN (PCBN) e o diamante.

O aço-rápido tem aplicação mais difundida em fresas com diâmetros pequenos cujas velocidades de corte são relativamente pequenas. Nesta categoria de materiais pode-se encontrar também as fresas de aço-rápido revestidas, cuja aplicação está voltada para situações que necessitem de maior resistência ao desgaste e também as dimensões e condições de corte não justifiquem o emprego de materiais mais duros. O revestimento normalmente empregado nestas ferramentas é o TiN (nitreto de titânio). Ele é aplicado através do processo PVD (*physical vapour deposition*), que tem temperaturas de deposição em torno de 450º a 500º C, o que não prejudica tratamentos térmicos que a ferramenta foi submetida previamente.

O metal duro é um material sinterizado constituído de partículas finas de materiais duros como o WC (carboneto de tungstênio) e de um ou mais materiais aglomerantes (ferro, níquel e principalmente o cobalto). Esta combinação faz com que estas ferramentas conciliem uma boa tenacidade e dureza. Na constituição destas ferramentas também podem aparecer, porém em menores proporções, partículas duras como carboneto de titânio, carboneto de nióbio e carboneto de tântalo.

Os vários tipos de metal duro são classificados pela norma ISO em seis grupos (P, M, K, N, H, S), sendo as três últimas classes relativamente recentes em comparação às três primeiras. As classes também se subdividem em números: a classe P varia de P01 até P50; a classe M varia de M01 até M40; a classe K varia de K01 até K40. Quanto maior o número da classificação, maior é a tenacidade e menor a dureza e a resistência ao desgaste.

O grupo P é o grupo que apresenta maior teor de carbonetos (TiC, TaC) na composição química, conferindo-lhes alta dureza e resistência ao desgaste abrasivo. É indicado para usinrar materiais dúteis (como o aço e o alumínio), que produzem cavacos contínuos e apresentam uma área de contato grande entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, resultando em temperaturas elevadas e grandes taxas de desgaste. O grupo M é um grupo intermediário nos teores de carbonetos na sua composição química. Isto faz com que tenha propriedades intermediárias entre os grupos P e K. Tem aplicações variadas na usinagem. O grupo K é um grupo que só possui carboneto de tungstênio como constituinte de elevada dureza. Esta característica faz com este grupo possua elevada tenacidade. É indicado para usinagem de materiais frágeis (ferro fundido), que produzem cavacos curtos, apresentam pouco contato com

a superfície de saída, evitando problemas de difusão e consequentemente reduzindo o desgaste de cratera.

Quanto às classes mais recentes, a N é empregada na usinagem de não ferrosos como ligas de alumínio e o cobre e ligas de cobre, a classe S na usinagem de superligas resistentes ao calor (à base de ferro ou níquel, cobalto, titânio) e a classe H na usinagem de aços endurecidos, extra duros e ferros fundidos coquilhados.

Ao se empregar proporções maiores de carbonetos, consegue-se maior resistência ao desgaste, porém compromete a tenacidade da ferramenta, aumentando a fragilidade da aresta. Quando se aumenta a proporção do cobalto, consegue-se aumentar a tenacidade, o que faz aumentar a resistência da ferramenta a choques térmicos e mecânicos, comuns ao fresamento, porém piora propriedades como a resistência ao desgaste e as deformações plásticas na aresta (Sandvik, 1999).

O tamanho do grão empregado na composição do metal duro é outro aspecto relevante na seleção da ferramenta. Normalmente, quando se empregam grãos menores consegue-se maior resistência ao desgaste, reduzindo a abrasão e a adesão, melhorando-se a tenacidade reduzindo a tendência ao lascamento e a fadiga (Sandvik, 1999).

Praticamente todas as ferramentas de metal duro atualmente são revestidas. O revestimento tem a função de aumentar a resistência ao desgaste da ferramenta, aumentar dureza, diminuir afinidade química com o material da peça e reduzir atrito nas superfícies da ferramenta em contato com o cavaco e a peça. Os materiais mais comumente aplicados como revestimentos são: TiN (nitreto de titânio), TiNAI (nitreto de titânio alumínio), TiC (carboneto de titânio) e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de alumínio).

O TiN diminui os níveis de atrito com o cavaco, tem baixos níveis de afinidade química e também possui boa dureza. Normalmente é empregada como a última camada quando se utiliza revestimento com várias camadas.

O  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , também um material cerâmico, garante boas propriedades térmicas, como estabilidade em altas temperaturas além de resistência química e a oxidação. Nos revestimentos multi-camadas, normalmente é usado como camada intermediária.

As principais características do TiC são elevada dureza e boa adesividade com materiais dos substratos de ferramentas. Por isso é indicado como camada superior ou como a primeira camada, que está em contato com o substrato.

Normalmente, as ferramentas apresentam uma seqüência de deposição, a partir do substrato, constituído de TiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e por último, o TiN. Porém, hoje em dia é possível encontrar ferramentas com número muito maior de camadas, com estes e outros materiais e espessuras da ordem de poucos nanômetros.

Os materiais cerâmicos têm citações de seu uso desde o princípio do século XX, porém demorou a se inserir competitivamente no mercado devido a sua grande fragilidade. Atualmente, com o aparecimento de cerâmicas à base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a alumina), à base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), além de cerâmicas reforçadas com whiskers, suas aplicações se multiplicaram, sendo empregadas até em operações que exigem boa tenacidade, como o fresamento em ferro fundido (Machado; da Silva, 2004).

Normalmente, as cerâmicas têm a seguinte classificação:

- À base de óxido de alumínio: têm em sua composição química  $\text{ZrO}_2$ , TiN ou TiC (cerâmicas mistas ou pretas) e também a alumina reforçada com whiskers.
- À base de nitreto de silício: são cristais de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , com uma fase intergranular de  $\text{SiO}_2$  que são sinterizados na presença da alumina (SIALON) e/ou óxido de ítrio ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) e óxido de manganês ( $\text{MgO}$ ).

Existem também materiais que contém uma fase cerâmica e uma fase metálica. Estes materiais são os *cermets* e seus componentes principais são o TiC, TiN e o  $\text{Mo}_2\text{C}$  (carboneto de molibdênio), além do elemento de ligação Ni. Estes materiais pertencem a um grupo intermediário entre as cerâmicas e o metal duro. Tem como principais propriedades a alta dureza a altas temperaturas e grande estabilidade química.

O diamante sintético policristalino (PCD) pertence a classe de materiais normalmente chamada de ultraduros. Este material é constituído de pequenas e finas partículas de diamante, de granulação definida para se obter o máximo de homogeneidade e densidade. A camada de PCD é produzida pela sinterização de partículas de diamante com cobalto num processo de alta pressão (6000 a 7000 MPa) e temperatura (1400° a 2000°C). Uma camada de aproximadamente 0,5 mm de espessura ou é aplicada diretamente sobre uma pastilha de metal duro ou então é ligada ao metal duro através de brasagem (Diniz; Marcondes; Coppini, 2001). Uma de suas principais aplicações é no fresamento de ligas de Al-Si.

Além do diamante, o nitreto cúbico de Boro (CBN e PCBN) também pertence à classe dos ultraduros. Tem uma estrutura hexagonal com um número aproximadamente igual de átomos de boro e nitrogênio arranjados alternadamente. São produzidos de maneira análoga ao PCD, onde uma camada de 0,5 mm de espessura de partículas de nitreto de boro cúbico é sinterizado na presença de uma fase ligante, efetivando simultaneamente a fixação em uma base de metal duro. Geralmente é indicado para se usinar em situações onde o PCD não pode ser utilizado.