

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

***ANÁLISE DE FORÇAS NO FRESAMENTO DE TOPO CONVENCIONAL E COM
ALTAS VELOCIDADES DE CORTE***

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

SÉRGIO EDUARDO MORENO MACEDO

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 2001

**ANÁLISE DE FORÇAS NO FRESAMENTO DE TOPO CONVENCIONAL E COM
ALTAS VELOCIDADES DE CORTE**

SÉRGIO EDUARDO MORENO MACEDO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

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



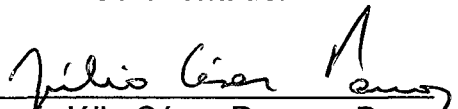
Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Orientador



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.

Co-orientador



Prof. Júlio César Passos, Dr.
Coordenador da Pós-Graduação

BANCA EXAMINADORA



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.

Presidente



Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph. D.



Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.



Dr. Joel Martins Crichigno Filho, Dr.-Ing.

Aos meus pais,
meu alicerce.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter pela orientação, paciência, apoio e amizade, sem os quais este trabalho não poderia ser concluído.

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner também pela orientação, apoio e amizade demonstrados desde meus primeiros dias do curso de graduação.

Ao Prof. Dr.-Ing. Gerhard Petuelli por ter aberto as portas do LWZM (Labor für Werkzeugmaschinen - Universität - GH Paderborn Abteilung Soest) e dado todas as condições para a realização dos ensaios com altas velocidades de corte, além do indescritível apoio pessoal durante minha estadia em Soest, Alemanha.

Aos colegas LWZM, em especial ao Herr Hulsbeck, Herr Rötering, Herr Müller e Herr Heinemann, que também deram grande apoio profissional e pessoal.

À CAPES pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho, através de concessão de bolsa de estudos.

À firma Walter AG, Alemanha, por ter doado as ferramentas utilizadas nos ensaios de alta velocidade.

À firma Indufresa Comercial Ltda., na pessoa do Sr. Sérgio Paolino, que doou as fresas de topo reto e se mostrou sempre disposto a auxiliar trabalhos de pesquisa.

Aos colegas do LMP pela amizade e auxílio durante nossos anos de trabalho conjunto. Agradeço especialmente aos amigos que direta ou indiretamente deram sua contribuição a este trabalho: Cleiton Rodrigues Teixeira, Milton Pereira, Haroldo Osis, Joel Martins Crichigno Filho, Claudia Heusi Silveira, Henrique Brüggmann, Mühle, Walmir Markus, Oliver Odebrecht, Jefferson de Oliveira Gomes, Pablo Deivid Valle, Pablo Ricardo de Castro, Carlos Alberto Bork, Cristiano Markus, Hélio Irineu José, Moacir Eckhardt, Alexandre Magno, Maria Guilhermina Salasário.

Aos meus pais Lídia Moreno Macedo e Waldemar Macedo, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida, mesmo quando o que faço não é de seu agrado.

À minha esposa Grasiella Maria da Silva Macedo pelo amor, apoio e companheirismo, mantendo-se sempre ao meu lado nesta nossa caminhada.

Aos colegas de curso e professores da Engenharia Mecânica da UFSC.

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

Sumário

Simbologia	vii
Resumo	x
Abstract	xi
1. Introdução	1
2. Estado da Arte	5
2.1. O Processo de Fresamento	5
2.2. Fresamento de Topo	8
2.3. Excentricidade e Deflexão da Fresa	9
2.4. Vibrações no Fresamento	11
2.5. Forças no Fresamento	15
2.6. Fresamento com Altas Velocidades de Corte	25
2.7. Desgaste da Ferramenta	30
2.8. Materiais para Fresas	32
2.9. Fluidos de Corte	34
3. Planejamento Experimental	37
3.1. Fresamento de Topo Reto Convencional	38
3.1.1. Ensaios de força	41
3.1.2. Ensaios de desgaste	42
3.2. Fresamento de Topo esférico com Altas Velocidades de Corte	44
4. Análise dos Resultados	49
4.1. Ensaios de Fresamento de Topo Reto Convencional	50
4.1.1. Efeito da excentricidade da fresa nas forças	50
4.1.2. Efeito da vibração auto-excitada nas forças	56
4.1.3. Influência dos parâmetros de corte (d , z , a_e) nos ensaios de força	59
4.1.4. Resultados dos ensaios de desgaste	67
4.2. Ensaios de Fresamento de Topo Esférico com Altas Velocidades de Corte	73

5. Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos	82
5.1. Conclusões	82
5.2. Sugestões para Futuros Trabalhos	85
6. Referências Bibliográficas	87
7. Anexos	97
7.1. Características dos Equipamentos e Produtos Utilizados	97
7.1.1. Fresadora vertical convencional	97
7.1.2. Fresadora vertical de alta velocidade	97
7.1.3. Sistema de medição de forças	98
7.1.4. Sistema de aquisição de imagens	101
7.1.5. Equipamentos para avaliação geométrica das fresas	102
7.1.6. Sistema de minimização de fluidos de corte	102
7.1.7. Descrição dos fluidos de corte utilizados	103
7.2. Composição Química das Ferramentas de Aço-Rápido e Corpos de Prova Utilizados	103
7.3. Médias e Desvio-Padrão de F_{xy} e θ para os Ensaios de Força EF	104
7.4. Médias e Desvio-Padrão do Desgaste do Flanco Principal para os Ensaios de Desgaste ED	107
7.5. Comparações entre os Ensaios com Altas Velocidades de Corte	108

Simbologia

Letras maiúsculas

F	N	Força de usinagem
F_{ax}	N	Força na direção axial
F_c	N	Força de corte
F_e	N	Força de ensaio
F_r	N	Força na direção radial
F_x	N	Força na direção x
F_y	N	Força na direção y
F_z	N	Força na direção z
F_{xy}	N	Resultante das forças no plano xy ($\vec{F}_{xy} = \vec{F}_x + \vec{F}_y$)
KT	mm	Profundidade da cratera
R_a	μm	Rugosidade média aritmética
R_t	μm	Profundidade máxima de rugosidade
$R_{t\text{ teór}}$	μm	Profundidade máxima de rugosidade teórica
R_z	μm	Rugosidade média
VB	mm	Largura da marca de desgaste de flanco

Letras minúsculas

a_e	mm	Profundidade de corte radial (penetração de trabalho, largura de usinagem, incremento lateral, largura de engajamento)
a_p	mm	Profundidade de corte axial (penetração passiva)
$a_{p\text{ cr}}$	mm	Profundidade de corte axial crítica
$a_{p\text{ cr min}}$	mm	Profundidade de corte axial crítica mínima
b_r	mm	Distância entre linhas
d	mm	Diâmetro da fresa
f	mm	Avanço por rotação
f	Hz	Frequência

f_z	mm	Avanço por dente
h_c	mm	Espessura de usinagem
m	-	Número inteiro positivo
n	min^{-1} , rpm	Rotação por minuto
v_f	m/min	Velocidade de avanço
v_{fh}	m/min	Velocidade de avanço na direção horizontal
v_c	m/min	Velocidade de corte
v_{cm}	m/min	Velocidade de corte média
z	-	Número de dentes da fresa

Letras gregas

β_l	graus	Ângulo de inclinação longitudinal
β_t	graus	Ângulo de inclinação transversal
Δ	-	Diferença
δ	mm	Deflexão da fresa de topo
γ_f	graus	Ângulo de saída radial
γ_p	graus	Ângulo de saída axial
φ	graus	Ângulo de rotação
ϕ	graus	Ângulo de fase
λ	graus	Ângulo de posição do dente de referência
θ	graus	Direção da força resultante F_{xy}
ρ	mm	Excentricidade da fresa de topo

Abreviaturas e símbolos químicos

A/D	Analógico/Digital
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
CAD	Computer Aided Design

CAM	Computer Aided Manufacturing
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
CIRP	Collège International pour l'Etude Scientifique des Techniques de Production Mécanique (International Institution for Production Engineering Research)
CNC	Computerized Numerical Control
CVD	Chemical Vapour Deposition
FSO	Full Scale Operation
LABSOLDA	Laboratório de Soldagem - UFSC
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão - UFSC
M.U.	Mechanical Units (por exemplo N, bar, g)
NC	Numerical Control
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines
PC	Personal Computer
PCBN	Nitreto de Boro Cúbico Policristalino
PCI	Peripheral Component Interconnect
PVD	Physical Vapour Deposition
RAM	Random Access Memory
RWTH	Rheinisch Westfälische Technische Hochschule
Si ₃ N ₄	Nitreto de Silício
TiN	Nitreto de Titânio
TU	Technische Universität
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VGA	Video Graphics Array

Resumo

Neste trabalho são apresentadas características da resultante de força F_{xy} , seu ângulo de direção θ e, em alguns casos, as componentes F_x , F_y e F_z em dois modos de fresamento: topo reto com velocidades de corte convencionais e topo esférico com altas velocidades de corte. No primeiro modo foram avaliados os efeitos da excentricidade, da vibração auto-excitada e de parâmetros de corte (d , z e a_e). Confirmou-se que a principal causa da excentricidade é a montagem da fresa, e suas conseqüências foram a sobrecarga sofrida por alguns dentes, além do deslocamento do conteúdo de freqüências do sinal de força da freqüência de entrada de dentes para a de rotação. A vibração auto-excitada foi extremamente prejudicial ao processo, causando forte sobrecarga e podendo danificar ferramenta e peça. Foram apresentadas características da influência dos parâmetros citados que podem ser utilizadas no planejamento do fresamento. Nos ensaios com v_c convencional também foram avaliadas a influência do fresamento a seco, com emulsão, com minimização de fluido de corte, além da v_c e do uso de 5% de cobalto no aço-rápido na evolução de F_{xy} com o desgaste. O uso da emulsão aumentou a vida da fresa em mais de 6 vezes e reduziu F_{xy} final em 25%. O aumento em 2 vezes de v_c não foi suficiente para que o ensaio com emulsão apresentasse o mesmo desgaste do ensaio a seco. O uso da minimização teve o mesmo efeito da adição de cobalto, dobrando a vida e reduzindo em 25% a F_{xy} , em comparação com o ensaio a seco. Nos ensaios com alta v_c , devido à limitação da freqüência de ressonância do dinamômetro piezelétrico, analisou-se somente a componente estática de F_{xy} , medida para várias inclinações da fresa em relação à superfície fresada, no fresamento concordante, discordante e combinado. Obtiveram-se padrões de comportamento que podem ser utilizados na determinação de estratégias de fresamento. A intensidade de F_{xy} para as diversas condições foi semelhante e somente θ apresentou diferenças de acordo com a geometria do corte. A atuação do gume transversal da fresa foi bastante prejudicial ao processo, promovendo sobrecargas e esmagamentos de material da peça.

Abstract

This work presents the characteristics of the resulting force F_{xy} , its direction angle θ , and in some cases, the components F_x , F_y and F_z in two ways of milling: flat end milling with normal cutting speed and ball end milling with high-speed cutting. The first way of milling evaluated the effects of eccentricity, chatter vibration and the cutting parameters (d , z and a_e). The main source of the eccentricity, which is the mounting condition of the mill, was verified, and its consequences were the overload of certain teeth and the shifting of the content of the force signal away from the tooth passing frequency to the spindle rotational frequency. The chatter vibration was very damaging to the process, overloading the mill and leading to possible damage of the tool or workpiece. The influences of the cutting parameters stated earlier were presented, which may help future planning of the end milling process. The influence of milling with emulsion, minimal amount of cutting fluid, dry cutting, two different cutting speeds and the addition of 5% Cobalt in the HSS were evaluated relating the force F_{xy} and the wear of the mill for the experiments with normal cutting speed. Milling with emulsion increased tool life by more than 6 times and decreased the final F_{xy} by 25%. The cutting speed was then doubled, but it was not enough to have the same wear as the dry cutting experiment. The end milling process with minimal amount of cutting fluid had the same effect as using a 5% Co tool, doubling the tool life and decreasing the final F_{xy} by 25%, compared to the dry process. The experiments with high-speed cutting were limited by the resonance frequency of the piezoelectric dynamometer, and only the static content of the force F_{xy} signal was evaluated. The conditions were different angles between the tool and the milled surface for the up milling, down milling, and combined up and down milling. Some standards of behaviour for future use in planning strategies of the high-speed cutting milling were obtained. The intensity of the F_{xy} was similar for many conditions of the experiments, and only the angle θ was different according to the geometry of the cutting process. The centre cutting edge was very damaging for the process when in contact with the workpiece, and caused overloading and crushing of the workpiece material.

1. Introdução

O fresamento é um dos mais universais, ainda que complexo, processos de usinagem, tendo a maior variação em tipos de máquinas e ferramentas utilizadas e movimentos da peça que qualquer outro método básico de usinagem. As vantagens mais importantes são a alta taxa de remoção de material, a capacidade de produção de superfícies com elevada qualidade e a grande variedade de ferramentas disponíveis. As aplicações do processo incluem a produção de superfícies planas, contornos, rasgos, ranhuras, cavidades e roscas, entre outras [1-4].

Um dos métodos de fresamento é o fresamento de topo. Este é o mais comum e amplamente utilizado método, sendo bastante versátil e possuindo o maior número de tipos padronizados, formas e tamanhos de fresas. As fresas de topo são utilizadas para facear, ranhurar, executar cavidades, rebaixos, matrizes, gravações, rasgos de todos os tipos e tamanhos e fresar contornos. Um problema comum em fresas de topo é a baixa precisão de giro e a possibilidade de vibração devido à deflexão [1, 2, 5, 6]. A ocorrência da excentricidade é praticamente inevitável, e atribui-se isso principalmente a erros na montagem da ferramenta [7-10]. Em virtude da fresa de topo estar fixa por uma única extremidade e devido à sua característica de falta de rigidez surgem também deflexões pela ação das forças de usinagem [8, 11].

Também é comum no fresamento de topo o surgimento de vibrações auto-excitadas, principalmente quando o processo apresenta altas taxas de remoção. As principais conseqüências são a piora na qualidade superficial e dimensional da peça, o desgaste excessivo ou a quebra da ferramenta e a limitação da produtividade do processo [12-14].

A utilização de altas velocidades de corte reduz as forças na usinagem, proporciona que o calor gerado no processo seja removido em grande parte pelo cavaco, produz superfícies com melhor acabamento e menos afetadas termicamente, permite a usinagem em regiões de estabilidade, livres de vibrações auto-excitadas e reduz a formação de rebarbas. Desta forma, o fresamento com altas velocidades de corte, de 5 a 10 vezes maior que o utilizado convencionalmente, tem como um dos maiores potenciais a fabricação de moldes e matrizes [15-21].

Moldes e matrizes geralmente são constituídos de muitas superfícies complexas que podem ser usinadas, sem danificar o contorno, por fresamento em três eixos ou cinco eixos com fresa de topo. A utilização de altas velocidades de corte tem como consequência o aumento na mesma proporção da velocidade de avanço, permitindo melhor e mais rápida aproximação do perfil final da peça, considerável redução do tempo de trabalho final manual, redução de tempos e custos e aumento de qualidade das peças [15-18, 20-22].

A principal limitação do processo de usinagem com altas velocidades de corte é o acentuado desgaste da ferramenta, principalmente para o corte de aços, ferros fundidos e ligas de baixa usinabilidade. Entretanto, a escolha adequada do tipo de estratégia a ser utilizada tem consequência direta na vida da ferramenta e também na qualidade dimensional do componente usinado [15-21, 23].

Na análise do processo de usinagem em termos quantitativos, a caracterização das forças envolvidas no corte é de fundamental importância para a pesquisa e o desenvolvimento de modelos, para a otimização, o monitoramento e o controle do processo. Em virtude de sua relativa facilidade de medição e sua relevância física, as forças são, freqüentemente, elementos-chave para o entendimento da cinemática e da dinâmica de máquinas-ferramentas e processos de usinagem. O conhecimento da grandeza e direção da força de usinagem é de importância no projeto dos elementos de máquinas-ferramentas, na determinação dos parâmetros de corte, no conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante o processo de corte, no esclarecimento dos mecanismos de desgaste e na estimativa da precisão de usinagem atingível [1, 4, 5, 24-27].

As pesquisas na área da engenharia de fabricação, principalmente no ramo da usinagem, têm dado forte ênfase a sistemas de manufatura totalmente automatizados, integrados e auto-ajustáveis que são capazes de usinar diversas peças e controlar o processo sem a supervisão ou a intervenção humana. Para atingir tal objetivo, devem ser criados sistemas simples e robustos de monitoramento de usinagem que garantam segurança e eficiência na remoção de material, podendo detectar quebra de ferramenta, desgaste, vibrações, sobrecargas e outras muitas anomalias indesejadas. Entre os recursos disponíveis para os sistemas de monitoramento, um dos mais utilizados é a medição de forças durante a usinagem, pois essas podem ser relacionadas com a mecânica do processo [28-37].

O objetivo geral deste trabalho foi medir as forças durante o processo de fresamento de topo, sob diversas condições, para buscar padrões de comportamento que possam ser utilizados em sistemas de monitoramento do processo, na determinação das condições de usinagem mais adequadas para um determinado caso e na avaliação das influências de alguns parâmetros de corte nas forças.

O desenvolvimento do trabalho foi dividido em dois grupos de pesquisa com objetivos específicos, estabelecidos em função do tipo de ferramenta e condição de velocidade de corte. No primeiro grupo estão as análises do fresamento de topo reto com velocidades de corte convencional e no segundo grupo o fresamento de topo esférico com altas velocidades de corte.

No primeiro grupo o objetivo foi analisar o comportamento das componentes de força F_x , F_y e F_z no fresamento de rasgos com fresas de topo reto em condições normais, com elevada excentricidade e com vibração auto-excitada. Esta análise buscou identificar padrões de comportamento para que estas anomalias possam ser detectadas em sistemas de monitoramento em processo, fornecer subsídios para o estudo destes fenômenos e evitar seu surgimento.

Ainda neste grupo foram avaliadas as características da resultante das forças F_x e F_y (plano xy), denominada F_{xy} e também o ângulo de direção (θ) desta resultante. Esta avaliação foi efetuada para diferentes condições de trabalho, alterando-se parâmetros de usinagem tais como diâmetro da fresa (d), número de dentes (z) e profundidade de corte radial (a_e). Novamente o que se buscou foram padrões de comportamento das forças e informações que possam ser utilizadas na determinação da melhor condição de fresamento para determinada aplicação.

Por fim avaliou-se o comportamento das forças com o desgaste da fresa para alguns fluidos de corte, velocidades de corte e material de ferramenta. Neste item a ênfase foi dada mais para a evolução das forças com o desgaste do que para a forma de desgaste propriamente dita.

O objetivo do segundo grupo dos ensaios foi avaliar o comportamento de F_{xy} no fresamento de topo esférico com altas velocidades de corte para diversas inclinações da fresa em relação à superfície a ser usinada no fresamento concordante, discordante e combinado. Buscou-se com estes experimentos simular as muitas condições a que a fresa é submetida durante a usinagem de uma cavidade complexa, como as existentes em moldes e matrizes. O objetivo foi obter informações para a elaboração de

estratégias de usinagem que reduzam o desgaste da fresa, que é crítico em altas velocidades, e também minimizem deflexões indesejadas da ferramenta e da peça.

Este trabalho apresenta no Capítulo 2 o embasamento teórico básico no qual todo desenvolvimento efetuado está fundamentado. No Capítulo 3 tem-se as informações necessárias para o entendimento de como os experimentos foram realizados. A apresentação e análises dos resultados obtidos nos ensaios, as conseqüências para o processo e as relações com a teoria estão no Capítulo 4. O Capítulo 5 apresenta as conclusões finais e sugestões para a elaboração de futuros trabalhos. As referências bibliográficas e informações adicionais estão nos capítulos 6 e 7, respectivamente.

2. Estado da Arte

2.1. O Processo de Fresamento

Fresamento é um processo de usinagem para remoção de material por movimento relativo entre a peça e uma ferramenta rotativa, normalmente de múltiplos gumes, denominada fresa. Em algumas aplicações a peça permanece fixa enquanto a ferramenta rotativa se movimenta sobre essa a uma determinada velocidade. Em outras aplicações tanto a peça quanto a fresa se movem uma em relação à outra e em relação à máquina-ferramenta. Contudo, freqüentemente a peça se movimenta com uma velocidade de avanço pequena em relação à fresa, que possui uma rotação relativamente alta. Uma característica do processo é que cada gume da fresa remove uma porção de material da peça na forma de pequenos cavacos individuais [1-3, 38]. Praticamente toda operação de fresamento consiste em corte interrompido, onde cada gume atua num tempo inferior à metade do necessário para a ferramenta completar uma revolução. Em consequência do duplo movimento, rotação da fresa e avanço da peça, a espessura do cavaco varia constantemente [1, 5].

As operações de fresamento são efetuadas em diferentes máquinas-ferramentas. Desde que a fresa e a peça possam se movimentar relativamente entre si, independentemente ou em combinação, uma grande variedade de operações podem ser efetuadas por fresamento. As aplicações do processo incluem a produção de superfícies planas, contornos, rasgos, ranhuras, cavidades e roscas, entre outras [1-4].

O fresamento é um dos mais universais, ainda que complexo, processos de usinagem. O processo tem a maior variação em tipos de máquinas utilizadas, movimentos da peça e tipos de ferramentas que qualquer outro método básico de usinagem. As vantagens mais importantes são a alta taxa de remoção de material, a capacidade de produção de superfícies com elevada qualidade e a grande variedade de ferramentas disponíveis. Os gumes das fresas podem ser produzidos para formar muitos tipos de superfícies complexas [1-3]. Por outro lado, comparando-se com outros processos, o fresamento pode apresentar desvantagens em determinadas condições. O aplainamento possui um custo inferior de máquina e ferramental, o brochamento

externo é mais econômico para grandes lotes e a retificação, apesar da menor taxa de remoção de material, gera melhores características geométricas e superficiais [4].

Os métodos de fresamento podem ser divididos em dois grupos principais: periférico ou tangencial, e frontal [1-4, 24, 38]. Outros métodos de fresamento que existem podem ser considerados variações desses dois e dependem do tipo de peça e ferramenta utilizados [1, 24].

No fresamento periférico, ou tangencial, a superfície usinada é gerada por gumes ou insertos posicionados na periferia da fresa, e é geralmente um plano paralelo ao eixo da ferramenta. Operações para produção de relevos ou perfis estão incluídos nesse método. A seção transversal da superfície fresada corresponde ao contorno da fresa ou combinação de fresas utilizadas [1-4, 24, 38].

No fresamento frontal a superfície usinada resulta da ação combinada dos gumes localizados na periferia e na face frontal da fresa, esta geralmente em ângulo reto ao eixo da ferramenta. Normalmente a superfície fresada é plana, sem qualquer relação com o contorno dos gumes [1-4, 24, 38].

De acordo com a direção de corte e de avanço, distinguem-se ainda o fresamento concordante e o fresamento discordante. No fresamento concordante os movimentos de corte e de avanço têm, em média, o mesmo sentido, iniciando-se o corte com a espessura máxima de cavaco. No fresamento discordante os movimentos de corte e avanço têm, em média, sentidos opostos, iniciando-se o corte com a espessura mínima de cavaco. No caso do eixo da fresa interceptar a peça, tem-se o fresamento concordante e discordante combinados. Isto ocorre geralmente nos processos de fresamento frontal e de topo (**figura 2.1**) [1-3, 5, 38, 39].

No fresamento discordante a espessura inicial de corte é teoricamente zero. Assim, inicialmente uma camada de material é deformada elástica e plasticamente pela compressão da ferramenta. Somente quando é atingida uma espessura mínima de corte é que se inicia a remoção de material [1-3, 5, 39]. O resultado disso é o desgaste abrasivo sofrido pelo flanco principal da fresa que atrita sobre uma superfície de material que pode estar endurecido pelo gume anterior, reduzindo assim a vida da ferramenta. Além disso, cavacos ficam ocasionalmente aderidos ao gume da fresa, podendo provocar sua quebra quando entrar novamente no corte [1-3].

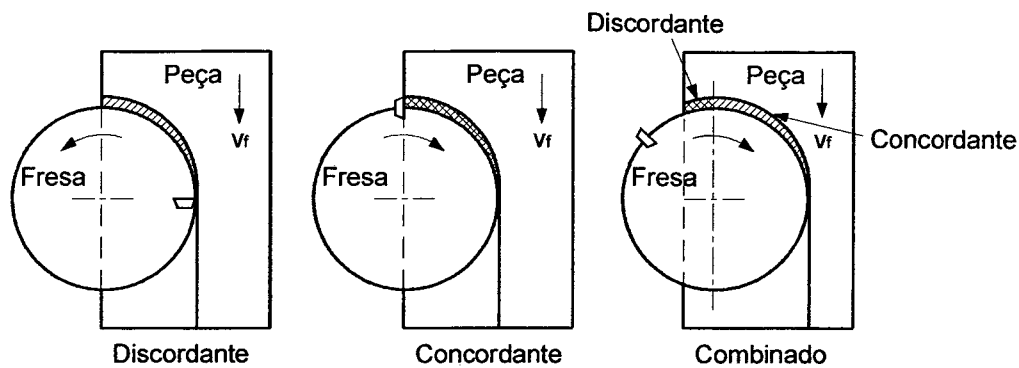


Figura 2.1 - Fresamento discordante, concordante e combinado [1, 2, 5]

As vantagens do fresamento concordante são as seguintes [1, 2]:

- A força de corte empurra a peça contra a mesa da máquina e contra a fixação, minimizando a possibilidade de vibrações;
- Menor desgaste e por conseqüência maior vida da ferramenta;
- Melhor qualidade superficial obtida;
- Menor força e potência de avanço;
- Menor caminho percorrido pelo gume na peça.

Embora não seja algo óbvio, a redução de caminho percorrido é, em média, da ordem de 3%, com redução correspondente de desgaste. Essa diferença de percurso é função do diâmetro da fresa, do avanço por rotação e da profundidade de corte radial, sendo igual a: $2a_e(f/\pi d)[(d/a_e)-1]^{1/2}$. Através de uma análise cuidadosa da **figura 2.1** percebe-se que no fresamento discordante, em função do movimento em direções opostas, o gume permanece um tempo maior em contato com a peça [1, 2, 38, 40].

Apesar das várias vantagens do fresamento concordante existem casos em que não se pode utilizá-lo, como por exemplo [1, 2]:

- Quando existem folgas no fuso da mesa da máquina-ferramenta;
- Quando a superfície da peça tiver resíduo de areia de fundição, for proveniente de processo de forjamento ou for muito irregular.

2.2. Fresamento de Topo

Muitos métodos de fresamento podem ser classificados de acordo com o conceito de fresamento periférico ou frontal. Entretanto, alguns são relacionados com o tipo de peça usinada ou a característica da ferramenta empregada. Entre estes métodos está incluído o fresamento de topo. As fresas de topo possuem gumes tanto na sua periferia quanto na sua face. Este tipo de fresa é a mais comum e amplamente utilizada, sendo bastante versátil e possuindo, entre todos os tipos de fresa, o maior número de tipos padronizados, formas e tamanhos. Podem ser produzidas com topo simples ou duplo, haste e corpo cilíndricos ou cônicos, em diversos diâmetros e comprimentos, possuir dois, três, quatro, seis ou mais canais, sendo que na maioria estes são helicoidais e, em alguns casos, retos. O topo pode ser reto ou esférico [1]. Construtivamente as fresas de topo podem ser inteiriças, com insertos ou gumes soldados ou ainda com insertos intercambiáveis. Os insertos soldados são de aço-rápido ou, na maioria das vezes, metal-duro, e os intercambiáveis são geralmente de metal-duro. As fresas inteiriças são feitas normalmente de aço-rápido ou metal-duro (figura 2.2) [1, 6].

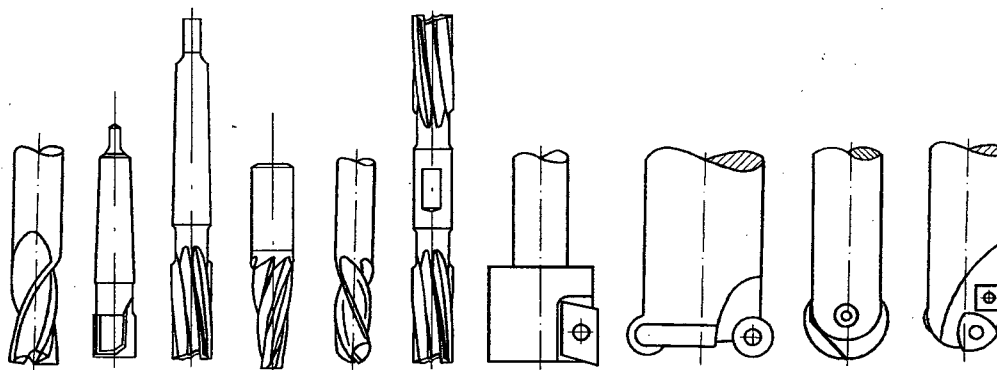


Figura 2.2 - Tipos gerais de fresas de topo [6, 15]

Nas operações de fresamento periférico o diâmetro da fresa determina a máxima profundidade de corte radial, e nas operações de fresamento frontal o comprimento axial dos gumes determina a máxima profundidade da corte axial [1]. Essas fresas são utilizadas para facear, ranhurar, executar cavidades, rebaixos, matrizes, gravações, rasgos de todos os tipos e tamanhos e fresar contornos [1, 2, 5, 6].

As combinações de corte com fresas de topo são numerosas. A experiência tem mostrado que quando a face da fresa atua no processo de usinagem o sentido de rotação e o sentido da hélice devem ser os mesmos. A combinação das componentes radial, axial e tangencial de força sobre a fresa podem produzir deflexões que levam a ferramenta tanto para fora quanto para dentro da peça, conforme a intensidade dessas componentes. Contudo, para o mesmo sentido da rotação e da hélice, a força axial tende a puxar a fresa do fuso da máquina. Também nesse caso danos podem ocorrer quando a usinagem for executada com a face e um grande comprimento da periferia da fresa simultaneamente. Isto ocorre porque o sentido da hélice força a ferramenta contra a peça, podendo danificar seriamente a peça, a fresa ou a máquina. Neste caso deve-se providenciar uma fixação de ferramenta bastante segura para que possíveis danos sejam evitados. Para operações onde a face da fresa não atua deve-se utilizar um sentido contrário entre a rotação e a hélice. A força axial contrária ao fuso irá promover uma garantia adicional de fixação da ferramenta em sua posição [1, 2].

2.3. Excentricidade e Deflexão da Fresa

Um problema comum em fresas de topo é a baixa precisão de giro e a possibilidade de vibração devido à deflexão [1]. O ideal seria que o centro de rotação coincidissem com o centro geométrico da ferramenta, produzindo-se desta forma cavacos com a mesma espessura para todos os dentes. Define-se então excentricidade (ρ) como sendo a distância entre o centro de rotação e o centro geométrico da fresa, junto com o menor ângulo positivo (λ) formado pela linha que liga os centros e uma linha do centro geométrico a um dente tomado como referência (**figura 2.3**) [7-10].

Em condições normais de usinagem a ocorrência da excentricidade é praticamente inevitável, e atribui-se isso principalmente a erros na montagem da ferramenta [7-10]. Segundo o trabalho realizado por ARMAREGO e DESHPANDE [7], a excentricidade causada por erros na fabricação da fresa é de aproximadamente $2 \mu\text{m}$, pois seu processo de retificação é executado normalmente entre centros. Em contrapartida, a excentricidade verificada com a ferramenta montada na fresadora é consideravelmente maior (18 a $20 \mu\text{m}$) [7]. Além disso, a excentricidade tende a variar cada vez que a fresa é montada no seu sistema de fixação [8].

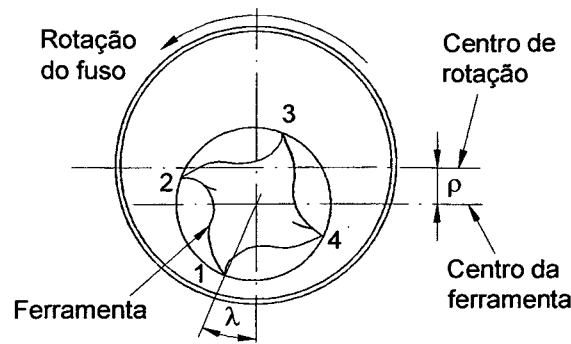


Figura 2.3 - Excentricidade na fresa de topo [9]

Uma fresa de topo excêntrica pode ser representada por uma ferramenta com raio variável girando em torno do eixo de rotação e, desta forma, tem-se que a espessura do cavaco não é igual para todos os dentes. Numa condição crítica pode ocorrer que um dente não remova material nenhum. Sendo assim, a excentricidade é um importante fator que contribui para a alteração no perfil esperado de força de fresamento [7-10]. A excentricidade altera as forças médias e os picos máximos e mínimos do perfil instantâneo de forças de diversas maneiras, dependendo das condições de corte, da geometria do corte e da natureza e intensidade da excentricidade. Isto pode levar a problemas de quebra e desgaste excessivo da ferramenta, erros geométricos na peça e alterações no comportamento dinâmico do processo de corte e da máquina-ferramenta. Existe a tendência do conteúdo de freqüências das forças deslocar-se da freqüência de entrada de dentes para a de rotação da fresa [9].

Em virtude da fresa de topo estar fixa por uma única extremidade e devido à sua característica de falta de rigidez surgem deflexões pela ação das forças de usinagem (**figura 2.4**) [8, 11]. Também são defletidas, mas em proporções consideravelmente menores, a fixação da fresa, da peça e a máquina-ferramenta [41]. As deformações da peça a ser usinada devem ser consideradas críticas quando se tratar de paredes finas com baixa rigidez [42, 43]. O aumento da rigidez e a redução da deflexão da fresa podem ser obtidos pelo aumento do diâmetro e pela redução do comprimento livre da fresa. A deflexão é diretamente proporcional ao cubo do comprimento livre e inversamente proporcional à quarta potência do diâmetro, sendo também afetada pelo número de gumes que atuam simultaneamente na peça. Fresas com tamanho de canal reduzido podem ser utilizadas para diminuição da deflexão, mas desta forma o espaço

para armazenamento de cavacos ficará também reduzido. Algumas fresas para trabalho pesado possuem ainda núcleo cônico [1].

A inclinação da ferramenta produzida por sua deflexão causa diferentes espessuras de cavaco no sentido axial, prejudicando o acabamento da peça, restringindo a produtividade e gerando esforços não-uniformes sobre os gumes. Algumas destas características são comuns à excentricidade, entretanto, no caso da deflexão, existe a diferença de espessura de cavaco no sentido axial, sendo que este problema se torna mais crítico quanto maior for a profundidade de corte axial [25].

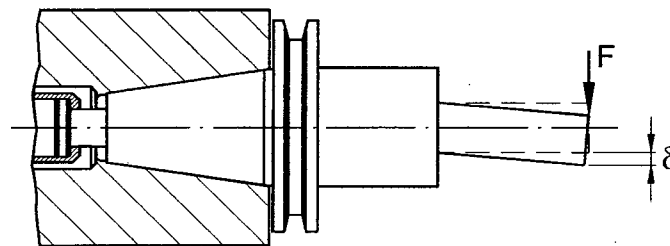


Figura 2.4 - Deflexão da fresa de topo causada pela força de usinagem [16]

Apesar de indesejável por diversos aspectos, a flexibilidade da ferramenta tem como vantagem a redução de sobrecargas em situações transientes e sob vibração auto-excitada [42]. Deve-se notar também que a deflexão da ferramenta tem a propriedade de atenuar os efeitos da excentricidade [8, 41, 43, 44]. Quando, devido à excentricidade, a espessura de cavaco a ser removida por um gume é maior do que a teórica, as forças na usinagem também serão maiores, conduzindo a uma maior deflexão. No entanto, caso a espessura de cavaco seja menor do que a teórica, o inverso ocorre [43]. Desta forma tem-se que os picos máximos de força são atenuados e os mínimos elevados [8, 41, 43, 44].

2.4. Vibrações no Fresamento

As vibrações que surgem durante um processo de usinagem podem ser divididas em dois tipos para melhor compreensão do fenômeno: vibração externamente excitada e vibração auto-excitada [45, 46]. As vibrações externamente excitadas ocorrem devido a forças transmitidas através da fundação da máquina, danos ou imperfeições em elementos de máquinas gerando desbalanceamento, falhas em

mancais e choques em engrenagens [12, 45, 47]. Também pertencem a essa categoria as variações de força devido à mudança de direção e ao corte interrompido no fresamento, com frequência igual à de passagem dos dentes. Também os choques causados pelos impactos dos dentes da fresa contra a peça são causadores de vibrações externamente excitadas [45-47].

A característica principal da vibração externamente excitada, também conhecida como vibração forçada, é que o sistema irá oscilar na frequência de excitação. Neste caso, as amplitudes serão particularmente elevadas se esta frequência for próxima, ou até mesmo idêntica, a uma das frequências naturais do sistema [45-47]. Estas considerações são obviamente válidas para excitações periódicas. Para impulsos e excitações transientes o sistema tenderá a oscilar em uma ou mais das suas frequências naturais e a amplitude de vibração irá decair exponencialmente [45, 47].

As vibrações auto-excitadas, ou vibrações regenerativas, têm como característica a oscilação do sistema em uma ou mais frequências naturais, sem a interferência de forças externas. Existem diversas fontes desse tipo de vibração, sendo a maioria de pouca relevância [12, 45]. A fonte principal de vibração regenerativa ocorre no processo de corte devido a um mecanismo de auto-excitação durante a formação do cavaco. No fresamento, forças com espectro de excitação de banda larga excitam de forma relevante uma, e em alguns casos até mais, das frequências naturais do sistema. Devido obviamente à vibração natural desse sistema, produz-se na peça uma superfície ondulada que deverá ser removida pelo gume subsequente. Passe após passe a vibração pode ser atenuada ou ampliada, dependendo da fase entre a vibração natural da fresa e a ondulação produzida na peça. No limite de estabilidade a magnitude de vibração permanece constante, no caso de instabilidade a vibração é amplificada e no caso estável a vibração é atenuada (**figura 2.5**) [45, 46, 48-50].

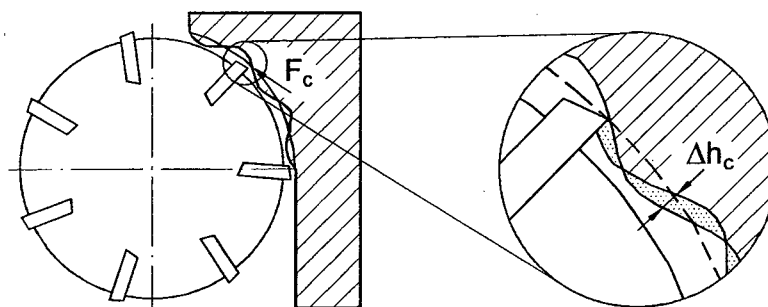


Figura 2.5 - Modelo dinâmico da superfície produzida por fresamento [50]

Esse fenômeno ocorre principalmente quando o processo apresenta altas taxas de remoção. As principais conseqüências são a piora na qualidade superficial e dimensional da peça, o desgaste excessivo ou a quebra da ferramenta e a limitação da produtividade do processo [12-14]. A ocorrência ou não de vibração auto-excitada depende das seguintes variáveis [48]:

- Estrutura da máquina e peça (rigidez, amortecimento e massa);
- Orientação dos modos de vibração do sistema;
- Condições de corte: material da peça, avanço, velocidade de corte, profundidade de corte radial e axial, número de dentes da fresa.

Modelos ou ensaios para avaliação da vibração na usinagem podem ser executados e, com os resultados, preparados diagramas que indicam regiões de estabilidade e instabilidade em função da rotação da ferramenta (n) e da profundidade de corte axial (a_p), sendo que muitos autores concentraram esforços neste tipo de trabalho [13, 14, 24, 45, 46, 48-57]. Um exemplo desse tipo de diagrama para uma condição de usinagem específica está apresentado na **figura 2.6**. A curva deste diagrama indica a profundidade de corte crítica em função da rotação multiplicada pelo número de dentes da fresa, dividindo-se desta forma as regiões de estabilidade e instabilidade. Profundidades de corte acima da curva resultarão em instabilidade do processo, abaixo da curva o processo é estável. A variável m é um número inteiro positivo relacionado à quantidade de ondulações produzidas por um gume em cada passagem. Operações normais de fresamento apresentam $m \leq 5$, o que pode tornar o uso deste tipo de diagrama bastante útil [45, 50]. Com este método pode-se selecionar condições de usinagem de elevada taxa de remoção, evitando-se ao mesmo tempo vibrações indesejadas [46]. No trabalho desenvolvido por WECK, ALTINTAS e BEER [14] esses conceitos são implementados em sistemas CAD/CAM para a geração de trajetórias que não estejam dentro de regiões de vibração auto-excitada durante a usinagem de cavidades [14]. Outras formas que contribuem para reduzir ou suprimir a vibração auto-excitada são a variação da rotação do fuso durante a usinagem ou a utilização de fresas com passo entre os dentes variável. Estas técnicas causam distúrbios na geração da ondulação superficial, contribuindo assim para a estabilidade do processo [58-61].

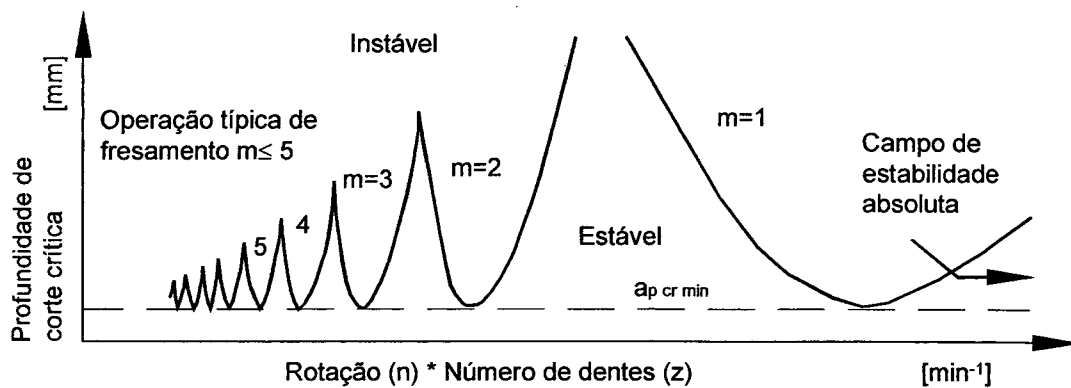


Figura 2.6 - Diagrama de estabilidade de um processo de usinagem [45, 50]

Convém observar que esse diagrama apenas apresenta os limites de estabilidade, não levando em consideração a amplitude de vibração [46]. A **figura 2.7** exemplifica tendências qualitativas da amplitude de vibração para o fresamento frontal em função da profundidade de corte. Deve-se considerar que as forças dinâmicas são proporcionais ao comprimento do gume. Sendo assim, as amplitudes da vibração externamente excitada, causada pelos impactos dos gumes contra a peça, são diretamente proporcionais à largura do cavaco. Nas vibrações auto-excitadas observa-se uma tendência de crescimento da amplitude similar ao anterior para valores pequenos de a_p . Ao ser atingido o limite de estabilidade ($a_{p\ cr}$) o processo torna-se instável e a amplitude de vibração eleva-se abruptamente [45].

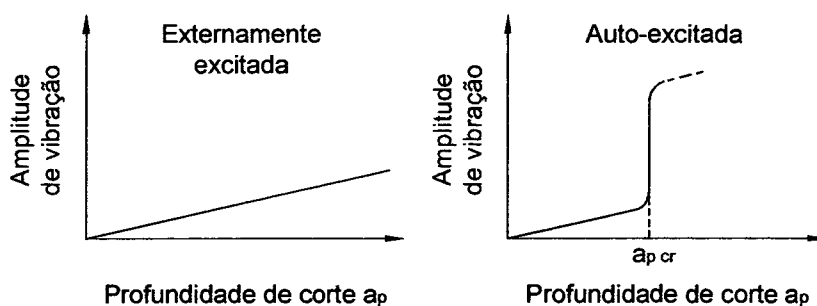


Figura 2.7 - Variação da amplitude de vibração em função da profundidade de corte para vibrações externamente excitadas e auto-excitadas [45]

2.5. Forças no Fresamento

Para deformar um material durante a usinagem e lograr a remoção de cavacos, a ferramenta empregada deve atuar com uma determinada força sobre a peça usinada [26]. Na análise do processo de usinagem em termos quantitativos, a caracterização das forças envolvidas no corte é de fundamental importância para a pesquisa e o desenvolvimento de modelos, para a otimização, o monitoramento e o controle do processo. Em virtude de sua relativa facilidade de medição e sua relevância física, as forças são, freqüentemente, elementos-chave para o entendimento da cinemática e da dinâmica de máquinas-ferramentas e processos de usinagem [25]. O conhecimento da grandeza e direção da força de usinagem, respectivamente suas componentes F_c , F_r e F_{ax} ou F_x , F_y e F_z (**figura 2.8**), é de importância no projeto dos elementos de máquinas-ferramentas, como acionamentos, guias, mancais, sistemas de fixação das ferramentas e dispositivos de fixação das peças, na determinação dos parâmetros de corte para o planejamento dos trabalhos de usinagem, no conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante o processo de corte, no esclarecimento dos mecanismos de desgaste e na estimativa da precisão atingível durante a usinagem sob determinadas condições de corte [1, 4, 5, 24, 26, 27].

Muitos autores têm dedicado um grande esforço no trabalho de criação de modelos e simulação das forças no fresamento de topo reto ou esférico. Os modelos são desenvolvidos considerando-se parâmetros específicos como a geometria da fresa e do corte, o material da peça, os parâmetros de corte, a excentricidade e as deflexões estáticas e dinâmicas da ferramenta, peça e máquina, as vibrações externa e auto-excitadas, entres outros. Ressalta-se que cada um destes autores considera somente algumas daquelas variáveis em seus trabalhos e não todas ao mesmo tempo [7-10, 41, 43, 44, 61, 63-78].

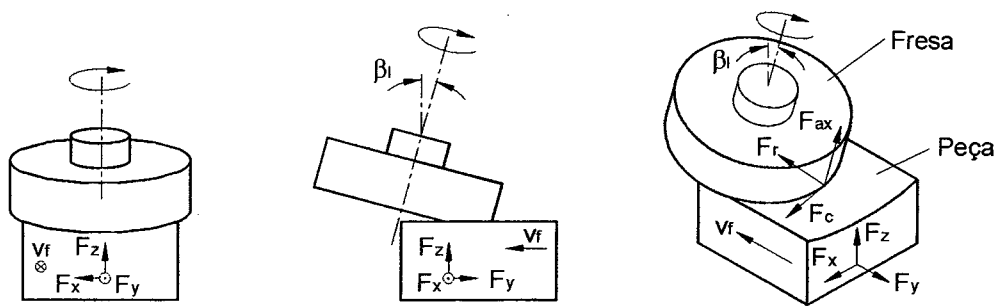


Figura 2.8 - Componentes da força de usinagem segundo os sistemas de coordenadas na ferramenta e na peça [17]

As forças nos processos de usinagem em geral são influenciadas por diversos fatores, sendo que os principais são apresentados na **figura 2.9** [1, 4, 5, 24, 26, 62]. A grandeza e direção da força de usinagem são basicamente influenciadas por fatores quase-estáticos e, além disto, o processo de usinagem é marcado por componentes de força irregulares e de alta dinâmica, causadas por problemas de precisão na movimentação do fuso, características do material da peça e as vibrações relativas entre peça e ferramenta causadas por estes fatores [26].

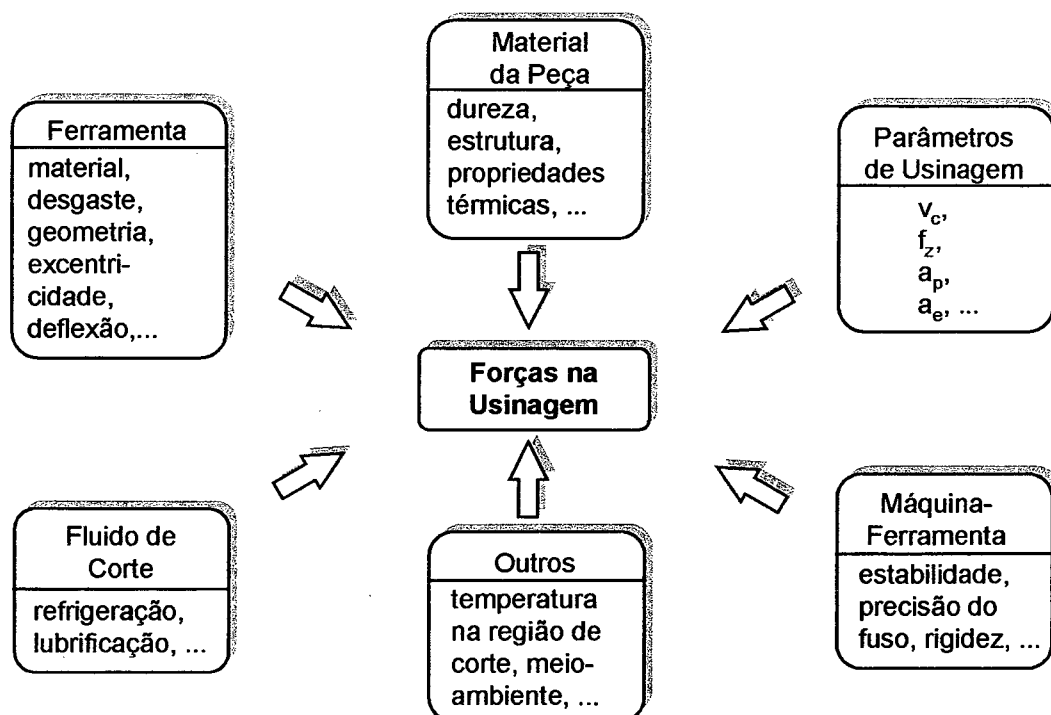


Figura 2.9 - Fatores de influência sobre a força de usinagem [1, 4, 5, 24, 26, 62]

Durante o fresamento cada dente ou inserto da fresa está sujeito a uma carga de impacto quando entra na região de corte. A magnitude desta carga depende do material da peça, da posição da ferramenta, dos parâmetros de usinagem e da geometria da ferramenta. As forças no fresamento são cíclicas e fortemente proporcionais à espessura de corte em cada posição [1-3, 5, 38]. A **figura 2.10** mostra a influência do número de dentes da fresa no perfil instantâneo de força na direção y [45]. No fresamento concordante a componente da força na direção do avanço tende a puxar a peça contra a ferramenta, resultando em baixa potência necessária para o avanço. No fresamento discordante a componente na direção do avanço tem sentido contrário a este [1].

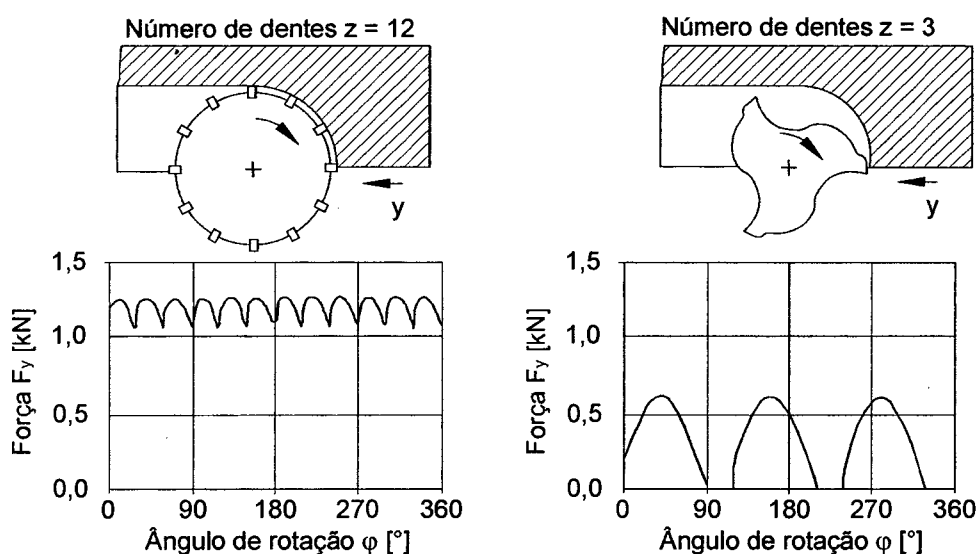


Figura 2.10 - Influência do número de dentes da fresa na F_y [45]

Anteriormente já foi discutida a influência da excentricidade da ferramenta, que altera o perfil esperado e as forças médias [7-10], além da deflexão, que é causada pela força de usinagem e atenua o efeito da excentricidade [8, 41, 43, 44]. A deflexão da ferramenta gera erros dimensionais e superficiais na peça acabada. Experimentos realizados no fresamento concordante concluíram que a fresa deflete sempre para fora da peça, resultando numa dimensão maior que a desejada. Para o fresamento discordante observa-se o contrário [42].

Segundo SMITH e TLUSTY [63], “não há uma relação simples e direta entre força e precisão da superfície usinada”. Deve-se considerar a variação da força e da

deflexão com respeito ao instante de geração de superfície. Tome-se como exemplo a fresa de topo de dentes retos da **figura 2.11**. A deflexão da fresa será proporcional à força de corte instantânea e a superfície usinada será formada pela soma das pequenas regiões usinadas quando um dente encontra-se na posição A. Somente as deflexões da ferramenta neste instante serão impressas na superfície, pois para qualquer outro momento a deflexão ficará registrada na porção de material que será removida pelo dente seguinte, não afetando a superfície final. Na primeira parte da **figura 2.11** a profundidade de corte radial (a_e) é tal que somente o dente 1 está em contato com a peça no ponto A. Como a espessura da cavaco é zero não há força de corte e deflexão e, conseqüentemente, erro dimensional. Com o aumento progressivo de a_e a situação no instante de formação da superfície não muda até que um segundo dente entre no corte. Nesta condição, mostrada na parte central da figura, tem-se a deflexão causada pela força registrada no ponto A. O erro dimensional não muda até que o valor de a_e seja tal que um terceiro dente participe do processo. Desta forma o erro aumenta na forma de degraus discretos de acordo com o número de dentes que participam da usinagem [63].

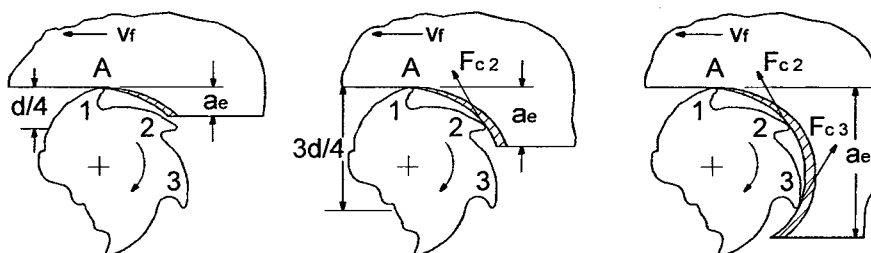


Figura 2.11 - Fresamento de topo em diferentes profundidades de corte radial [63]

O desenvolvimento de sistemas de manufatura integrados e auto-ajustáveis que são capazes de usinar diversas peças sem a supervisão ou assistência de operadores é um dos principais objetivos atuais na pesquisa de processos de usinagem. Para isso, faz-se necessário que existam sistemas de monitoramento da operação capazes de garantir segurança e eficiência na remoção de material, tomando as medidas necessárias para correção das ações na ocorrência de distúrbios ou falhas. As tarefas normais dos sistemas de monitoramento durante o processo são: detectar o desgaste e a quebra da ferramenta, detectar e evitar a vibração auto-excitada, controlar os esforços de usinagem para obtenção da máxima remoção e controlar a precisão

geométrica do componente. Destas atividades, uma das mais importantes é detecção da quebra da ferramenta que, a menos que seja imediatamente reconhecida e corrigida, poderá ocasionar danos irreparáveis à peça e até mesmo à máquina-ferramenta. As pesquisas de monitoramento de quebra fazem uso principalmente de medições de emissão acústica, corrente elétrica do fuso ou motor de avanço, vibração e forças na usinagem. Este último recurso é um dos mais utilizados, pois pode ser relacionado com a mecânica do processo. Sendo assim, a proposta do sistema de monitoramento é detectar variações bruscas no sinal de força que tanto podem ser causadas por quebra quanto por condições de corte transientes, tais como entrada e saída da peça, sendo que a diferenciação destas duas causas é um dos problemas a ser solucionado na concepção do sistema em questão [28-34].

O desenvolvimento de métodos de usinagem completamente automatizados é inviável sem que sejam também criados métodos práticos e robustos para detectar o desgaste da fresa. Este recurso permite que se melhore a qualidade da peça usinada, assegurando que as especificações superficiais e geométricas estejam dentro das tolerâncias, além de possibilitar o aumento da velocidade de corte, com conseqüente redução do tempo de usinagem, e a redução nos tempos de troca de ferramenta. Aqui também o monitoramento das forças na usinagem fornece bons subsídios para tal controle [28, 35-37].

O fresamento de topo é amplamente utilizado na usinagem de superfícies complexas tais como moldes e peças de aplicação aeroespacial. Dependendo da geometria a ser usinada os esforços aplicados na ferramenta poderão ter características irregulares durante seu percurso, e deverão ser limitados a valores que evitem danos na ferramenta e na precisão da peça. Muitos autores têm proposto a utilização de sistemas de controle durante a usinagem que limitam principalmente as forças aplicadas na fresa. O objetivo destes sistemas é controlar e otimizar condições variáveis ou imprevistas durante o processo através de mudanças em parâmetros de corte, principalmente avanço e velocidade de corte. Através de mudanças a cada instante nestes dois parâmetros pode-se continuamente atingir objetivos previamente determinados, obtendo-se uma melhor utilização da máquina-ferramenta e, conseqüentemente, aumento de produtividade [79-85].

Um problema desse tipo de controle é que a correção do avanço ou rotação é feita através de medições de força efetuadas num instante anterior, permitindo

sobrecargas quando o aumento da seção do cavaco é súbito. Se o limite de força estabelecido for próximo ao limite de resistência da fresa tem-se a sua ruptura. Como o processo de produção de componentes utilizando-se esses sistemas de controle é normalmente auxiliado por trajetórias para máquinas NC geradas em sistemas CAD/CAM, ALTINTAS e SPENCE [86, 87] propuseram um método no qual as forças de usinagem são previamente simuladas no CAD/CAM. Examinando-se as interações entre a peça e a ferramenta, a largura e espessura de corte podem ser calculadas em qualquer trecho da trajetória. Nas regiões passíveis de sobrecarga a geometria pode ser suavizada e informada ao sistema de controle do processo antes de sua ocorrência, permitindo-se a correção dos parâmetros de forma segura [86, 87].

Esses sistemas de controle em processo enfrentam algumas dificuldades para sua plena aceitação na indústria, quais sejam [80]:

- Entendimento limitado do processo de corte;
- Variações nas características do processo de usinagem e estratégias de controle inadequadas para enfrentar tais variações;
- Falta de sensores confiáveis e adequados para utilização em ambiente de produção;
- Limitado conhecimento em variações de usinabilidade, desgaste de ferramenta e propriedades do material da peça;
- Altos custos extras de manutenção da máquina-ferramenta, pois esta irá operar mais freqüentemente carregada e sujeita a altos esforços em geral.

A medição das forças na usinagem pode ser feita de forma direta ou indireta. A medição indireta é realizada através do deslocamento de molas, sendo os meios de medida mecânicos, elétricos, pneumáticos e hidráulicos. Na medição direta utiliza-se princípios piezelétricos e da magneto-elasticidade [1, 24]. Em sistemas que utilizam sensores piezelétricos para a medição de forças é aproveitada a propriedade que certos materiais, como quartzo, turmalina, algumas cerâmicas e outros materiais apresentam de, sob a ação de uma força, tornarem-se eletricamente carregados. A carga elétrica é proporcional a esta força e de sinais opostos nas superfícies do elemento, sendo sua soma algébrica nula. Essa carga pode ser medida, amplificada e

transformada num sinal analógico de tensão proporcional à força que foi aplicada sobre o sensor [1, 24, 26, 88].

Uma desvantagem dos sistemas piezelétricos é que, por se tratar de um sistema de medição ativo, não permite medições estáticas reais tais como é possível com extensômetros. No entanto, esse tipo de sistema não é apenas adequado a medições puramente dinâmicas, sendo que isto é verdadeiro para dinamômetros com elementos piezelétricos de cerâmica. A utilização de elementos de quartzo combinados com modernos amplificadores de carga oferece uma excelente capacidade de medição quase-estática. Tem sido prática comum por mais de trinta anos a calibração estática de transdutores de quartzo, e são incontáveis as suas aplicações para medir fenômenos quase-estáticos, que duram de minutos a, até mesmo, horas [88].

O emprego de elementos piezelétricos tem-se revelado, até o momento, como o mais adequado à maioria das aplicações na usinagem. As principais vantagens de dinamômetros que utilizam transdutores de quartzo são [26, 88]:

- Faixa de medição extremamente ampla (a relação entre a faixa de medição e a mínima carga pode ser maior que 10^6);
- Extremamente linear, alta estabilidade e baixa histerese;
- Baixa interferência inerente entre os canais (tipicamente abaixo de 1%);
- Alta rigidez (deflexões de medição de poucos micrometros);
- Alta frequência natural (tipicamente em torno de 1 kHz ou maior);
- Fácil operação (sem balanceamento de circuitos de ponte);
- Sem fadiga nem mudança do zero sob carregamento dinâmico;
- Ampla faixa de temperatura de trabalho.

O sistema de medição deve ser capaz de seguir as variações de força impostas a ele. Caso isso não seja mais possível o sistema não estará medindo somente o processo mas também a sua própria dinâmica. Os fabricantes especificam a frequência natural de um dinamômetro em condições especiais de laboratório, sendo que estas consideram que o dinamômetro está montado numa base de rigidez infinita e livre de vibrações [27, 89]. No trabalho realizado por DAMARITÜRK [89] constatou-se que um dinamômetro piezelétrico, cujo fabricante especifica uma frequência natural de 4 kHz, apresenta valores de frequência natural de 1,5 kHz para a montagem na mesa da

máquina-ferramenta [89]. Para se assegurar a completa transmissibilidade das forças de usinagem, a freqüência natural do dinamômetro, recomendada no trabalho editado por DROZDA e WICK [1], deve ser pelo menos 5 ou 6 vezes maior que a freqüência de excitação à qual a ferramenta estará sujeita [1]. Altas freqüências naturais são obtidas através de elevada rigidez e massa reduzida [1, 27, 89]. A **figura 2.12** apresenta a relação entre a força aplicada na direção z num dinamômetro piezelétrico e a sua resposta. A freqüência de ressonância deste equipamento está na faixa de 1,2 kHz, mas percebe-se que a partir de 0,5 kHz tem-se resultados comprometidos [17].

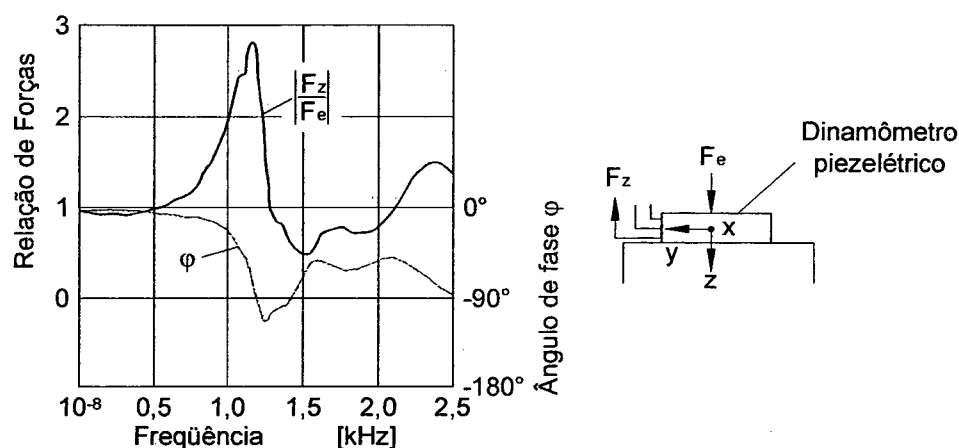


Figura 2.12 - Resposta do dinamômetro piezelétrico à força aplicada [17]

Nos processos de usinagem a formação de cavaco é um fenômeno periódico, inclusive para cavacos contínuos, com fases alternadas de recalque e escorregamento. Segundo KETTELER [90], a freqüência de formação de lamelas pode variar de 0,4 a 100 kHz. Tem-se desta forma o sistema excitado por freqüências que são, normalmente, muitas vezes maior que a freqüência de entrada de dentes no fresamento [24, 27, 90].

Devido às altas dinâmicas envolvidas neste processo, os limites de medição dos sistemas piezelétricos atuais são facilmente atingidos quando se deseja a detecção das vibrações nos fenômenos de formação de cavaco, através da medição temporal da força de usinagem. Esses sistemas possuem freqüência natural suficientemente alta para o estudo da variação das forças, relacionadas à entrada dos dentes e mudança da espessura de usinagem, no fresamento com velocidades de corte convencionais. Entretanto, a freqüência de entrada de dentes no fresamento com altas velocidades de

corte, utilizando-se fresas de pequeno diâmetro, pode facilmente alcançar o limite dinâmico do dinamômetro, prejudicando também este tipo de análise. Em resumo, a análise dinâmica do processo de formação de cavaco para velocidades de corte convencionais, ou o estudo do processo de fresamento com altas velocidades, através do espectro de forças, é fortemente limitado pelos sistemas de medição piezelétricos atuais [27, 89].

Os pesquisadores da área de fabricação têm utilizado algumas soluções para resolver este problema. A mais simples delas é a análise somente das forças médias, ou a filtragem e aquisição somente dos sinais de baixa freqüência. Este procedimento é útil para diversas aplicações tais como o estudo do processo de fresamento, o controle em processo da solicitação sobre a ferramenta, a detecção em processo de desgaste e quebra. No entanto, ele não permite análises amplas do espectro de força, somente da componente estática ou das componentes de baixa freqüência [27, 33, 36, 91, 92].

Por ser um sistema linear, mesmo que o dinamômetro piezelétrico esteja sendo excitado na sua freqüência natural ou acima dela, as freqüências nas faixas recomendadas de medição poderão ainda ser analisadas. Do ponto de vista físico a condição necessária para um sistema ser linear é a aplicabilidade do princípio da superposição, isto é, a presença de uma excitação não afeta a resposta devido a outras, não havendo assim interações entre as respostas de diferentes excitações. A análise do efeito combinado de diversas excitações num sistema linear pode ser feita com o estudo individual do efeito de cada excitação, como se as demais não existissem, e então executada a soma, ou sobreposição, dos resultados [47, 93-95].

Existe outro aspecto físico que caracteriza um sistema linear. Se a excitação aplicada a tal sistema é uma função alternante no tempo com freqüência f , então a resposta em regime permanente, após o transiente inicial ter cessado, será também alternante com freqüência f . São não-linearidades comumente encontradas nos sistemas físicos: as saturações dos amplificadores, os atritos secos ou de Coulomb, as folgas das engrenagens, a zona morta ou de insensibilidade dos amplificadores, os ampliadores a tudo ou nada, grandes compressões ou extensões de molas a ponto das espiras perderem sua identidade individual. Devido à não-linearidade o princípio da superposição não pode ser aplicado e, entre outros fenômenos, surgem freqüências acima ou abaixo da freqüência de excitação [47, 93-95].

Quando é necessária a análise de componentes do espectro de força com frequências maiores pode-se adotar outras soluções, que normalmente não são simples de serem implementadas. Uma delas é a construção de um novo dinamômetro com frequência natural superior aos normalmente encontrados no mercado. DAMARITÜRK [89] construiu um dinamômetro com maior rigidez e menor massa utilizando uma liga de titânio. A frequência natural deste novo dinamômetro, montando em condição de trabalho, está na faixa de 2,5 a 3 kHz, o que é claramente melhor do que um equivalente comercial [89].

Outra solução, proposta por HERGET [27], é a supressão matemática dos efeitos da dinâmica do sistema de medição no sinal de força medido. Pode-se medir as características dinâmicas do sistema completo de medição de força e, com estas informações, montar uma função de transferência, a qual tem como entrada o sinal de força medido e saída o sinal de força sem os efeitos indesejáveis da limitação dinâmica de medição. Essa solução apresenta como vantagem a possibilidade de análise em faixas de frequência superiores ao permitido pelo dinamômetro, fato que não é possível nas propostas apresentadas anteriormente. A **figura 2.13** mostra quatro sinais de força F_y para diferentes rotações da ferramenta e conseqüente frequência de entrada de dentes. Pode-se observar claramente o efeito da dinâmica do sistema de medição no resultado e também a possibilidade deste efeito ser suprimido matematicamente [27].

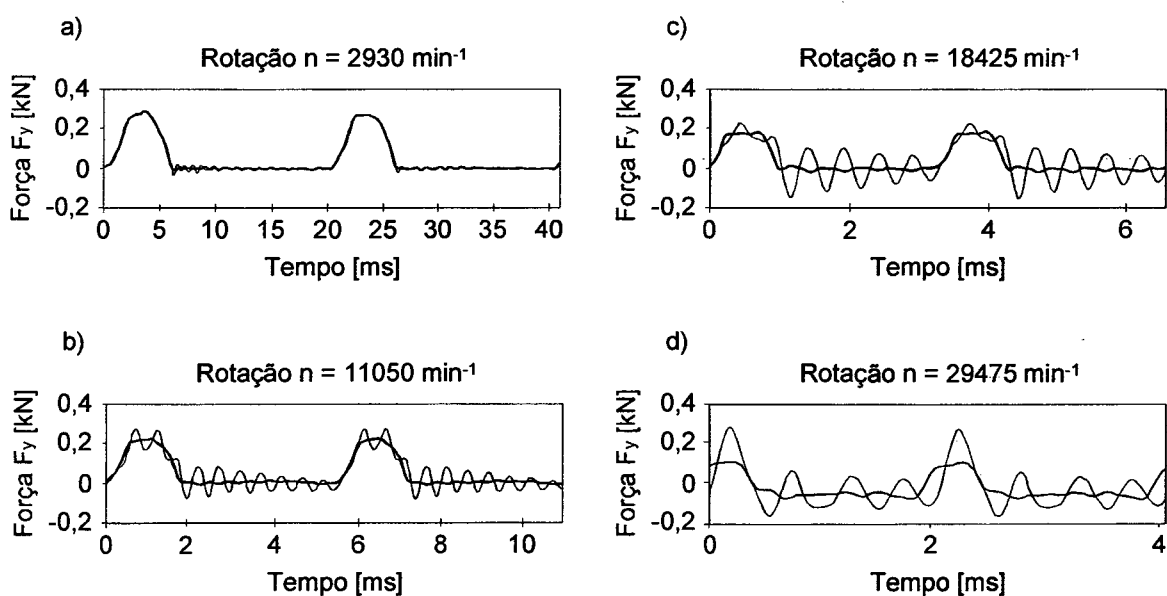


Figura 2.13 - Supressão matemática dos efeitos indesejáveis da dinâmica do sistema piezométrico de medição de força [27]

2.6. Fresamento com Altas Velocidades de Corte

A definição de usinagem com altas velocidades não é simples, pois os valores de velocidade de corte possíveis de serem utilizados dependem de fatores como o material da peça, a ferramenta utilizada e o tipo de operação de corte. Além disso, a definição de altas velocidades muda dependendo da tecnologia disponível. Em geral, a velocidade de corte é de 5 a 10 vezes maior, comparada com os valores atuais convencionalmente praticados [15, 18, 19, 96]. Uma faixa de velocidades de corte para diversos materiais de peça foi apresentada por SCHULZ [18, 19] e pode ser observada na **figura 2.14**.

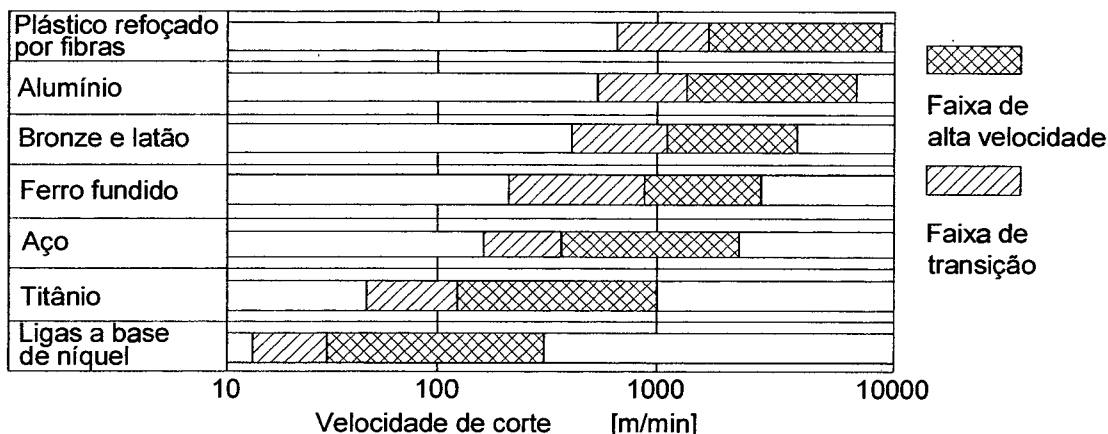


Figura 2.14 - Velocidade de corte em função do material da peça [18, 19]

Tem-se demonstrado que a utilização de altas velocidades de corte reduz as forças na usinagem, proporciona que o calor gerado no processo seja removido em grande parte pelo cavaco, produz superfícies com melhor acabamento e menos afetadas termicamente, permite a usinagem em regiões de estabilidade, livres de vibrações auto-excitadas e reduz a formação de rebarbas. Desta forma as aplicações que mais se beneficiam do fresamento com altas velocidades são [18, 19]:

- Usinagem de grandes volumes de material como ligas leves, plásticos, metais não-ferrosos e alumínio, para a indústria aeroespacial ou aço e ferro fundido para moldes e matrizes;

- Fabricação de componentes com paredes finas propensos a deformações térmicas ou por esforço mecânico;
- Usinagem de grafite para fabricação de eletrodos para eletroerosão;
- O acabamento mecânico de moldes e matrizes;
- Usinagem de materiais com baixa usinabilidade tais como ligas de titânio, de níquel, alguns aços de alta liga e aços endurecidos.

A principal limitação do processo de usinagem com altas velocidades de corte é o acentuado desgaste da ferramenta, principalmente para o corte de aços, ferros fundidos e ligas de baixa usinabilidade. O sucesso da usinagem nesta área tem ocorrido em virtude do desenvolvimento de novos materiais, revestimentos e geometrias para as ferramentas de corte. Materiais de fácil usinagem podem ter a velocidade de corte limitada não pelo desgaste mas pela máquina-ferramenta disponível para o trabalho [18, 19].

Uma importância especial é atribuída à usinagem com altas velocidades devido ao fato da crescente exigência de precisão dos componentes. Normalmente a usinagem com altas velocidades não é um método de produção de componentes de ultraprecisão, podendo no entanto entrar no campo da alta precisão com a fabricação de superfícies com $0,2 \mu\text{m}$ de rugosidade R_a e $3 \mu\text{m}$ de R_z [18].

A redução da força de usinagem com o aumento da velocidade de corte é atribuída ao amolecimento do material da peça devido ao aumento de temperatura durante o processo de formação de cavaco. Alguns trabalhos reportam que esta redução não ocorre indefinidamente [19, 97]. SUTTER et al. [97] descreve o decréscimo de força no corte ortogonal para velocidades de 600 a 2400 m/min e, a partir disto, a força de corte passa a aumentar principalmente devido a efeitos de inércia relacionados à mudança de momento das partículas passando da peça para o cavaco [97]. Convém ressaltar que o aumento de força descrito no trabalho de SUTTER et al. [97] não é evidente, podendo as diferenças estarem dentro das incertezas do processo, que não são apresentadas pelos autores, sendo que estes se apoiaram fortemente em trabalhos de outros pesquisadores.

O processo de fresamento com altas velocidades deve ser considerado uma tecnologia independente, e não somente a mesma tecnologia de usinagem utilizada de forma mais rápida. O requisito de alta velocidade gera uma cadeia de conseqüências

que tem como ponto inicial a necessidade de um fuso de alta rotação. Na seqüência desta cadeia tem-se o aumento das velocidades de avanço, a necessidade de novos acionamentos e controles de alta velocidade, eixos com alta dinâmica e alta aceleração, massas móveis reduzidas e comandos CNC com funções como leitura prévia de comandos (*look ahead*) e interpolação de geometrias. Sendo assim, a simples instalação de um fuso de elevada rotação, como muitos fabricantes fazem, não converte uma máquina convencional em máquina de alta velocidade. A tecnologia atual produz máquinas convencionais com rotação na faixa de 15000 rpm e velocidades de avanço entre 20 e 25 m/min, o que em muitos casos permite a usinagem com altas velocidades de aços, ferros fundidos e ligas especiais. A utilização de componentes e conceitos voltados para altas velocidades de usinagem tem permitido o desenvolvimento de máquinas com velocidade de avanço superiores a 100 m/min e aceleração de 30 m/s^2 [18-20, 96].

Um dos maiores potenciais do fresamento de alta velocidade é a fabricação de moldes e matrizes. Este tipo de peça geralmente é constituído de muitas superfícies complexas que podem ser usinadas, sem danificar o contorno, por fresamento em três eixos com fresa de topo esférico ou em cinco eixos com fresa de topo reto. Neste último caso o eixo da ferramenta é constantemente adaptado à curvatura da superfície com um ângulo de inclinação apropriado (**figura 2.15**) [15-17, 20, 21].

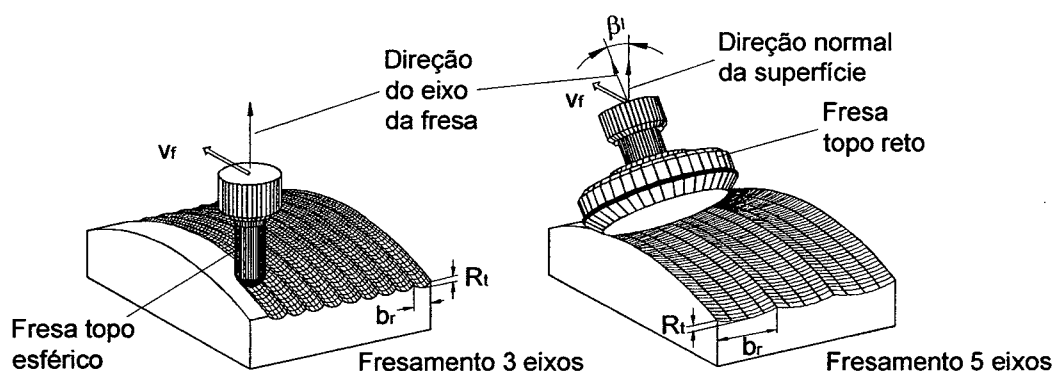


Figura 2.15 - Fresamento em três e cinco eixos [15-17, 21]

O resultado da usinagem tanto em três eixos como em cinco eixos é uma superfície ondulada que é aproximada da superfície final. Este perfil ondulado deve ser removido, normalmente por trabalho manual, a fim de se obter a rugosidade final e corrigir desvios dimensionais. Tal operação manual é bastante trabalhosa, de alto custo

e normalmente representa um gargalo no processo de produção de moldes e matrizes. A usinagem tem contribuição peremptória nos custos dos moldes, sendo relevante a participação de custo da ajustagem e polimento final [15, 16, 18, 20].

A quantidade de retrabalho é fortemente determinada por o quão próxima está a superfície ondulada da final. Utilizando-se uma fresa esférica de um determinado diâmetro, a profundidade máxima da rugosidade é substancialmente função das distâncias entre as linhas (b_r), como mostra a **figura 2.16** [15, 16, 18, 20].

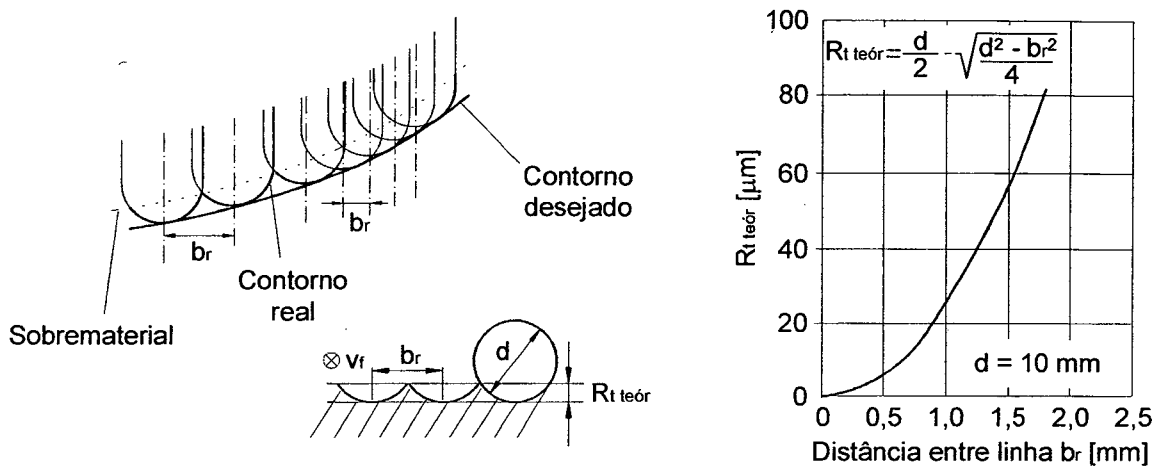


Figura 2.16 - Influência da distância entre as linhas na profundidade máxima de rugosidade [15, 16, 18, 20]

Neste contexto o fresamento com altas velocidade de corte tem uma função preponderante. Por trabalhar com velocidades de corte de 5 a 10 vezes maior, a velocidade de avanço pode ser aumentada pelo mesmo fator e o número de linhas reduzido também pelo mesmo fator. Para o trabalho final manual, isso significa um perfil melhor aproximado, redução de tempos e custos e aumento da qualidade deste acabamento. Quando não há a necessidade de redução da distância entre linhas, o aumento da velocidade de avanço permite uma grande redução no tempo de fresamento final. Normalmente busca-se uma solução de compromisso entre estas duas situações. A **figura 2.17** mostra um exemplo geral da redução de tempo de produção de um molde ou matriz. Desde o projeto até a montagem uma parcela importante de tempo é reduzida com o auxílio de sistemas CAD/CAM, sendo que estes são pré-requisitos indispensáveis para a aplicação de novas tecnologias de usinagem com altas velocidades [15, 16, 18, 20, 22].

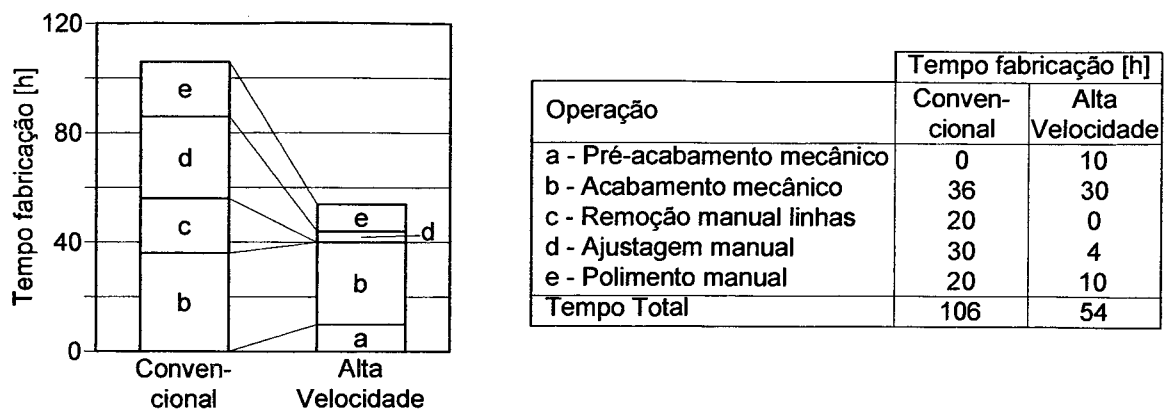


Figura 2.17 - Exemplo da redução do tempo de produção de moldes e matrizes através da usinagem com altas velocidades de corte [22]

Fresas de topo esférico são comumente utilizadas neste acabamento de superfícies complexas de moldes e matrizes. Este tipo de ferramenta tem uma característica que influi fortemente no resultado do processo de usinagem: a velocidade de corte é variável ao longo do gume. Em operações de acabamento a profundidade de corte é normalmente pequena e, como consequência, o diâmetro ativo da ferramenta também é pequeno. Desta forma, mesmo com uma alta rotação do fuso, a velocidade de corte efetiva no gume poderá não estar na faixa de alta velocidade e sim numa região de transição. O extremo desta situação é o centro da ferramenta, que tem velocidade zero e mínimo espaço para cavacos. Caso esta área esteja em contato com a superfície, podem ocorrer problemas de qualidade superficial e lascamentos em ferramentas de material menos tenaz. Sendo assim, a utilização de estratégias de fresamento em cinco eixos é bastante adequada para solucionar tais problemas, pois pode-se manter a ferramenta inclinada com um ângulo predefinido em relação à normal da superfície, evitando o contato do centro da fresa. A escolha adequada do tipo de estratégia a ser utilizada tem consequência direta na vida da ferramenta e também na exatidão dimensional do componente [15-18, 20, 21, 23].

2.7. Desgaste da Ferramenta

Durante a usinagem a cunha da ferramenta é submetida a um desgaste que depende da forma de solicitação e da duração de utilização da ferramenta. Na prática, os desgastes mais medidos e mais verificados são o desgaste de flanco e o desgaste de cratera, que são empregados como critério de fim de vida. As condições de atrito na região de contato da ferramenta podem ser comparadas com as do atrito seco no vácuo. O desgaste da ferramenta, numa regra geral, é relativamente rápido devido às solicitações térmicas e mecânicas elevadas. Os diversos mecanismos de desgaste em geral agem simultaneamente, de forma que tanto sua causa como seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si. Discrimina-se normalmente as seguintes causas de desgaste [1, 5, 24, 62]:

- Danificação do gume por solicitações térmicas e mecânicas excessivas;
- Adesão;
- Difusão;
- Abrasão mecânica;
- Oxidação.

À medida que a ferramenta vai se desgastando, observam-se variações mais ou menos profundas no processo de usinagem. A temperatura se eleva progressivamente, a força de corte e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície usinada se alteram e a qualidade superficial piora. Com ferramentas de aço-rápido, ocorre um sobreaquecimento do gume, que amolece e fica com aspecto de queimado. Em ferramentas de metal-duro o aumento das forças de corte, no caso de um desgaste excessivo, provoca o lascamento e a destruição total do gume. A utilização de uma ferramenta até este ponto é de todo desaconselhável, pois será necessário um longo trabalho de reafiação com a remoção de uma extensa camada de material de corte, antes que se possa restabelecer um gume adequado [62].

A determinação do ponto representativo do fim da vida de uma ferramenta é fundamental no estudo da usinabilidade. São utilizados na prática e nos ensaios de laboratório diversos critérios para determinar este ponto, dependendo a escolha, em

grande parte, das exigências da usinagem (precisão de medidas, grau de acabamento) e do material da ferramenta [62]. Entre esses critérios pode-se citar [1, 24, 62]:

- Falha completa da ferramenta;
- Falha preliminar da ferramenta;
- Largura da marca de desgaste de flanco (VB);
- Vibrações intensas da peça ou da ferramenta, ruídos fortes por vibrações da máquina;
- Profundidade da cratera (KT);
- Deficiência de qualidade superficial;
- Formação de rebarbas;
- Alterações de dimensão da peça;
- Comportamento das forças, do torque ou da potência;
- Aumento da força de avanço;
- Aumento da temperatura do gume.

O processo de fresamento possui particularidades que influem diretamente no desgaste ou na quebra da ferramenta. Quando cada dente entra no corte, ele é submetido a uma carga de choque mecânico que depende do material da peça, da posição da ferramenta, dos parâmetros de corte e da geometria da fresa. O calor gerado é proporcional à espessura do cavaco e à força de corte, ambos de caráter cíclico, além de ser função do material da peça e da ferramenta. As rápidas mudanças na geração de calor submete o material da fresa a severas solicitações que podem levar à fadiga térmica da parte cortante da ferramenta. Em virtude da constante interrupção do corte, o tipo de contato de entrada do gume na peça tem grande influência sobre o desgaste e os lascamentos da ferramenta [1, 2, 5, 6, 39].

A escolha adequada da geometria da fresa e da profundidade de corte radial permite que contatos desfavoráveis, principalmente o contato S, sejam evitados (**figura 2.18**). Na fabricação de rasgos, com profundidade de corte radial igual ao diâmetro ($a_e = d$), a carga de colisão é relativamente pequena devido à espessura inicial do cavaco igual a zero. Contudo, neste caso, o gume pode sofrer um desgaste abrasivo quando a fresa atrita uma superfície de material endurecido pelo dente anterior. Para

valores de a_e menor do que d a quina é muito solicitada e muitas vezes ocorre a quebra total do gume [1, 2, 5, 6, 39].

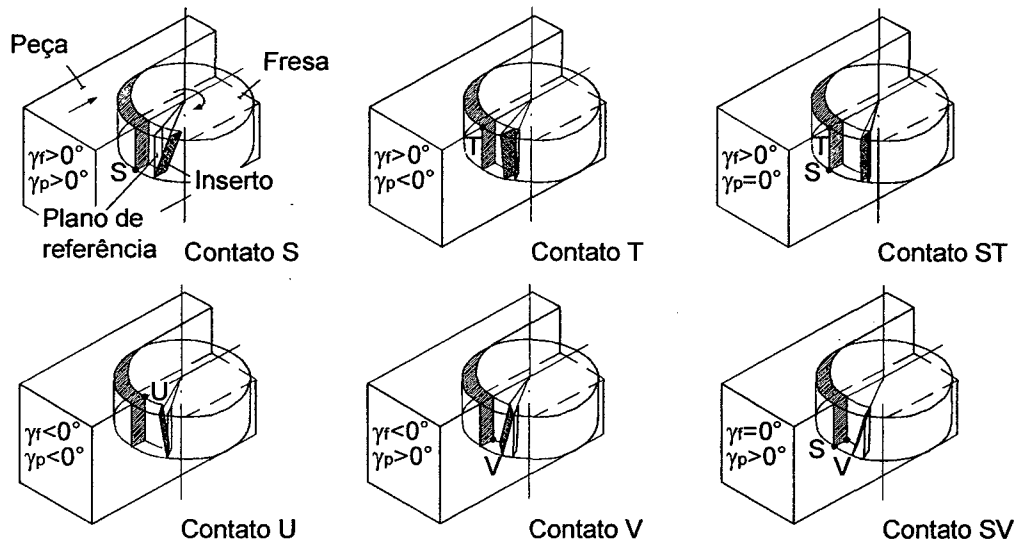


Figura 2.18 - Exemplos de tipos de contato de entrada do gume na peça [5, 6]

2.8. Materiais para Fresas

Em função das solicitações mecânicas e térmicas alternantes, os materiais para fresas devem ter alta tenacidade, alta resistência à solicitação térmica cíclica e alta resistência do gume. Na usinagem de aços são empregadas ferramentas de aço-rápido e metal-duro de elevada tenacidade do grupo P15 a P40, e para ferros fundidos, metais não-ferrosos, plásticos e aços temperados emprega-se o grupo K10 a K30. O desenvolvimento do metal-duro e da tecnologia de revestimentos permite hoje a utilização de ferramentas revestidas no fresamento de aços e ferros fundidos. No desbaste de ferro fundido cinzento com altas taxas de remoção utiliza-se a cerâmica não-óxida (Si_3N_4); para o acabamento de ferro fundido cinzento, fundidos duros, aços para beneficiamento e aços para ferramentas utiliza-se cerâmicas óxida e mista; para aços endurecidos e para ferramentas utiliza-se também o PCBN. Cermets têm aplicação no acabamento fino de aços. A usinagem de alumínio, plásticos e grafite para eletrodos é tipicamente feita com diamante policristalino [5].

A fabricação de moldes e matrizes ainda utiliza bastante ferramentas de aço-rápido em virtude da grande variedade de formas de ferramentas, facilidade de afiação e menor custo em relação a outros materiais. A elevada tenacidade do aço-rápido permite ainda a utilização da fresa em condições desfavoráveis de vibração. Materiais mais resistentes ao desgaste, como por exemplo o metal-duro, são mais sensíveis à vibração e o resultado pode, muitas vezes, ser prejudicado. Fresas inteiriças de aço-rápido são as de menor custo e disponíveis na maior variedade de tipos e tamanhos. São adequadas a uma ampla gama de aplicações, com a possível exceção à usinagem de materiais de baixa usinabilidade. Normalmente esse tipo de fresa é a melhor para pequenos diâmetros e pequena produção. Uma desvantagem é a redução da dureza dos gumes com o aumento da temperatura de fresamento. Pode-se utilizar também aço-rápido com adição de até 10% de cobalto, aumentando a resistência a quente e ao desgaste. Contudo, este tipo de ferramenta tem custo mais elevado e, por ser mais frágil, exige fixação mais cuidadosa. Existem também fresas de aço-rápido produzidas por metalurgia do pó ou com revestimento [1, 5, 6].

Fresas de topo inteiriça de metal-duro, em comparação com o aço-rápido, são mais duras, mais resistentes à abrasão e menos afetadas pelas altas temperaturas de usinagem. Podem ser utilizadas com velocidades de 3 a 10 vezes maior, tendo geralmente vida superior. Devem ser empregadas em altas produções, com máquinas de potência suficiente e fixação rígida. O metal-duro é particularmente bem adequado para usinagem de materiais não-metálicos, metais não-ferrosos e materiais de alta abrasividade e baixa resistência tais como alumínio, ligas de zinco e plásticos. São utilizadas também no fresamento de muitos aços e ferros fundidos, sendo para isso necessário elevada rigidez. O alto custo dessa ferramenta pode ser considerado uma desvantagem [1, 5].

Ferramentas com corpo de aço e insertos ou gumes brazados ou parafusados são amplamente utilizados a um custo inferior. Especificamente no caso de fresas com insertos intercambiáveis, opera-se com altas velocidades e avanços, além da possibilidade do uso de múltiplos gumes sem necessidade de reafiação. A utilização de fresas de topo com insertos intercambiáveis flexibiliza a adaptação do material da fresa com o material peça a ser usinado. Como desvantagens pode-se citar a produção de acabamento ruim e a indisponibilidade de fresas com pequeno diâmetro [1, 5].

A escolha do material da ferramenta para o fresamento com altas velocidades de corte deve considerar os mecanismos de desgaste em altas temperaturas, as tensões causadas por choques térmicos e as tensões mecânicas alternantes na fresa. O metal-duro demonstra ser o material mais versátil para aplicações com altas velocidades em função da boa relação entre dureza e tenacidade. No fresamento de acabamento de aços, fresas de Cermet proporcionam bons resultados [18, 19, 96].

Em geral utiliza-se o metal-duro da classe P devido à sua maior dureza em altas temperaturas comparado com a classe K. Revestindo-se o metal-duro com TiN através do processo PVD obtém-se características mais favoráveis de desgaste. O uso do CBN e de cerâmicas óxidas é vantajoso no fresamento de aços endurecidos. A utilização de metal-duro revestido e Cermet produz bons resultados no fresamento de ferro fundido com velocidades de corte de até 1000 m/min e, acima disso, ferramentas de Si_3N_4 e CBN são mais adequadas. Para o fresamento de ligas de alumínio, magnésio e cobre são empregadas fresas de metal-duro da classe K, cerâmica não-óxida e diamante policristalino, sendo que o último também é muito utilizado na usinagem de grafite e plásticos reforçados com fibras [18, 19, 96].

2.9. Fluidos de Corte

As funções dos fluidos de corte no fresamento são as mesmas de outras operações de usinagem: refrigeração e lubrificação da ferramenta e da peça, transporte dos cavacos, controle e prevenção de gumes postiços e prevenção da corrosão. A temperatura tem uma influência decisiva na dureza da ferramenta e, conseqüentemente, na sua vida. Num exemplo dado por FERRARESI [24], a vida de uma ferramenta de aço-rápido passou de 10 para 60 minutos com a redução de aproximadamente 50° C na temperatura de usinagem de um aço carbono [1, 3, 5, 6, 24, 62].

O fresamento, entretanto, possui características que podem causar problemas para a utilização dos fluidos. A natureza intermitente do processo, as variações de espessura de cavaco, além da ação centrífuga da fresa tornam a aplicação de meios refrigerantes difícil de ser efetuada sem que ocorram choques térmicos. No fresamento de aços e ferros fundidos, as fresas de metal-duro têm a tendência de lascas ou quebrar devido a esses choques térmicos. Ligas de alumínio, cobre e outros materiais

moles são beneficiados com a utilização de fluidos de corte, pois o risco de falha da ferramenta é menor devido às menores temperaturas e choques térmicos, o transporte de cavacos é favorecido e o acabamento é melhorado. Em alguns casos, como no fresamento de topo, pode se fazer necessário o uso de fluidos para remoção dos cavacos. Nestes casos deve-se aplicar o fluido copiosamente a fim de evitar grandes choques térmicos. As ferramentas de aço-rápido são favorecidas com a utilização dos fluidos em função da sua maior tenacidade e menor dureza a quente, quando comparadas com o metal-duro [1, 3, 6, 24, 62].

Nos últimos anos tem crescido a importância dada aos fatores negativos relacionados com a utilização dos fluidos de corte. Por razões econômicas, ecológicas e de novas leis tem-se tentado reduzir a aplicação destes fluidos nos processos de usinagem. Os custos relacionados à introdução e ao tratamento dos fluidos de corte podem atingir o dobro dos custos com as ferramentas. O investimento e o espaço necessário para os equipamentos são altos e o custo de descarte tem crescido progressivamente. Os fluidos de corte são um problema para o meio ambiente e uma série de leis, em diversos países, têm que ser observadas no seu uso. Eles constituem um perigo para a saúde das pessoas, podendo causar doenças de pele, pulmão, olhos, estômago e até mesmo câncer [5, 18, 98, 99].

Na usinagem a seco as funções dos fluidos de corte têm que ser substituídas. A falta de refrigeração aumenta a temperatura na usinagem, causando conseqüentemente maior desgaste da ferramenta, tensões residuais, erros dimensionais e de forma na peça, além do aquecimento de componentes da máquina que podem levar a mais desvios. Sem o efeito de lubrificação o atrito aumenta, favorecendo a adesão e também a formação de gumes postiços. A não remoção dos cavacos pelo fluido pode levar ao entupimento dos espaços para cavaco na ferramenta, danificação de superfícies já usinadas e aquecimentos localizados na máquina devido ao acúmulo de material removido [5, 18, 98, 99].

Os problemas relacionados à usinagem a seco vão depender da combinação entre material da peça e processo de usinagem, sendo portanto distintas as diferenças encontradas nos diversos casos de usinagem com fluido ou a seco. No fresamento de aços com fresa de metal-duro freqüentemente se observa o aumento da vida da ferramenta na usinagem a seco, sendo ainda recomendado, nestes casos, o uso de ferramentas revestidas. Para ligas de alumínio, que apresentam desgaste normalmente

pequeno, existe uma forte de adesão, que pode ser reduzida através da utilização de quantidades mínimas de fluido de corte. Por quantidade mínima de fluido de corte entende-se aplicação de uma névoa (meio lubri-refrigerante atomizado por um jato de ar comprimido) com consumo de fluido de corte inferior a 50 ml/h. Utiliza-se também o termo “quantidade reduzida de fluido de corte” quando a vazão for menor que 2 l/min para processos de geometria definida. A redução ou minimização da quantidade de fluido de corte utilizado pode ser uma alternativa para o sucesso da usinagem nos casos onde é necessária sua manutenção [5, 18, 98, 99].

3. Planejamento Experimental

Os experimentos realizados neste trabalho foram divididos e executados em dois grupos distintos, com condições e equipamentos diferentes. A primeira parte referiu-se aos ensaios de fresamento de topo reto, com velocidade de corte convencional, e a segunda aos ensaios de topo esférico, com altas velocidades de corte. As descrições detalhadas dos equipamentos citados estão nos anexos.

O objetivo principal dos experimentos foi a medição das componentes de força F_x , F_y e F_z em diversas condições de usinagem. Foi necessário, para isso, a definição de um sistema de coordenadas unificado que pudesse ser aplicado em todas as condições, e que facilitasse a análise dos resultados. Durante a realização dos ensaios poderia ter sido adotado o sistema de coordenadas da máquina-ferramenta ou o sistema do dinamômetro piezelétrico. Considerou-se, entretanto, que ambos os sistemas de coordenadas eram inadequados, porque as medições foram feitas com movimentos em diversos sentidos e direções e, além disso, no segundo grupo de experimentos foi utilizado um dinamômetro inclinado com diferentes ângulos em relação à ferramenta. Desta forma seria possível, por exemplo, uma força F_x ora positiva, ora negativa, para os mesmos parâmetros de ensaio, o que é uma incoerência. Optou-se então por criar um terceiro sistema de coordenadas, aplicável em todas as condições de ensaio, definido a seguir e apresentado na **figura 3.1**:

- A força F_y possui a direção e sentido da velocidade avanço da fresa (v_f);
- Nos casos de usinagem de rampas, com subidas ou descidas da ferramenta, F_y possui a mesma direção e sentido da componente horizontal da velocidade avanço da fresa (v_{fh});
- A força F_z possui a direção do eixo da fresa, o sentido saindo da peça e é perpendicular à F_y ;
- F_x completa o sistema cartesiano sendo perpendicular a F_y e F_z .

É importante ressaltar que adotou-se a fresa em movimento e as componentes de força aplicadas na peça. Com isso tem-se um sistema unificado que foi aplicado em todos os experimentos e análises apresentadas neste trabalho.

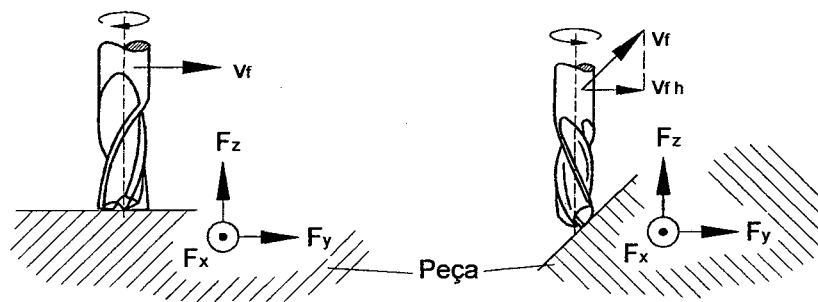


Figura 3.1 - Sistema de coordenadas adotado neste trabalho.

3.1. Fresamento de Topo Reto Convencional

Os ensaios de fresamento de topo reto com velocidade de corte convencional foram ainda subdivididos em dois subgrupos. Primeiro foram ensaiados os comportamentos das forças para algumas condições de diâmetro e número de dentes da fresa, além da profundidade de corte radial, sendo que nestes ensaios foram desconsiderados os efeitos do desgaste das ferramentas. O segundo subgrupo mediu a evolução das forças em função do desgaste da fresa para alguns tipos de fluido de corte, material da fresa e velocidade de corte. Apesar do objetivo principal ter sido sempre a medição de força, o primeiro subgrupo foi denominado de ensaios de força e o segundo ensaios de desgaste.

Os experimentos deste grupo foram executados em uma fresadora vertical CNC, Romi POLARIS F400 (vide características no item 7.1.1). Nas medições de forças durante a usinagem foi utilizado um sistema composto dos seguintes elementos (vide características no item 7.1.3), mostrados na **figura 3.2**:

- Dinamômetro piezelétrico;
- Amplificadores de sinal;
- Sistema de aquisição de sinais A/D (conversor de sinais analógicos para digitais);
- Microcomputador PC;
- Programa para aquisição de sinais digitais;
- Programa para análise dos sinais.

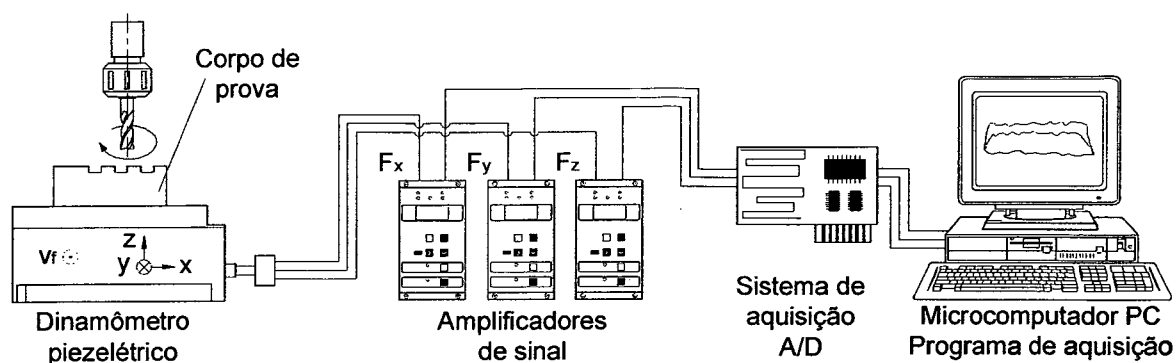


Figura 3.2 - Sistema de medição de forças

A frequência de aquisição do sinal de força para esta parte dos experimentos foi de 1 kHz.

Foram utilizadas fresas de topo de aço-rápido, com corte à direita e hélice à direita, fabricadas pela empresa Indufresa Comercial Ltda., com a fixação feita por pinça. A seleção deste tipo específico de fresa teve como base sua ampla utilização na indústria metal-mecânica, podendo-se afirmar que estão entre as fresas de topo mais empregadas. Optou-se por uma faixa de diâmetro também representativa, que não fosse muito pequena, dificultando os ajustes de usinagem e a visualização de desgastes e defeitos, e também não muito grande, consumindo muito material, aumentando custos e elevando os esforços que foram medidos. As fresas utilizadas foram:

- DIN 844A-N, 4 dentes, diâmetro 8 mm;
- DIN 844A-N, 4 dentes, diâmetro 10 mm;
- DIN 844A-N, 4 dentes, diâmetro 12 mm;
- DIN 327 B, 2 dentes, diâmetro 10 mm.

Utilizaram-se dois tipos de aço-rápido: no subgrupo de ensaios de forças as fresas eram de aço-rápido S4 e nos ensaios de desgaste de aço-rápido S4 e S8. A principal diferença entre estes dois materiais é que o segundo tem uma adição de 5% de cobalto. A composição padronizada com os principais elementos químicos está apresentada no item 7.2, tabela 7.1.

A geometria e as condições dos gumes foram avaliadas com o auxílio de um medidor de fresas e um microscópio de ferramentaria (vide características no item

7.1.5). Foi medido o batimento de cada um dos gumes das fresas montadas no fuso da máquina-ferramenta de forma a avaliar a excentricidade.

Os corpos de prova foram produzidos com aço laminado ABNT 1040, com dureza de 199 ± 15 HB (medida conforme norma ISO 4498/1 1978, com diâmetro de esfera de 2,5 mm, carga de 187,5 kp, durante 10 s), produzido pela empresa Gerdau S.A. Esse aço possui dureza mediana e foi selecionado por ser considerado representativo entre os aços de construção mecânica mais utilizados. A composição química básica desse aço, fornecida pelo fabricante, encontra-se no item 7.2, tabela 7.2.

Em função da disponibilidade do material ser na forma de barras redondas de 102 mm de diâmetro, algumas adaptações tiveram que ser feitas para um melhor aproveitamento. Foram usinados 2 tipos de corpos de prova, conforme **figura 3.3**, sendo um para medições de força, montado sobre o dinamômetro piezelétrico, e outro para desgastar a ferramenta, fixado em uma morsa sobre a mesa da fresadora. As linhas tracejadas indicam onde foram executados os rasgos dos ensaios, sendo que no corpo de prova de desgaste usinou-se tais rasgos em diversas camadas. Nos ensaios de força utilizou-se somente o primeiro tipo de corpo de prova.

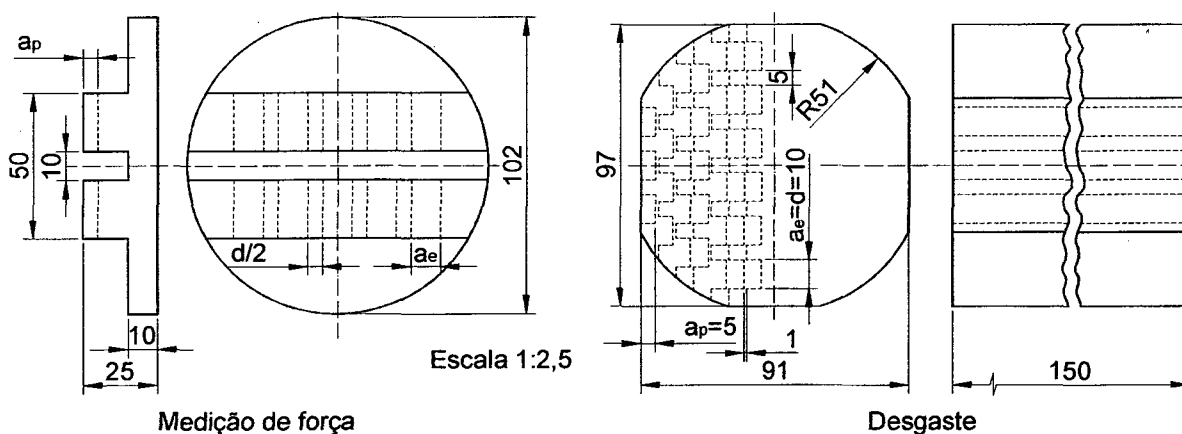


Figura 3.3 - Corpos de prova para medição de força e para desgaste da ferramenta

A escolha dos parâmetros de corte empregados foi baseada em recomendações de referências bibliográficas [1, 2, 100, 101], na experiência pessoal e em ensaios preliminares para ajuste dos parâmetros às condições do ensaio. Fez-se a opção por valores considerados médios de velocidade de corte e avanço.

3.1.1. Ensaio de força

Os parâmetros de corte utilizados nos ensaios de força foram:

- Velocidade de corte (v_c): 25 m/min;
- Avanço por dente (f_z): 0,025 mm;
- Profundidade de corte axial (a_p): $d/2$;
- Profundidade de corte radial (a_e): 0,05d, 0,50d, 0,75d, 1,0d.

Este subgrupo de experimentos foi realizado sem fluido de corte. Nos ensaios com a_e igual a 0,05d e 0,50d foram efetuadas usinagens concordante e discordante. Para o ensaio com a_e igual a 0,75d a usinagem iniciou discordante e terminou concordante.

As condições de todos os ensaios de força realizados, identificados por EF, estão resumidos na **tabela 3.1**.

Ensaio	Ferramenta	a_p [mm]	a_e [mm]
EF01	d 8 mm, z 4	4,0	8
EF02	d 10 mm, z 2	5,0	10
EF03	d 10 mm, z 4	5,0	10
EF04	d 12 mm, z 4	6,0	12
EF05	d 10 mm, z 4	5,0	7,5
EF06	d 10 mm, z 4	5,0	5,0 - concordante
EF07	d 10 mm, z 4	5,0	5,0 - discordante
EF08	d 10 mm, z 4	5,0	0,5 - concordante
EF09	d 10 mm, z 4	5,0	0,5 - discordante

Tabela 3.1 - Condições dos ensaios de força realizados

O comprimento de cada rasgo usinado foi de 20 mm. Repetiu-se cada condição com três ferramentas diferentes e cada ferramenta usinou três rasgos idênticos, totalizando nove ensaios para cada condição. As condições EF03 e EF05 a EF09 foram executadas com o mesmo conjunto de três fresas, iniciando-se pela condição de ensaio mais leve ($a_e = 0,05d$) e finalizando com a mais pesada ($a_e = d$). Não foi considerado o desgaste da fresa e a estabilização inicial do gume, pois nas condições

e comprimentos de ensaio não se observou uma influência significativa destas variáveis, apesar de não se poder afirmar que a ferramenta estava na mesma condição nas três repetições.

3.1.2. Ensaio de desgaste

Utilizaram-se os seguintes parâmetros de corte:

- Velocidade de corte (v_c): 25 e 50 m/min;
- Avanço por dente (f_z): 0,025 mm.
- Profundidade de corte axial (a_p): 5,0 mm;
- Profundidade de corte radial (a_e): 10 mm.

As condições de todos os ensaios de desgaste realizados, identificados por ED, estão resumidos na **tabela 3.2**. Cada condição de ensaio foi repetida com três ferramentas novas diferentes.

Ensaio	Fluido de corte	Material fresa	v_c [m/min]
ED01	Seco	S4	25
ED02	Seco	S4	50
ED03	Emulsão	S4	25
ED04	Emulsão	S4	50
ED05	Minimização	S4	25
ED06	Seco	S8	25

Tabela 3.2 - Condições dos ensaios de desgaste realizados

A emulsão utilizada foi a Maxlub Recut 2, com uma concentração de 6%, aplicada na forma de um jato, com diâmetro do bico de saída de 6,8 mm, dirigido para a região de corte para refrigeração e remoção dos cavacos, com um volume de 180 l/h.

O óleo utilizado na minimização de fluido de corte foi o IT Micro 4300, com um volume total de 50 ml/h, aplicado com dois bicos (25 ml/h para cada bico) direcionados para a região de corte, procurando-se utilizar o jato de ar para remoção dos cavacos

(vide características da emulsão e do óleo no item 7.1.7 e do sistema de minimização no item 7.1.6).

O procedimento para o ensaio de desgaste foi mais complexo que os ensaios de força. Primeiro media-se a força com a ferramenta nova e, em seguida, usinava-se uma série de canais no corpo de prova de desgaste. De acordo com a observação do operador, eram feitas novas medidas de força e imagens dos gumes da fresa para acompanhamento do desgaste.

Um fator importante, que teve conseqüências no resultado do experimento, foi a necessidade da parada da etapa de desgaste para remoção de uma camada de material já usinado no corpo de prova de desgaste, permitindo a utilização da camada seguinte. Cada uma destas paradas interrompeu a seqüência do ensaio, possibilitando o esfriamento a fresa. Como a interrupção para tomada de imagens também ocasionava o esfriamento da fresa, procurou-se conciliar estas duas necessidades de parada. Nos casos onde o desgaste, avaliado visualmente, tinha evoluído pouco, dispensou-se a tomada de imagens. Quando a fresa estava na iminência do colapso o ensaio era interrompido para uma última tomada de imagens.

Nas imagens das regiões mais importantes da fresa, efetuadas durante os intervalos de parada, foi utilizado um sistema composto dos seguintes elementos (vide características no item 7.1.4), mostrados na **figura 3.4**:

- Câmera 1/2" CCD preto e branco ;
- Conjunto de lentes e espaçadores;
- Suporte regulável de câmera;
- Placa de aquisição de imagens;
- Microcomputador PC;
- Programa de aquisição de imagens.

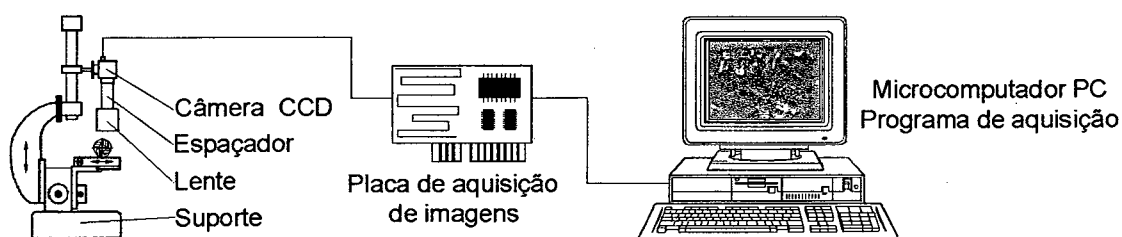


Figura 3.4 - Sistema de aquisição de imagens das fresas

As fresas utilizadas nos ensaios de desgaste eram todas DIN 844A-N, 4 dentes, diâmetro (d) de 10 mm. As regiões observadas, indicadas na **figura 3.5**, foram: flanco principal, flanco secundário e face.

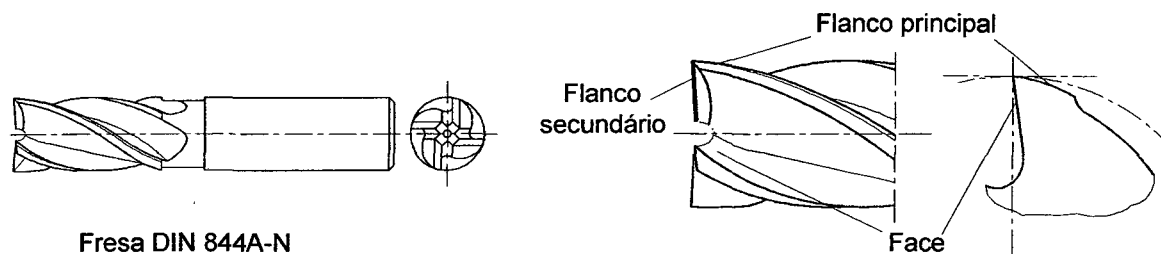


Figura 3.5 - Fresa de topo reto DIN 844A-N e as regiões observadas durante os ensaios [2, 101]

3.2. Fresamento de Topo esférico com Altas Velocidades de Corte

Os ensaios de medição de forças no fresamento de topo esférico com altas velocidades de corte foram realizados em uma pequena fresadora vertical (KÖRNER CNC - 532S), com rotação máxima do fuso de 40000 rpm (vide características no item 7.1.2).

O sistema de medição de forças era semelhante ao apresentado na **figura 3.2**, cujas principais diferenças são os modelos dos equipamentos utilizados (vide características no item 7.1.3). A frequência de aquisição utilizada foi de 25 kHz. Outra importante diferença foi o dispositivo de fixação do corpo de prova e do dinamômetro piezelétrico. Tratava-se de um suporte articulado que permitia a inclinação da peça em duas direções de forma independente (**figura 3.6**). Como a posição do dinamômetro mudava para diversos ensaios, fez-se uma conversão de coordenadas para adequá-las ao sistema proposto no início deste capítulo.

Os corpos de prova foram produzidos com aço DIN 40CrMnMo7 (DIN 1.2311), com dureza de 267 ± 6 HB (medida conforme norma ISO 4498/1 1978, com diâmetro de esfera de 2,5 mm, carga de 187,5 kp, durante 10 s). Foi escolhido esse aço por ser amplamente utilizado na fabricação de moldes e matrizes e, desta forma, permitir a medição de forças em condições simuladas e representativas de fabricação destes

componentes. A composição química básica desse aço encontra-se no item 7.2, tabela 7.3.

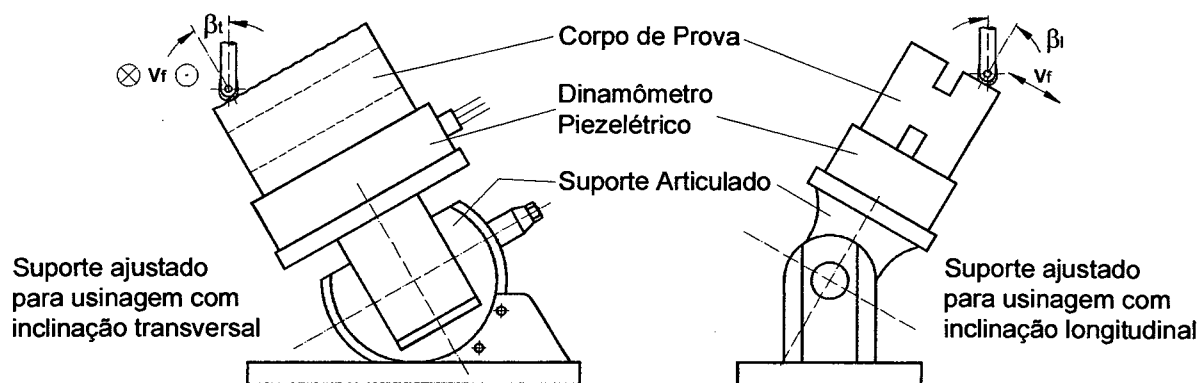


Figura 3.6 - Suporte articulado para inclinação da peça em relação à ferramenta

A geometria do perfil do corpo de prova era em forma de um H para que numa mesma fixação existisse duas superfícies disponíveis para ensaio e, além disso, virando-o duas novas superfícies eram utilizadas facilmente (figura 3.7).

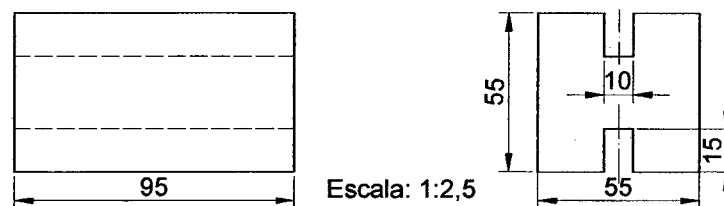


Figura 3.7 - Corpo de prova para os ensaios com altas velocidades

A ferramenta utilizada nesta parte dos ensaios foi uma fresa de topo esférico de 10 mm de diâmetro, com um inserto intercambiável de metal-duro revestido (TiN, processo CVD), dois dentes, fabricada pela empresa Walter AG, Alemanha (Fresa de copiar e acabar NOVEX® F2139.5.10.080.10-CS, inserto P3201-D10 WAK 15). O suporte do inserto era também de metal-duro, proporcionando maior rigidez, e a fixação na máquina feita por pinça. Esta fresa é recomendada pelo fabricante para acabamento de moldes e matrizes no fresamento com altas velocidades de corte.

Os parâmetros de corte foram escolhidos com base em recomendações de referências bibliográficas [15, 16, 18, 19] e em ensaios preliminares para ajuste das

condições do ensaio. Os parâmetros de corte utilizados, para usinagem considerada de acabamento, foram os seguintes:

- Velocidade de corte média (v_{cm}): 500 m/min;
- Rotação fixa (n): 31800 rpm;
- Avanço por dente (f_z): 0,075 mm;
- Profundidade de corte axial (a_p): 0,50 mm;
- Profundidade de corte radial (a_e): 4,36 mm combinado, 0,50 mm concordante, 0,50 mm discordante;
- Inclinação longitudinal (β_l): -60° , -45° , -30° , -15° , 0° , 15° , 30° , 45° , 60° ;
- Inclinação transversal (β_t): -60° , -45° , -30° , -15° , 0° , 15° , 30° , 45° , 60° ;
- Condições de avanço: puxando e empurrando.

A rotação da fresa (n) é função da velocidade de corte e do diâmetro considerado para o cálculo, sendo que para uma fresa de topo esférico a v_c é variável ao longo do gume. Portanto, faz-se necessário definir em qual diâmetro a rotação foi calculada. Têm-se algumas possibilidades para esta definição: diâmetro máximo da seção de corte, diâmetro médio da seção ou um diâmetro fixo para todas as condições (figura 3.8).

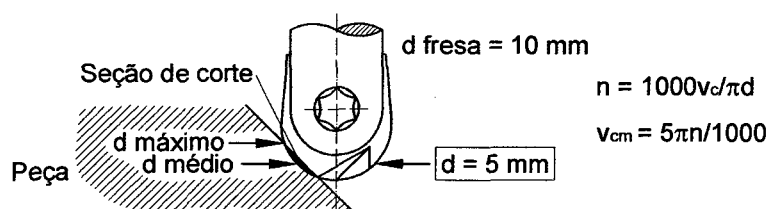


Figura 3.8 - Diâmetro para cálculo da rotação da fresa

Optou-se pela alternativa do diâmetro fixo por considerá-la a mais simples e a que mais se aproxima das condições reais de usinagem de moldes e matrizes. Na produção deste tipo de componente, cujas superfícies são geralmente complexas, a região atuante do gume da fresa de topo esférico muda constantemente, de acordo com a inclinação da superfície que está sendo produzida no fresamento de 3 eixos, ou de acordo com a inclinação que se deseja dar à fresa no fresamento de 5 eixos. A

prática corrente neste processo é o uso de uma rotação fixa para o fuso, fazendo com que a velocidade de corte seja variável, conforme a inclinação da fresa em relação à peça.

Pode-se mudar a rotação para manter a v_c constante, mas no fresamento com altas velocidades de corte e avanço seriam necessárias muitas mudanças bruscas na rotação do fuso, exigindo baixa inércia rotacional desse componente e sistemas de controle aptos a realizar tal alteração. Além disso, o resultado obtido é normalmente pior do que com a utilização de uma rotação constante, devido às dificuldades citadas.

Uma alternativa é a utilização de técnicas de interpolação do tipo NURBS para suavizar as mudanças de rotação, conforme KREIDLER [102], mas a aplicação deste recurso está em fase inicial de implantação nos sistemas de produção atuais. Concluindo-se, foi adotada uma rotação fixa para todas as condições de ensaio calculada no diâmetro médio da ferramenta, e utilizou-se o termo velocidade de corte média (v_{cm}) para a velocidade de corte neste diâmetro (figura 3.8).

A profundidade de corte radial (a_e) igual a 4,36 mm foi obtida pela entrada da fresa em cheio na peça, com profundidade de corte axial igual (a_p) a 0,50 mm, resultando em fresamento combinado. As condições de a_e igual a 0,50 mm foram equivalentes à execução da usinagem de uma seqüência de linhas para a aproximação de uma superfície, e executadas com fresamento concordante e discordante.

A definição de condição de avanço puxando ou empurrando é melhor entendida pela observação da figura 3.9. Definiu-se avanço puxando a subida de uma rampa, no caso de inclinação longitudinal, ou a execução da seqüência de linhas com a fresa inclinada para o lado oposto ao das linhas já executadas, no caso de inclinação transversal. O avanço empurrando foi definido como a descida de uma rampa, no caso de inclinação longitudinal, ou a execução da seqüência de linhas com a fresa inclinada para o mesmo lado das linhas já executadas, no caso de inclinação transversal.

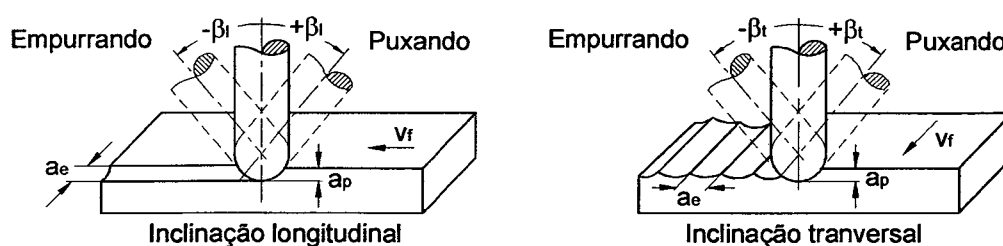


Figura 3.9 - Denominações das condições de avanço e inclinação [15-17]

As condições de todos os ensaios com altas velocidades de corte realizados, identificados por EV, estão resumidas na **tabela 3.3**. O código XX indica o ângulo de inclinação da fresa em relação à superfície para um ensaio específico. Tem-se, portanto, um total de 54 condições de ensaio, sendo que cada condição foi repetida 3 vezes com uma mesma fresa, e ainda com três fresas diferentes, totalizando 486 experimentos.

Ensaio	Inclinação	Ângulo (XX) [°]	a_e [mm]
EVLBXX	Longitudinal	-60, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 60	4,36 - combinado
EVLCXX	Longitudinal	-60, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 60	0,50 - concordante
EVLDX	Longitudinal	-60, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 60	0,50 - discordante
EVTBXX	Transversal	-60, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 60	4,36 - combinado
EVTCXX	Transversal	-60, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 60	0,50 - concordante
EVTDX	Transversal	-60, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 60	0,50 - discordante

Tabela 3.3 - Condições dos ensaios com altas velocidades de corte realizados

Utilizaram-se dois conjuntos de três fresas novas para estes ensaios; o primeiro conjunto foi utilizado para os ensaios com inclinação longitudinal e o segundo para inclinação transversal. É evidente que não se pode afirmar que todos os ensaios foram realizados exatamente nas mesmas condições, pois deve-se levar em consideração o desgaste e a estabilização que ocorre num gume novo após sua utilização. No entanto, os comprimentos usinados foram curtos (22,5 mm) e não se observou desgaste mensurável na fresa, mesmo quando essa é avaliada no microscópio, existindo somente sinais de pequenas quantidades de material da peça aderidas ao gume. Analisando-se também a repetibilidade dos experimentos não se verificou diferença significativa do desgaste nos resultados, estando as variações observadas dentro da faixa de incertezas dos ensaios. Considerando-se também fatores econômicos, optou-se por este procedimento de utilização dos dois grupos de três fresas.

4. Análise dos Resultados

A análise dos resultados obtidos nos experimentos seguiu a seqüência descrita no planejamento experimental. Primeiramente foram analisados os resultados dos ensaios de fresamento de topo reto com velocidade de corte convencional e, em seguida, os resultados dos ensaios de fresamento de topo esférico com altas velocidades de corte.

As análises da primeira parte dos experimentos englobaram os efeitos da excentricidade, da vibração auto-excitada e dos parâmetros d (diâmetro da fresa), z (número de dentes da fresa) e a_e (profundidade de corte radial) na resultante de forças no plano xy (F_{xy}) e sua direção (θ) e sentido, assim como, em alguns casos, nas componentes de força F_x , F_y e F_z . O efeito do fluido de corte foi correlacionado não somente com a resultante de forças mas também com o desgaste sofrido pela fresa.

Os resultados dos ensaios com altas velocidades de corte enfatizaram os efeitos da inclinação do eixo da fresa em relação à superfície da peça e os efeitos da usinagem concordante, discordante e combinada na resultante F_{xy} , sua direção θ e seu sentido, além das componentes F_x , F_y e F_z .

Na maioria dos casos de análise a resultante F_{xy} foi analisada por melhor representar o processo de fresamento de topo reto, visto que efeitos de deflexão e vibração auto-excitada estão diretamente relacionadas a esta resultante. Para todas as análises, as componentes F_x e F_y apresentaram o mesmo comportamento de F_{xy} e somente F_z não apresentou sempre a mesma tendência. Por ter a característica de ser a componente passiva do processo de fresamento de topo, F_z é mais susceptível a variações de afiação, desgaste e outras irregularidades durante a usinagem.

Utilizou-se como sistema de coordenadas para todas as análises realizadas o mesmo que foi estipulado no Planejamento Experimental (Capítulo 3), e indicado na **figura 3.1**.

4.1. Ensaio de Fresamento de Topo Reto Convencional

4.1.1. Efeito da excentricidade da fresa nas forças

A primeira análise evidencia o efeito da excentricidade da fresa no perfil das componentes de força F_x , F_y e F_z . A excentricidade e a deflexão são inerentes ao processo de usinagem e não podem ser evitados na prática. A excentricidade é atribuída principalmente a erros de montagem e altera as forças médias e os picos máximos e mínimos do perfil instantâneo, deslocando o conteúdo de frequências das forças da frequência de entrada dos dentes para a de rotação da fresa [7-10].

A **figura 4.1** mostra dois experimentos realizados com os mesmos parâmetros de corte do ensaio EF03 (ver **tabela 3.1**). No primeiro a montagem da fresa foi feita de forma cuidadosa, buscando-se reduzir a excentricidade, e no segundo acentuou-se a excentricidade com uma montagem inadequada. Em ambos os gráficos de força o período de tempo indicado é equivalente a dois giros completos da fresa (oito entradas de dentes).

O valor exato da excentricidade gerada não pode ser apresentado. Pode-se, entretanto, apresentar o valor do batimento radial de cada um dos dentes da fresa montada na condição de usinagem. No entanto, o valor do batimento medido não corresponde ao da excentricidade. Devido ao efeito da deflexão, a excentricidade introduzida é atenuada. Desta forma foram utilizados os termos baixa e alta excentricidade para designar as duas condições de ensaio. Na condição de baixa excentricidade a deflexão reduz os efeitos da excentricidade, que é inerente à montagem efetuada, e na condição de alta excentricidade reduz o efeito do erro forçado. Pode-se, contudo, afirmar que a excentricidade real na direção do avanço da fresa foi certamente inferior ao valor de avanço por dente f_z (0,025 mm para este ensaio), pois todos os dentes atuaram no processo de usinagem.

Foram destacados na **figura 4.1** os picos máximos da componente F_x equivalentes a um giro da fresa. No experimento com baixa excentricidade nota-se que estes picos têm aproximadamente o mesmo nível de força. Para o experimento com alta excentricidade observa-se que um pico tem um nível de força maior e outro, equivalente ao dente diametralmente oposto, um nível de força menor. Os dois picos intermediários estão no mesmo nível de força. Este resultado é equivalente ao modelo

apresentado na **figura 2.3**, com um dente removendo uma quantidade de material maior que f_z e o outro uma quantidade menor.

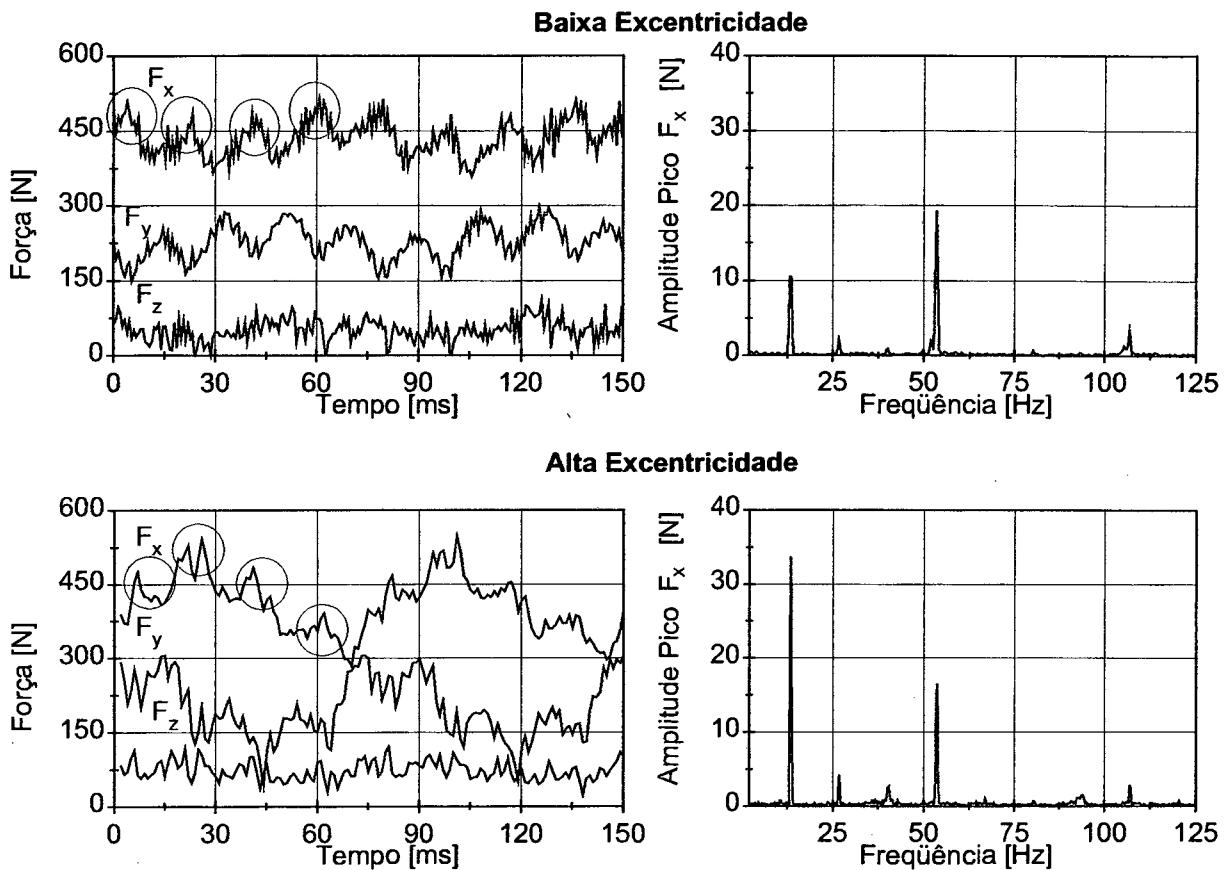


Figura 4.1 - Efeito da excentricidade de uma fresa de 4 dentes em F_x (sinal no tempo e espectro de freqüências)

Para as duas condições de usinagem construiu-se o espectro de freqüências da componente F_x , apresentados ao lado do respectivo gráfico de força no domínio do tempo. O eixo das abscissas não inicia na freqüência zero a fim de se eliminar a componente estática da força, ressaltando-se as demais componentes de freqüência.

No ensaio com baixa excentricidade são evidentes dois picos, sendo o menor na freqüência de rotação da fresa e o maior na freqüência de entrada de dentes. O pico na freqüência de rotação indica que a excentricidade não foi completamente eliminada, apesar de seu efeito não ser evidente.

Para o ensaio com alta excentricidade, o pico na freqüência de rotação é superior ao pico referente à entrada de dentes, confirmando que a excentricidade tem o

efeito de deslocar o conteúdo de freqüências da freqüência de entrada de dentes para a de rotação. Este resultado pode ser inferido também através da observação do gráfico de força no domínio tempo para o experimento com alta excentricidade, onde se nota uma ondulação na freqüência de rotação. Esta mesma ondulação não é evidente no experimento com baixa excentricidade.

Mais dois experimentos com baixa e alta excentricidade foram executados com os parâmetros de corte do ensaio EF02 (ver **tabela 3.1**), sendo que para este caso tem-se uma fresa com 2 dentes. Os resultados destes experimentos estão apresentados na **figura 4.2** e na **figura 4.3**.

Para as análises seguintes foi primeiramente calculada a soma vetorial da componentes F_x e F_y , obtendo-se como resposta a resultante de forças no plano xy denominada F_{xy} .

Na **figura 4.2** tem-se a resultante F_{xy} apresentada no domínio do tempo e no domínio da freqüência para os experimentos com baixa e alta excentricidade. O período de tempo compreende dois giros completos da fresa (quatro entradas de dentes) e o intervalo de freqüências não inicia no zero para que o efeito da componente estática da resultante fosse eliminado.

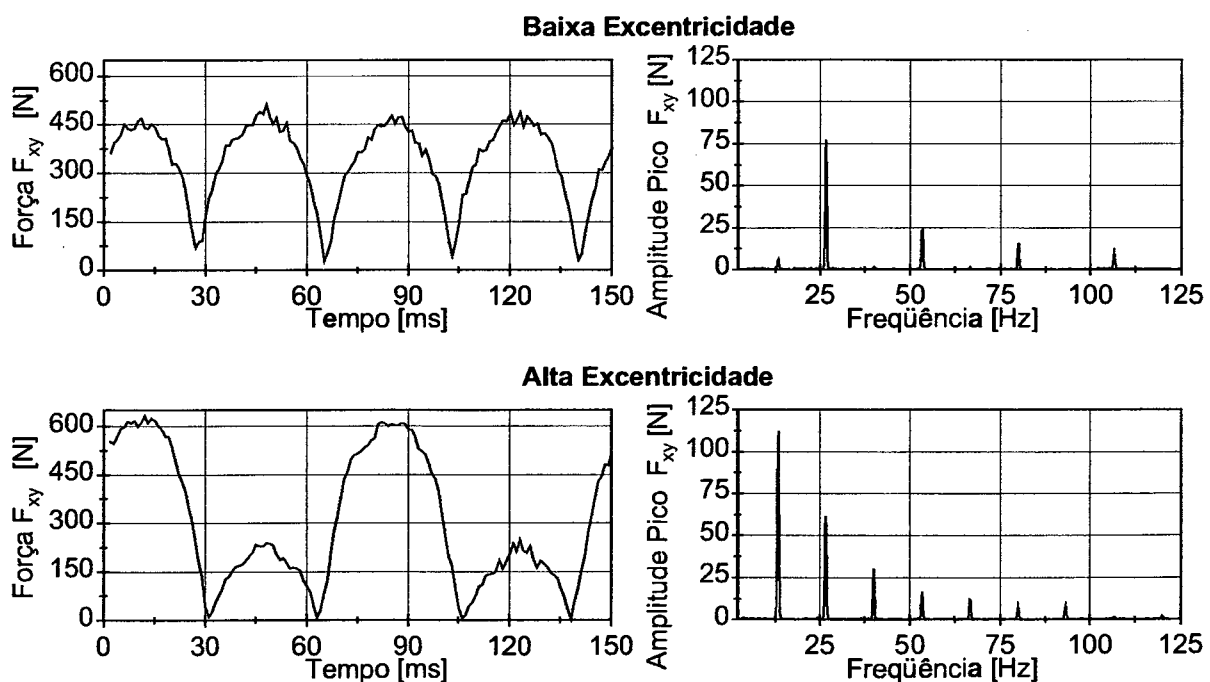


Figura 4.2 - Efeito da excentricidade de uma fresa de 2 dentes em F_{xy} (sinal no tempo e espectro de freqüências)

Novamente se observa que os picos da resultante F_{xy} estão no mesmo nível de força e a frequência dominante é a de entrada de dentes para o experimento com baixa excentricidade. Na montagem específica deste experimento obteve-se um valor de excentricidade bastante reduzido, o que pode se notado pelo diminuto pico na frequência de rotação.

Para o experimento com alta excentricidade tem-se, como analisado anteriormente, um pico de força acentuado e um outro atenuado. Neste caso estudado ocorreu um forte deslocamento do conteúdo de frequências da frequência de entrada de dentes para a de rotação.

Nos dois casos apresentados na **figura 4.2** os picos de frequência subseqüentes aos picos máximos são os harmônicos destas frequências dominantes e não têm interesse específico neste trabalho.

A análise da resultante F_{xy} , sua direção e sentido também oferece muitas informações úteis para o estudo e monitoramento do processo de fresamento de topo. Conforme mostrado no planejamento experimental, foram medidas as componentes de força F_x , F_y e F_z , convertidas de analógico para digital e armazenadas, lembrando-se que desta maneira tem-se o sinal medido na forma de pontos discretos. Para cada ponto medido pode-se calcular a resultante F_{xy} , seu ângulo de direção θ e seu sentido.

A **figura 4.3** apresenta alguns gráficos que foram gerados a partir dos resultados deste processamento do sinal medido. No gráfico radial foram indicados pontos com o valor da resultante F_{xy} no eixo radial e o ângulo de direção θ no eixo angular. Tem-se assim uma nuvem de pontos que indicam a posição instantânea da resultante F_{xy} . O desenho à esquerda deste gráfico indica o sentido de rotação da fresa, sua direção de avanço, a origem do ângulo de direção θ e a profundidade de corte radial a_e do ensaio em questão.

Outra forma de apresentação dos resultados do processamento do sinal medido é a construção de histogramas com os pontos de resultante e ângulo de direção. No lado direito da **figura 4.3** tem-se o histograma de F_{xy} e o de θ . Eles foram construídos somando-se o número de ocorrências, apresentadas no eixo das ordenadas, de valores de F_{xy} e θ para uma faixa determinada com base em um número de classes igual a 20.

Os histogramas são úteis pois indicam a forma como as variações do sinal medido se distribuem. A simples apresentação da média e desvio-padrão para um

dados ensaio é uma informação pobre neste caso. Existe sempre uma tendência de se considerar que os dados estão configurados conforme uma distribuição normal, o que não é correto na maioria das análises aqui realizadas.

Estes gráficos e esta forma de análise também foram utilizados para os demais estudos executados ao logo deste trabalho.

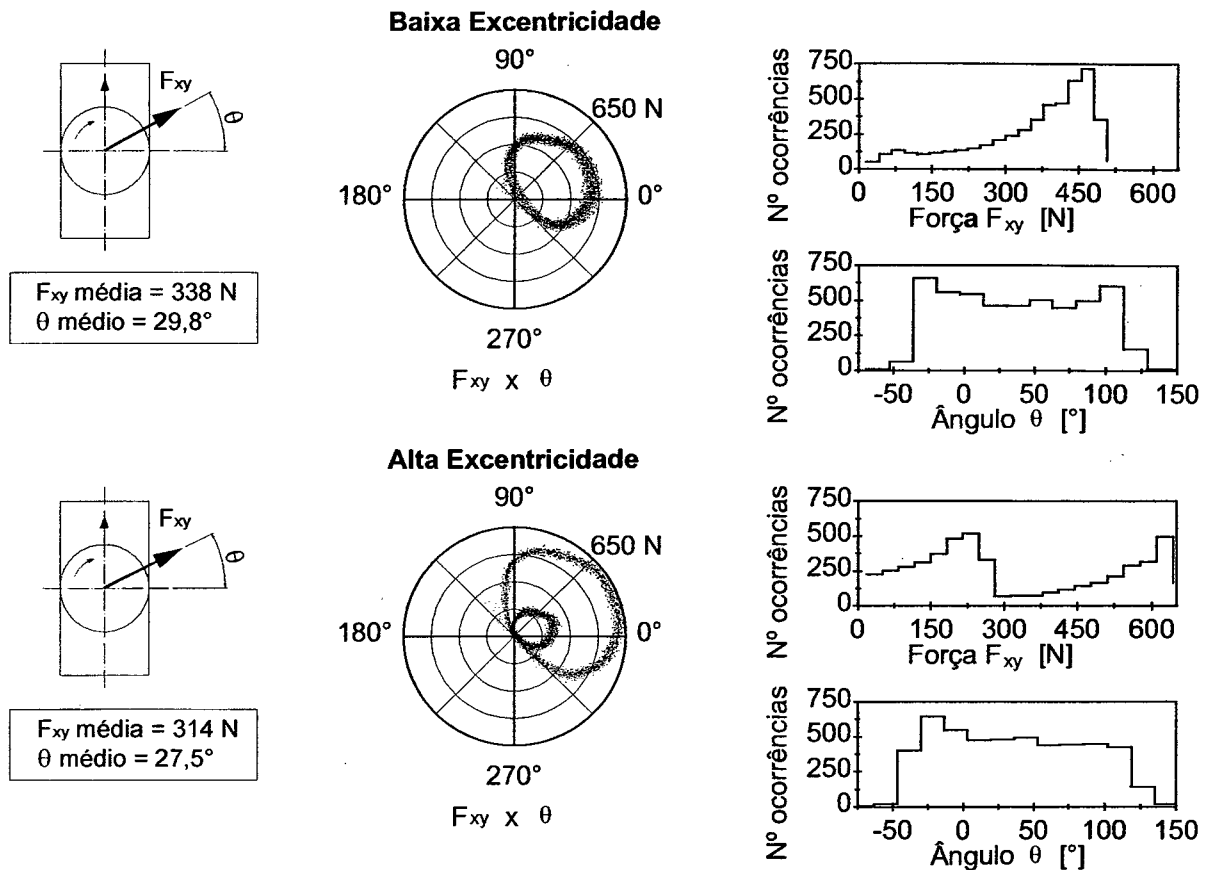


Figura 4.3 - Efeito da excentricidade de uma fresa de 2 dentes em F_{xy} (valores médios, F_{xy} em função de θ e histogramas)

Retornando-se à análise do efeito da excentricidade no fresamento de topo, a **figura 4.3** mostra características importantes desta irregularidade do processo. Para o ensaio com baixa excentricidade os pontos do gráfico radial de F_{xy} em função de θ estão dispostos na forma de uma coroa, para esta condição específica de experimento. Isto indica que os dois dentes da fresa cortaram a mesma quantidade de material, resultando na mesma força para ambos.

O histograma de F_{xy} mostra uma concentração de ocorrência de pontos na faixa de 450 N e a forma da distribuição, como destacado anteriormente, não é normal. Esse histograma é útil pois facilita a visualização da concentração de pontos, em relação ao gráfico radial, e ainda ressalta que a média da resultante para este experimento (338 N) está fora da faixa de maior densidade de pontos.

O histograma de θ mostra uma distribuição relativamente constante do ângulo de posição para esta condição de ensaio, característica que não é facilmente observada no gráfico radial.

Comparando-se somente o valor de F_{xy} e θ médios entre ensaio com baixa excentricidade (338 N e 29,8°) e o ensaio com alta excentricidade (314 N e 27,5°) nota-se uma pequena tendência dos valores do segundo caso serem menores. Entretanto as diferenças são pouco significativas para uma análise mais conclusiva.

O gráfico radial e o histograma de F_{xy} do ensaio com alta excentricidade apresentam características bastante peculiares, que podem então ser utilizadas como forma de comparação com o processo com baixa excentricidade. O gráfico radial mostra duas coroas de pontos distintas, uma maior e outra menor que a coroa do ensaio com baixa excentricidade. Tem-se novamente evidenciado que, numa condição de excentricidade durante o processo de fresamento de topo, um dente da fresa removeu uma quantidade de material superior a f_z e o outro dente uma quantidade menor.

O histograma de F_{xy} mostra para esta condição dois picos distintos de concentração de pontos, cada um referente a um dente. O histograma de θ não apresenta diferença significativa pois a excentricidade alterou somente a intensidade da força produzida por cada dente durante a usinagem, mas o arco de corte foi pouco alterado.

Os gráficos apresentados na **figura 4.3** podem ser considerados como soma individual da contribuição da força produzida por cada dente durante o corte. Para uma condição de baixa excentricidade os dois dentes produziram a mesma força, cortando a mesma quantidade de material. Assim sendo, tem-se uma única coroa de pontos no gráfico radial e um único pico no histograma de F_{xy} . Para a condição de alta excentricidade cada dente cortou uma quantidade diferente de material, produzindo duas coroas de pontos e dois picos de densidade de ocorrências.

Todos estes dados apresentados são características do processo de fresamento de topo reto e podem ser utilizados para a detecção da excentricidade durante a usinagem. Sistemas de monitoramento através da medição das componentes F_x e F_y , em conjunto com programas de computador que calculam o espectro de frequências ou o histograma das forças durante a usinagem, poderão facilmente detectar este tipo de anomalia.

O gráfico radial e o histograma são boas ferramentas para a análise e detecção visual da excentricidade durante o estudo de uma determinada condição de fresamento. O espectro de frequências também é uma forte ferramenta, sendo necessário apenas o conhecimento prévio das frequências de rotação e de entrada de dentes.

Não foi possível com as condições de ensaio apresentadas mostrar o efeito da deflexão no fresamento de topo. A deflexão altera a espessura de cavaco no sentido axial e atenua os efeitos da excentricidade. Seu efeito não pôde ser evidenciado de forma tão clara como a excentricidade. Entende-se que o ensaio com baixa excentricidade poderia ter um efeito de excentricidade, que é inevitável, um pouco mais explícito caso não ocorresse a deflexão, e na condição de alta excentricidade os picos máximos e mínimos seriam mais acentuados.

4.1.2. Efeito da vibração auto-excitada nas forças

A vibração auto-excitada é bastante indesejada pois piora a qualidade superficial e dimensional da peça, desgasta excessivamente ou quebra a ferramenta e limita a produtividade do processo. A escolha adequada de parâmetros de corte pode evitar que ela ocorra [12-14, 45, 46, 50].

A **figura 4.4** e a **figura 4.5** são os resultados de dois ensaios realizados com e sem a ocorrência de vibração auto-excitada. Estes ensaios foram realizados com os mesmos parâmetros de corte do ensaio ED06 (ver **tabela 3.2**). Para esta condição tem-se uma fresa de topo reto produzida com aço-rápido com 5% de cobalto. A adição deste elemento tem como características o aumento da rigidez e a redução da capacidade de amortecimento, entre outras. Assim sendo, este tipo de fresa é mais susceptível à ocorrência de vibração auto-excitada, e através de uma montagem pouco adequada da fresa na pinça de fixação obteve-se um ensaio com este tipo de

problema. Para uma montagem mais cuidadosa elimina-se a ocorrência desta anomalia.

A **figura 4.4** apresenta os gráficos no domínio do tempo e no domínio da frequência da resultante F_{xy} para os dois ensaios. Os gráficos estão na mesma escala para possibilitar a comparação entre as condições dos experimentos, e o eixo das abscissas dos espectros de frequência não iniciam no zero para que a componente estática seja eliminada. O período de tempo do gráfico no domínio do tempo é equivalente a dois giros da fresa (oito entradas de dentes).

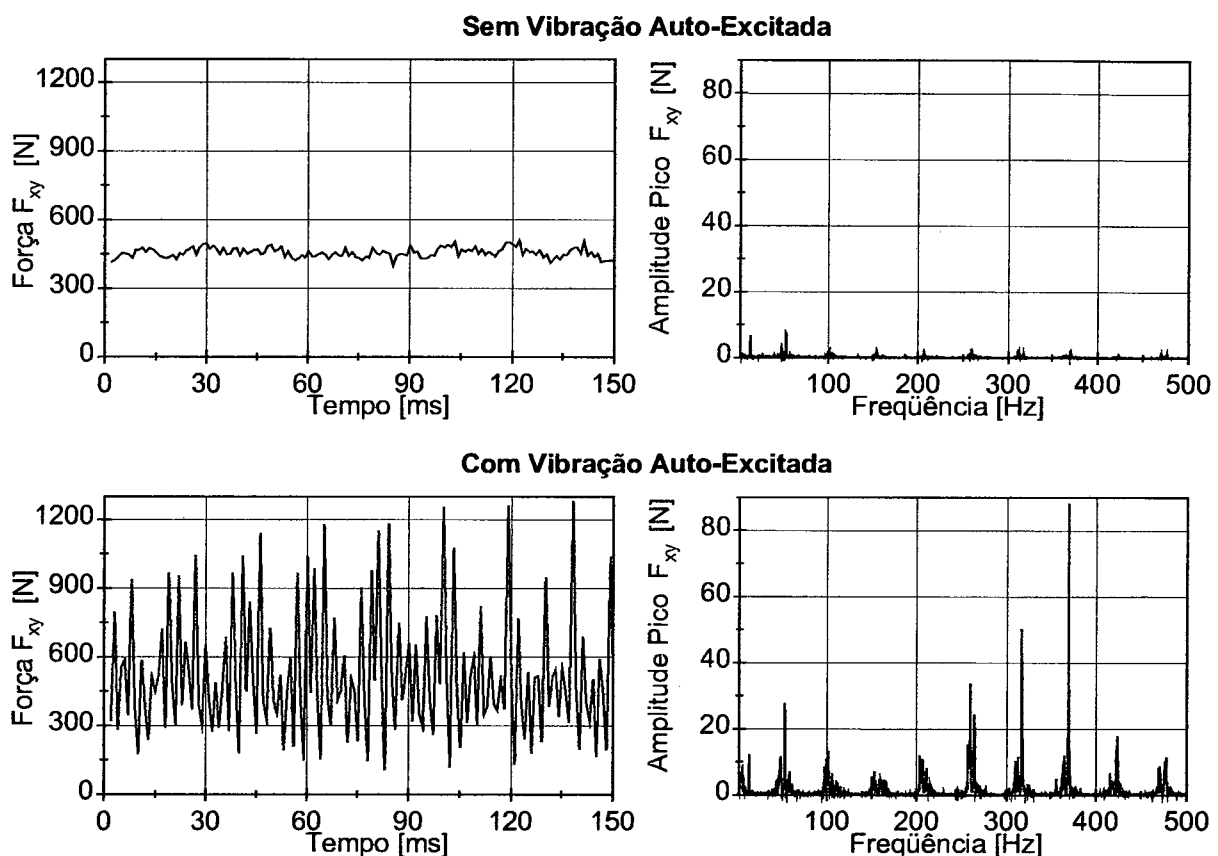


Figura 4.4 - Efeito em F_{xy} da vibração auto-excitada na usinagem com uma fresa de 4 dentes (sinal no tempo e espectro de frequências)

Fica evidente que os efeitos da vibração auto-excitada são desastrosos para a usinagem, com elevadas sobrecargas que danificam a peça e podem facilmente quebrar a ferramenta. Os picos de força atingiram valores de quase 3 vezes o esperado em condições normais de usinagem.

O espectro de freqüências do ensaio sob condição de vibração auto-excitada evidencia um pico principal na freqüência de 365 Hz. Esta é provavelmente uma das freqüências naturais do sistema e é a que foi excitada durante o processo de usinagem. Os demais picos são harmônicos desta, harmônicos das freqüências de rotação e entradas de dentes e outras freqüências que surgem neste complexo sistema.

Na **figura 4.5** observa-se que o valor médio da resultante e seu ângulo de direção não sofre alteração tão significativa, sendo que uma análise baseada somente nestes dados ficaria bastante prejudicada. Contudo nos gráficos radiais e histogramas nota-se claramente o maior espalhamento e amplitude da resultante.

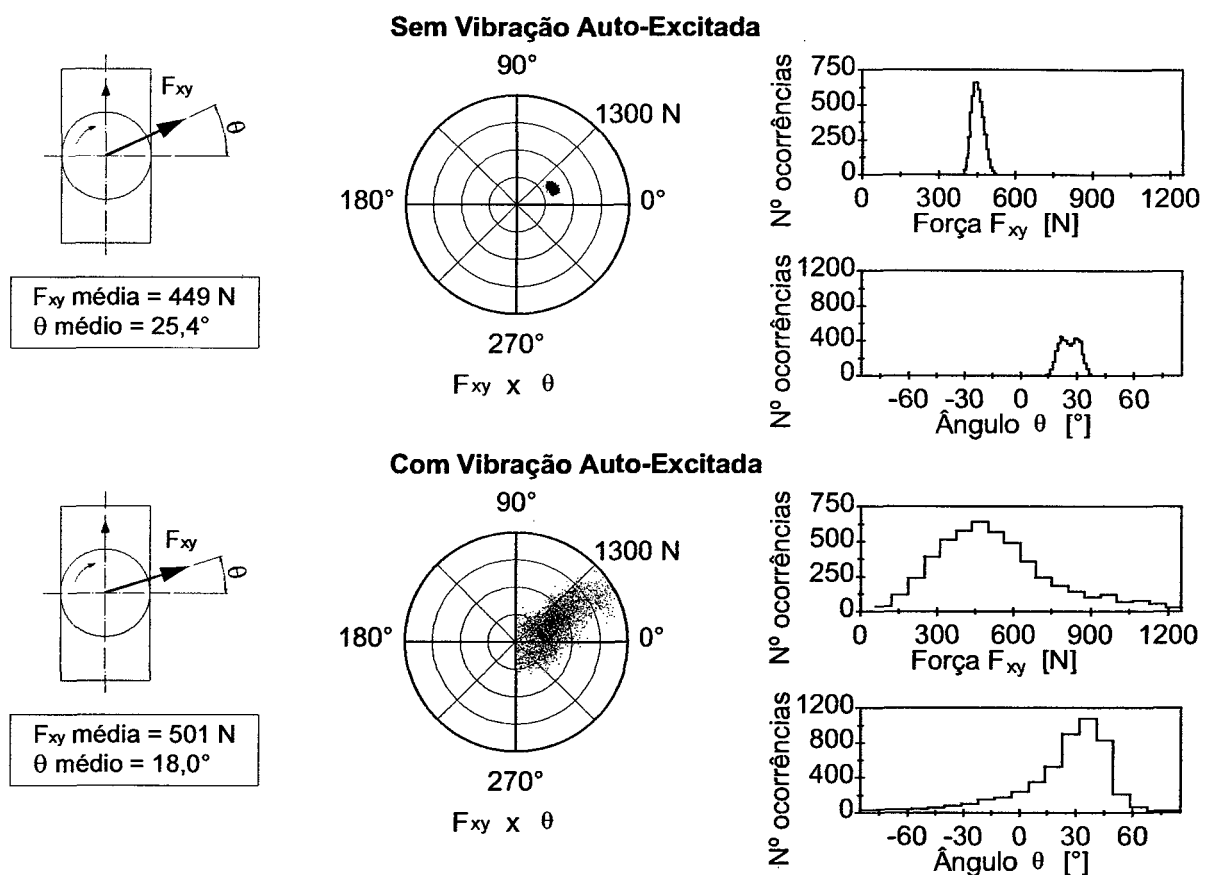


Figura 4.5 - Efeito em F_{xy} da vibração auto-excitada na usinagem com uma fresa de 4 dentes (valores médios, F_{xy} em função de θ e histogramas)

Sistemas de monitoramento baseados na medição de forças ou de vibrações podem facilmente detectar a ocorrência da vibração auto-excitada. Seu efeito é tão

evidente que qualquer operador pode notar os fortes ruídos que surgem num processo sob tais condições. Entretanto a ocorrência desta anomalia deve ser evitada desde o início do processo de usinagem. Ferramentas nobres, de custo elevado, podem ser rapidamente danificadas caso o processo seja executado em tais condições.

Os trabalhos desenvolvidos por muitos autores visam detectar previamente a ocorrência de vibração auto-excitada ou suprimir seu aparecimento durante o processo de fresamento (ver item 2.4) [13, 14, 24, 45, 46, 48-61].

4.1.3. Influência dos parâmetros de corte (d , z , a_e) nos ensaios de força

A **figura 4.6** até a **figura 4.14** representam os resultados dos ensaios de força realizados com o objetivo de se avaliar a influência dos parâmetros d , z e a_e na resultante de forças F_{xy} . Estes ensaios foram executados de acordo com os parâmetros apresentados no item 3.1.1 (ver **tabela 3.1**).

Tem-se em cada uma destas nove figuras um quadro com a identificação do ensaio e os parâmetros de corte mais importantes. O desenho abaixo deste quadro representa o sentido de rotação da fresa, sua direção de avanço, a origem do ângulo de direção θ e a profundidade de corte radial a_e . O vetor F_{xy} desse desenho está posicionado de acordo com o ângulo θ médio e seu sentido indica a força aplicada na peça. A figura apresenta ainda um gráfico de F_{xy} no domínio do tempo, com eixo das abscissas equivalente a dois giros da fresa, e um no domínio das frequências, com o eixo das abscissas não iniciando no zero para se eliminar o efeito da componente estática de F_{xy} . Tem-se também o gráfico radial de F_{xy} em função de θ e os histogramas de F_{xy} e θ . A construção destas figuras segue o mesmo princípio apresentado no item 4.1.1 para as análises de excentricidade.

Os gráficos das nove figuras foram construídos com as escalas melhor apropriadas para a visualização individual de cada um. Assim, quando é feita a análise de resultados para diversas condições deve-se ter grande atenção pois foram feitas comparações entre gráficos com diferentes escalas. Esse alerta é importante para se evitar erros na avaliação dos experimentos decorrentes de uma interpretação visual equivocada dos resultados.

Foram executados 9 ensaios para cada uma das 9 condições de parâmetros de corte, totalizando 81 ensaios (ver item 3.1.1). Para cada grupo de 9 ensaios nas

mesmas condições construiu-se uma figura semelhante às apresentadas nesse item. Considerando-se que todas apresentavam as mesmas tendências, exceto as que tiveram algum problema durante a execução, decidiu-se apresentar somente um resultado de ensaio para cada condição. No anexo 7.3 estão os valores médios e o desvio-padrão para F_{xy} e θ dos 81 ensaios.

A **figura 4.6** referente ao ensaio EF01 mostra que este experimento foi executado sob condição de forte excentricidade. Isto é atribuído à baixa qualidade da pinça utilizada. Esse problema ocorreu também nos ensaios EF03, EF06, EF07 e com menor intensidade nos demais ensaios. Apesar disso, as análises aqui efetuadas não foram prejudicadas pois consideram sempre a intensidade média das forças e o espalhamento de θ . Também através do estudo do item 4.1.1 pode-se inferir como seria o resultado dos ensaios sem a excentricidade.

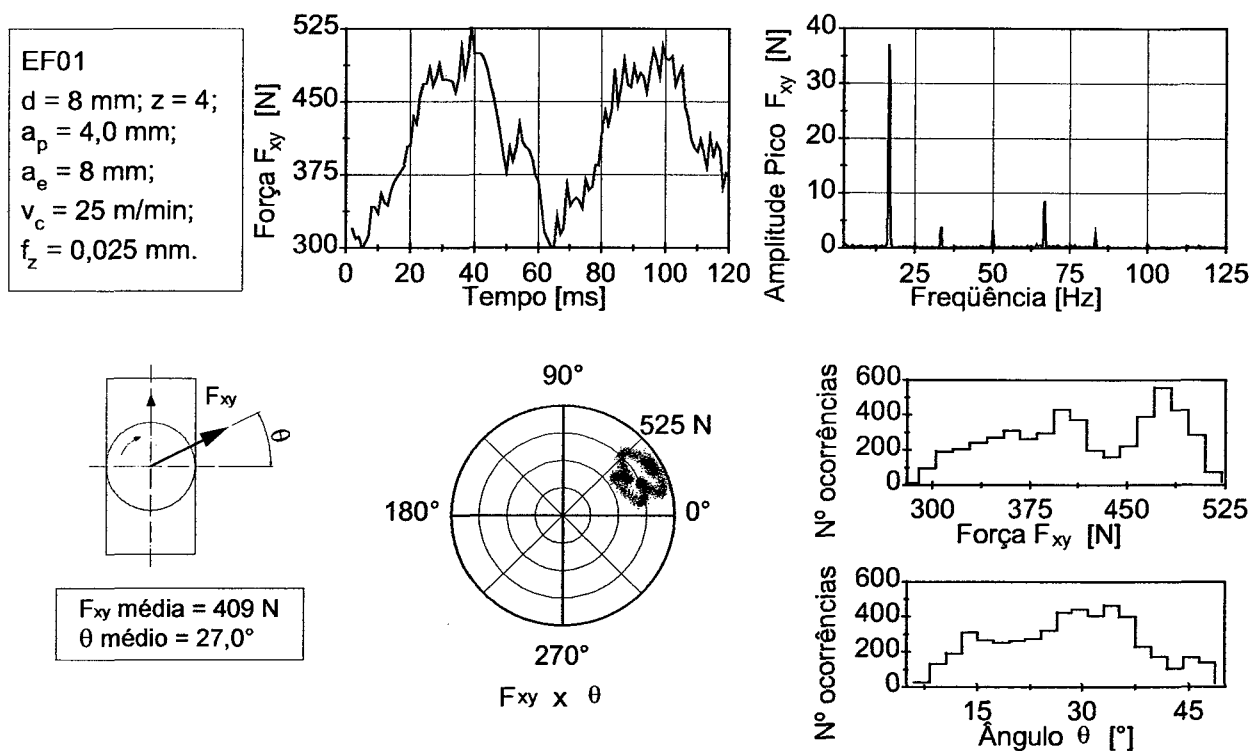


Figura 4.6 - Resultado do ensaio de força EF01 (valores médios, sinal no tempo, espectro de frequências, F_{xy} em função de θ e histogramas)

A análise da **figura 4.7** e da **figura 4.8** permite comparar o efeito do número de dentes da fresa na força resultante. A F_{xy} média foi obviamente inferior no ensaio com 2 dentes e o ângulo θ médio foi superior. Entretanto é na variação da intensidade de F_{xy}

e do ângulo θ que se observam as maiores diferenças. No ensaio EF02, **figura 4.7**, tem-se uma fresa de 2 dentes, sendo que a cada instante tem-se somente 1 no corte. Na **figura 4.8**, ensaio EF03, tem-se sempre 2 dentes, de uma fresa de 4, atuando no corte e reduzindo desta forma as variações de intensidade e posição angular da resultante. A análise dos histogramas evidencia distribuições bastante distintas entre os dois ensaios. Torna-se clara, portanto, a necessidade de apresentação das distribuições e não somente do valor médio e desvio-padrão.

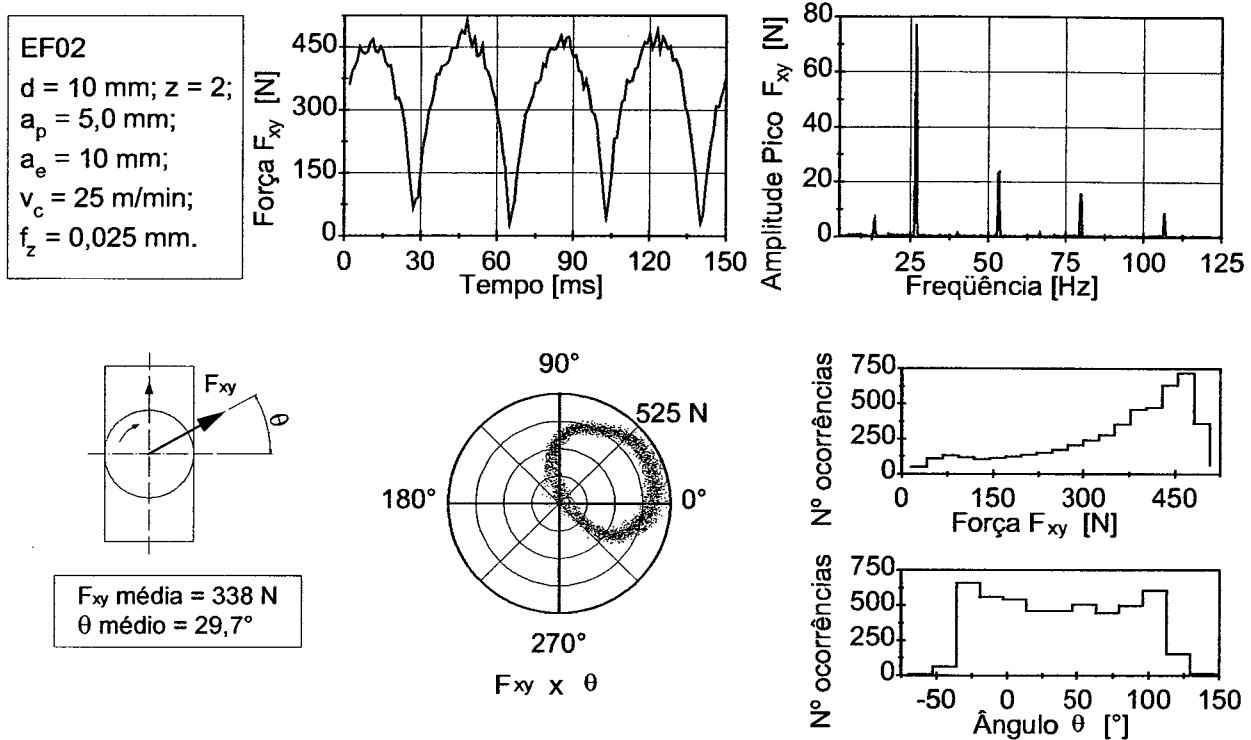


Figura 4.7 - Resultado do ensaio de força EF02 (valores médios, sinal no tempo, espectro de freqüências, F_{xy} em função de θ e histogramas)

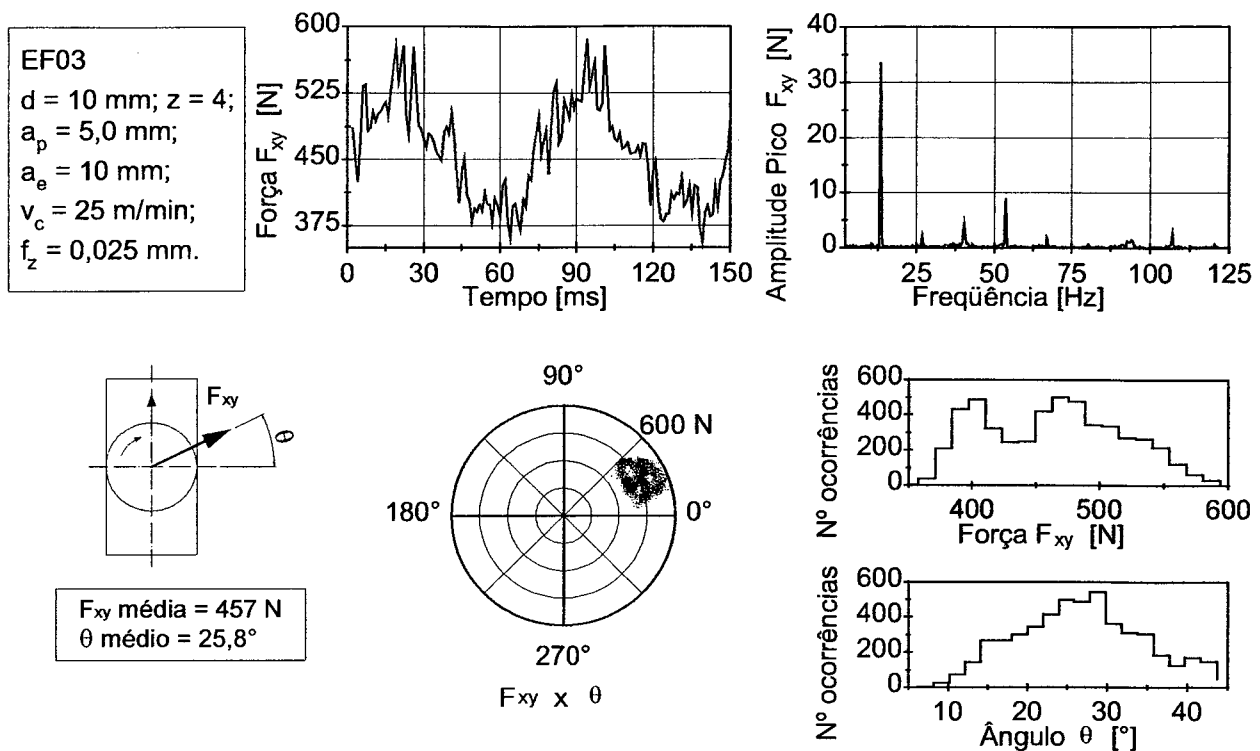


Figura 4.8 - Resultado do ensaio de força EF03 (valores médios, sinal no tempo, espectro de frequências, F_{xy} em função de θ e histogramas)

Através da comparação entre a **figura 4.6**, a **figura 4.8** e a **figura 4.9** pode-se avaliar o efeito do diâmetro da fresa na resultante F_{xy} . Como era esperado, a resultante média cresceu com aumento do diâmetro da fresa. As diferenças de ângulo θ médio e seu espalhamento não são significativos, podendo-se considerar que eles não sofrem influência do diâmetro. A pequena variação no espalhamento de F_{xy} pode ser atribuída à condição de excentricidade presente principalmente nos ensaios EF01 e EF03, pois alguns dentes cortaram menos e alguns cortaram mais que o valor de f_z estipulado.

Partindo-se do ensaio EF05 até o EF09 reduziu-se gradativamente o valor da profundidade de corte radial a_e . No ensaio EF 05, apresentado na **figura 4.10**, tem-se a_e igual a 75% do diâmetro da fresa, com o fresamento combinado iniciando discordante e terminando concordante. Esta condição é recomendada para fresamento frontal com fresa de faceamento. Nota-se neste caso que o ângulo da resultante assumiu valores em torno do zero. Sendo assim, a força de avanço média tendeu a zero.

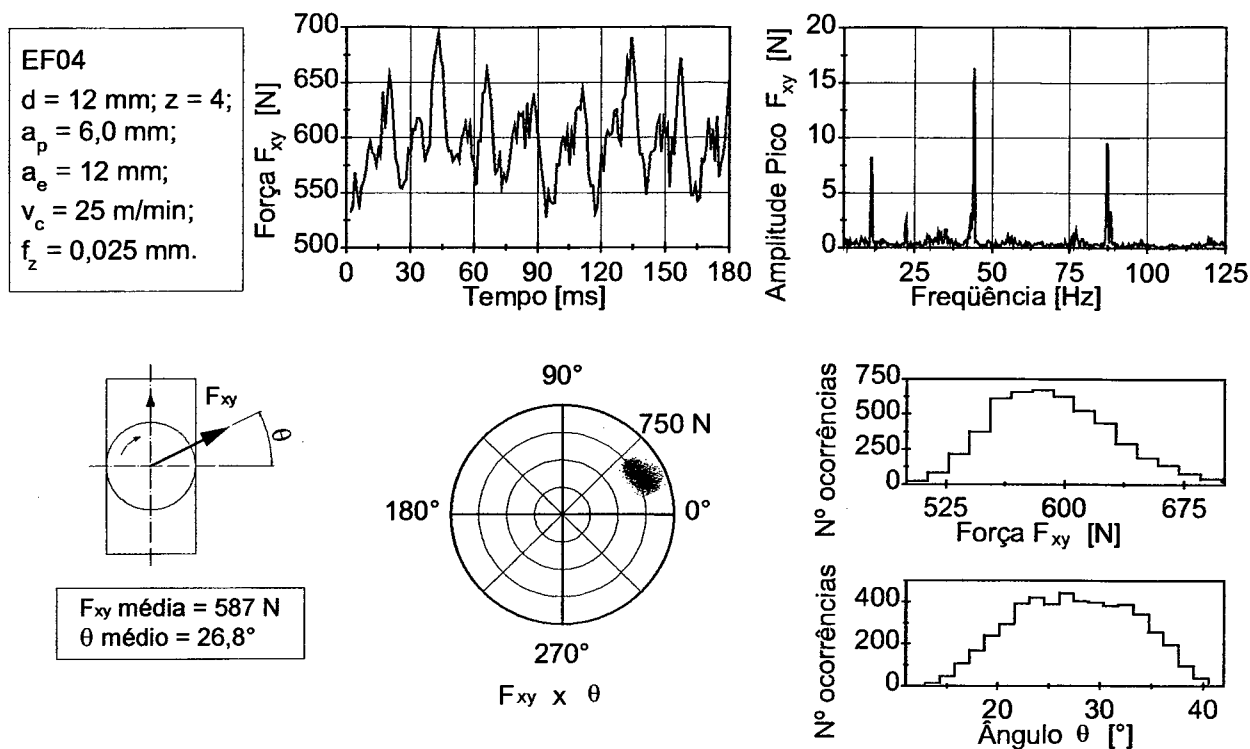


Figura 4.9 - Resultado do ensaio de força EF04 (valores médios, sinal no tempo, espectro de freqüências, F_{xy} em função de θ e histogramas)

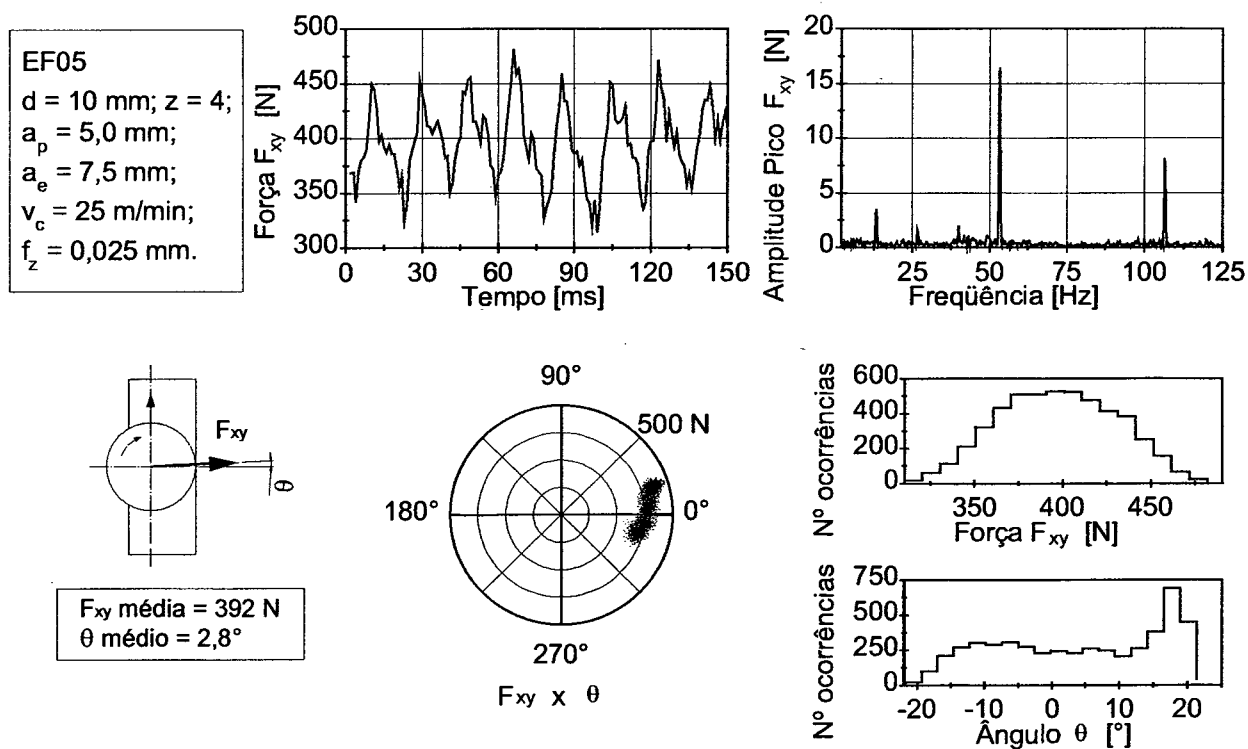


Figura 4.10 - Resultado do ensaio de força EF05 (valores médios, sinal no tempo, espectro de freqüências, F_{xy} em função de θ e histogramas)

Nos ensaios EF06 e EF07 (figura 4.11 e figura 4.12) tem-se $a_e = 0,50d$ e fresamento puramente concordante e discordante, respectivamente. A força de avanço na condição concordante EF06 tendeu a ser negativa, razão pela qual não é recomendado seu uso em máquinas-ferramentas que possuam folgas no fuso da mesa. A potência de avanço nesse caso fica reduzida.

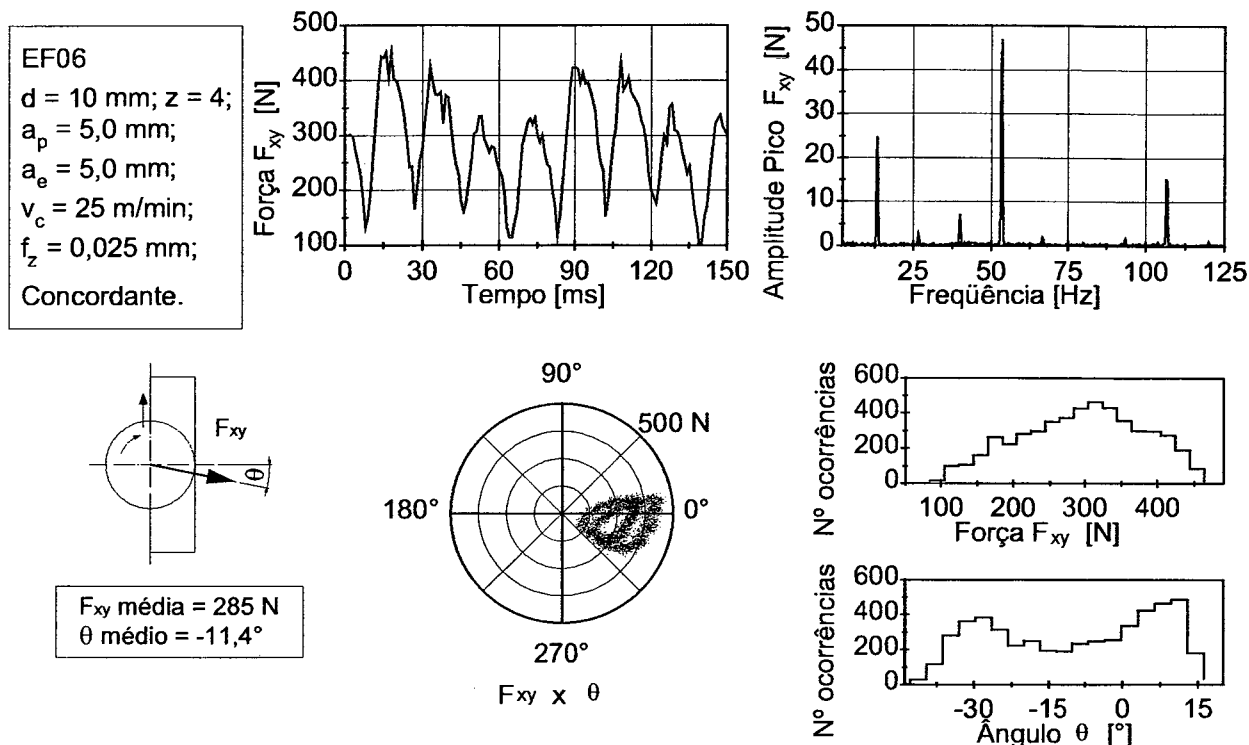


Figura 4.11 - Resultado do ensaio de força EF06 (valores médios, sinal no tempo, espectro de frequências, F_{xy} em função de θ e histogramas)

A condição de usinagem puramente discordante do ensaio EF07 (figura 4.12), apresentou a força de avanço maior do que para o caso com fresamento concordante. Entretanto, a redução da força perpendicular ao avanço pode ser útil na usinagem de paredes finas, por exemplo. Além disso, nesta situação o fuso da mesa da máquina-ferramenta é mantido pressionado contra a porca, possibilitando a usinagem em condições de existência folga entre fuso e porca.

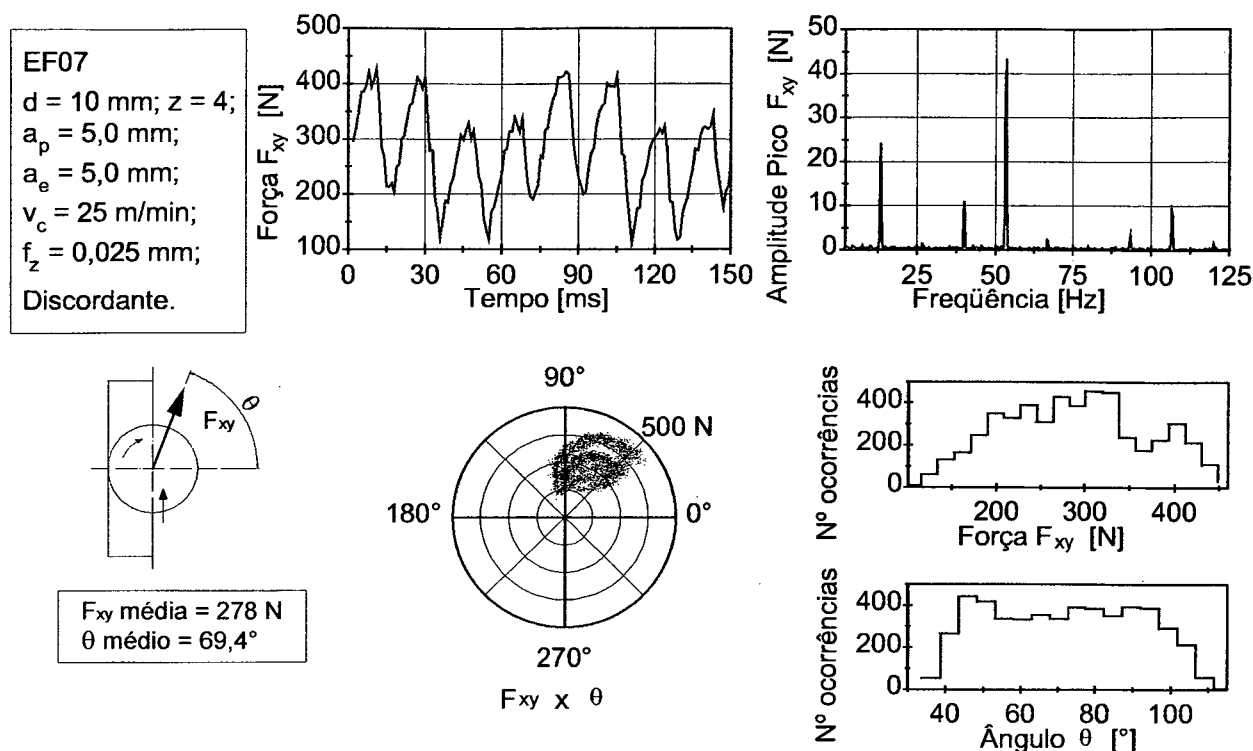


Figura 4.12 - Resultado do ensaio de força EF07 (valores médios, sinal no tempo, espectro de frequências, F_{xy} em função de θ e histogramas)

Os ensaios EF08 e EF09 (**figura 4.13** e **figura 4.14**) também foram executados com fresamento concordante e discordante respectivamente. Nesses casos tem-se $a_e = 0,05d$, podendo, portanto, ser considerada uma condição de acabamento. Os resultados foram semelhantes aos dois anteriores, sendo que agora tem-se a força de avanço puramente negativa para EF08.

Retornando-se à questão da quantidade média de dentes que atua simultaneamente no corte, constatou-se que esse número tem influência decisiva nas variações da intensidade e do ângulo de posição da força resultante. Nos ensaios EF03 e EF05 a EF09 tem-se a mesma fresa trabalhando com profundidades de corte radiais (a_e) diferentes. No ensaio EF03 (**figura 4.8**) tem-se em média 2 dentes atuando simultaneamente; no ensaio EF05 (**figura 4.10**) tem-se 1,33 dentes; nos ensaios EF06 e EF07 (**figura 4.11** e **figura 4.12**), tem-se 1 dente; nos ensaios EF08 e EF09 (**figura 4.13** e **figura 4.14**), tem-se 0,29 dente.

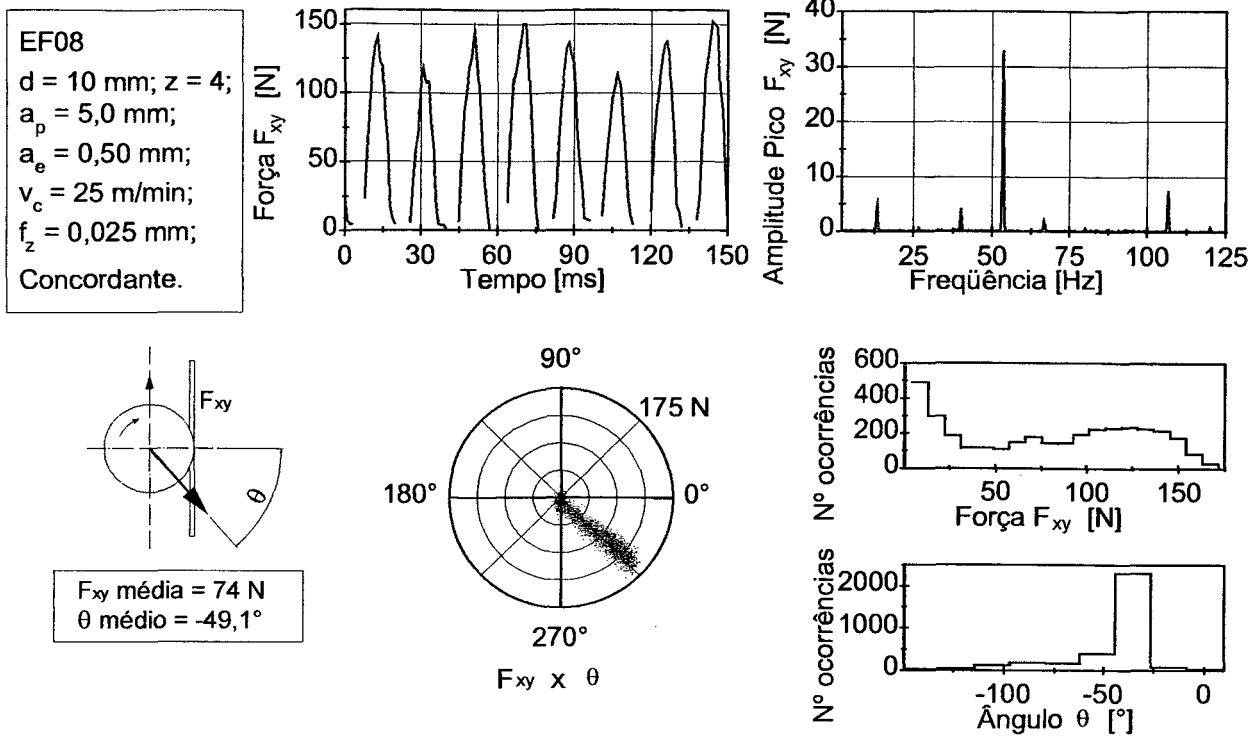


Figura 4.13 - Resultado do ensaio de força EF08 (valores médios, sinal no tempo, espectro de freqüências, F_{xy} em função de θ e histogramas)

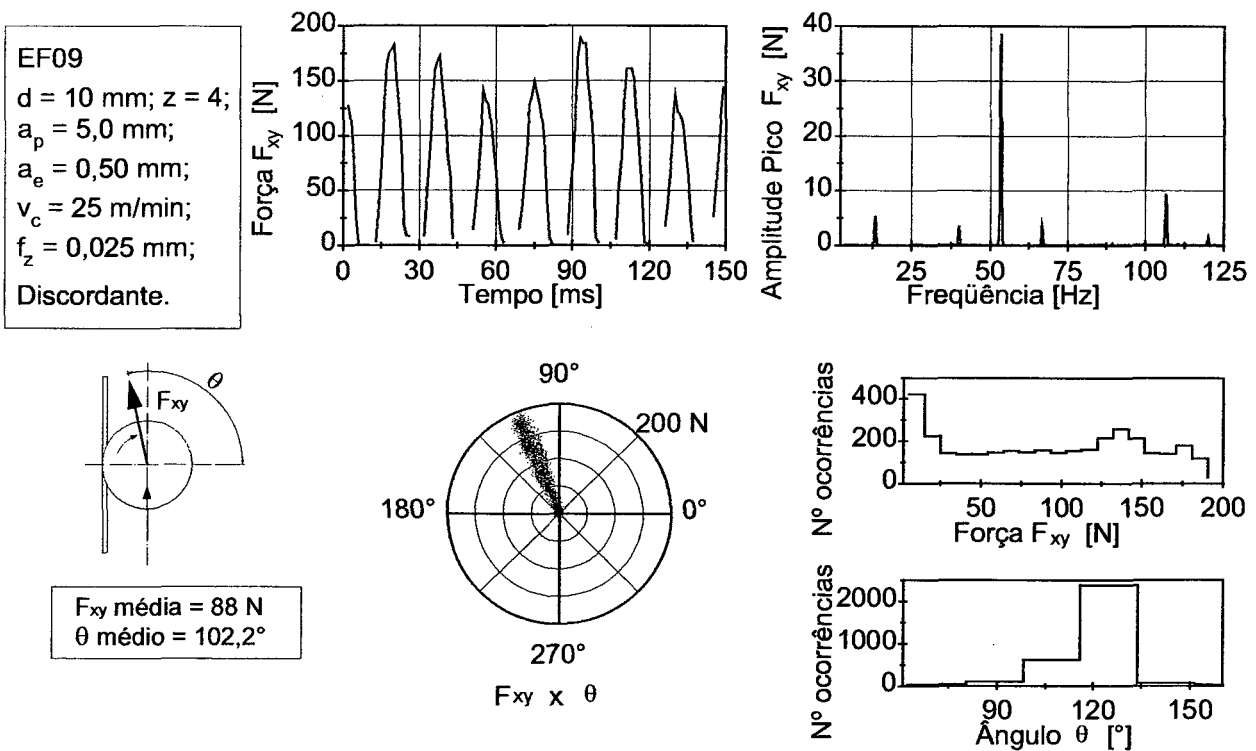


Figura 4.14 - Resultado do ensaio de força EF09 (valores médios, sinal no tempo, espectro de freqüências, F_{xy} em função de θ e histogramas)

Observou-se que as variações (o espalhamento) da intensidade e posição da força resultante cresceu com a redução do número médio de dentes atuantes. A diferença entre os ensaios EF06 e EF07, e os ensaios EF08 e EF09, que possuem o mesmo valor médio dentes atuantes simultaneamente, pode ser atribuída à maior parcela de deformação elástica e plástica que ocorre no início do fresamento discordante em relação ao concordante. Também pode-se atribuir tal discrepância ao maior tempo que o dente passa em contato com a peça no fresamento discordante, apesar desta diferença de tempo ser em média de somente 3% [1, 2, 38, 40].

A observação do parágrafo anterior é válida quando se compara ensaios onde a atuação do dente da fresa se dá num mesmo comprimento de arco. As diferenças entre as variações do ensaio EF02 (**figura 4.7**) e dos ensaios EF06 e EF07 (**figura 4.11** e **figura 4.12**), onde tem-se em média 1 dente atuando, estão associadas ao fato de no ensaio EF02 o dente atua num arco de 180° e nos ensaios EF06 e EF07 somente num arco de 90°. Nos ensaios EF08 e EF09 (**figura 4.13** e **figura 4.14**) tem-se 0,29 dente atuando a cada instante, mas o arco de atuação é somente de aproximadamente 26°, tornando o espalhamento angular reduzido.

4.1.4. Resultados dos ensaios de desgaste

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos experimentos de desgaste identificados por ED. Estes ensaios foram executados de acordo com os parâmetros apresentados no item 3.1.2 (ver **tabela 3.2**). A **figura 4.15** mostra o comportamento da força resultante F_{xy} média em função do comprimento linear de rasgo usinado para as seis condições de ensaio.

Cada uma das condições de ensaio foi repetida 3 vezes. No gráfico da **figura 4.15**, a coordenada y de cada ponto representa o valor médio do sinal da resultante F_{xy} e a coordenada x o comprimento de usinagem acumulado até a interrupção para medição de força. Em cada condição indicaram-se todos os pontos referentes a todas repetições realizadas, traçando-se então uma curva polinomial de grau 2 que melhor se ajusta ao conjunto de pontos.

Como foi destacado no item 3.1.2, durante a execução dos ensaios foram efetuadas paradas para preparação do corpo de prova e tomada de imagens dos gumes da fresa. Cada uma destas paradas permite que a fresa se resfrie, prolongando

desta forma sua vida. Sendo assim, os comprimentos lineares de rasgo usinado seriam provavelmente inferiores caso o ensaio fosse executado de forma ininterrupta. A redução da vida é, obviamente, tanto maior quanto maior for a temperatura de trabalho da fresa.

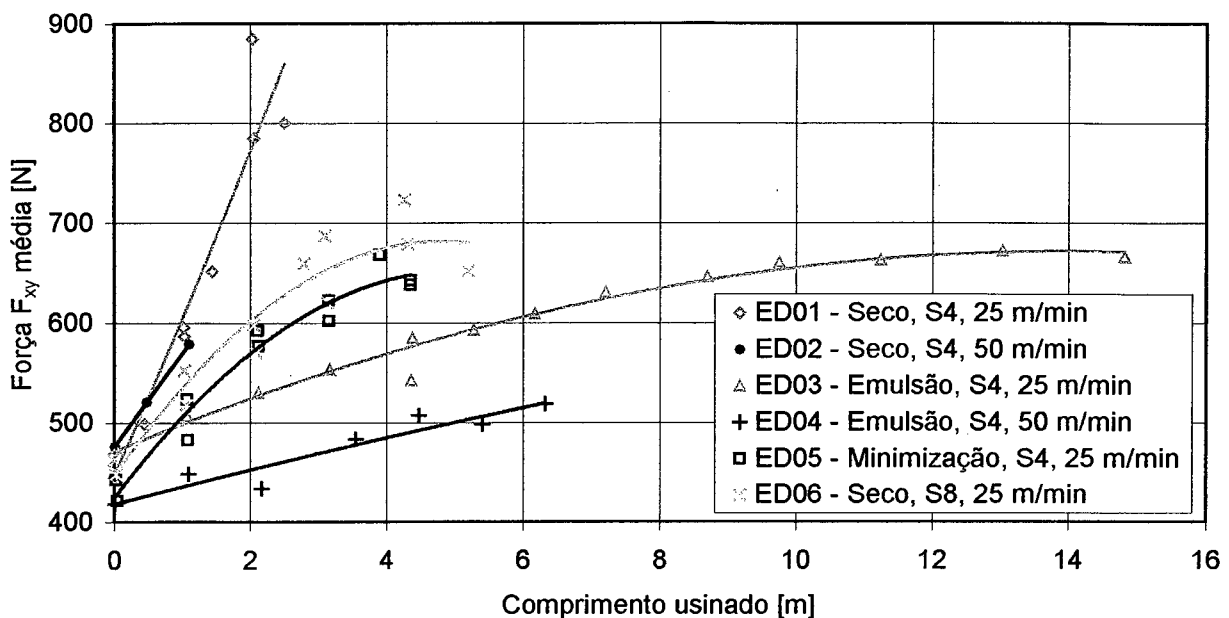


Figura 4.15 - Resultados dos ensaios de desgaste ED (F_{xy} média em função do comprimento linear do rasgo usinado)

Os resultados obtidos e apresentados na **figura 4.15** podem ser relacionados ao fato do material de todas as fresas utilizadas ser o aço-rápido. Este material é bastante sensível à temperatura na interface entre a ferramenta e a peça. Segundo o exemplo dado por FERRARESI [24], a vida de uma ferramenta de aço-rápido aumentou em 6 vezes com a redução em 50° C da temperatura de usinagem.

A comparação do ensaio ED01 com o ensaio ED03 indica que a utilização de 180 l/h de emulsão reduziu a temperatura de trabalho da fresa, tendo como efeito principal a preservação das condições do gume. O ensaio ED01 foi interrompido pouco antes do colapso total da ferramenta com aproximadamente 2,5 m de rasgo usinado, e nota-se que a força F_{xy} média praticamente dobrou de intensidade ao longo do ensaio. Já o ensaio ED03 foi interrompido antes de a fresa dar sinais de que estaria próxima do colapso, com um comprimento de rasgo usinado de aproximadamente 15 m. O

aumento da intensidade de F_{xy} média ficou em torno de 40% ao longo do experimento, consideravelmente menor que no ensaio ED01.

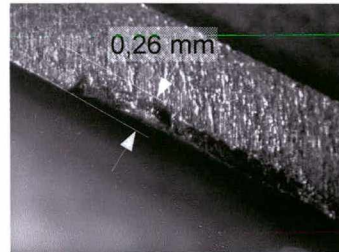
A **figura 4.16** mostra as imagens finais do flanco principal de dentes de ferramentas que melhor representavam as condições das fresas ao término dos experimentos.

Ensaio: ED01

Sem fluido corte: Seco

Material fresa: S4

v_c : 25 m/min

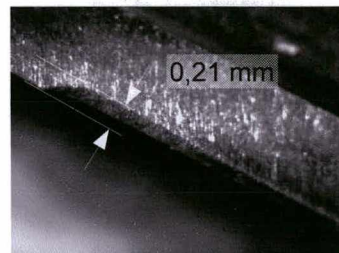


Ensaio: ED03

Fluido corte: Emulsão

Material fresa: S4

v_c : 25 m/min

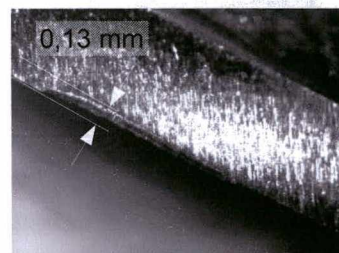


Ensaio: ED04

Fluido corte: Emulsão

Material fresa: S4

v_c : 50 m/min

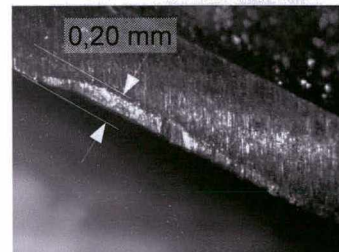


Ensaio: ED05

Fluido corte: Minimização

Material fresa: S4

v_c : 25 m/min



Ensaio: ED06

Sem fluido corte: Seco

Material fresa: S8

v_c : 25 m/min

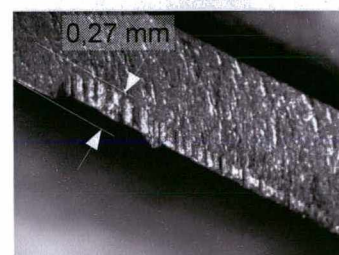


Figura 4.16 - Imagens finais do flanco principal de ferramentas utilizadas nos ensaios de desgaste ED

O valor de desgaste indicado na **figura 4.16** é a média de todos os gumes de todas as fresas utilizadas para determinada condição. Os valores médios e o desvio-padrão para cada condição estão no anexo 7.4. No ensaio ED02 o colapso final da fresa ocorreu de forma muito rápida, impossibilitando a parada antes que isso ocorresse e não permitindo a medição da condição de desgaste antes da quebra.

A comparação da imagem da fresa do ensaio ED01 com a do ensaio ED03 permite a conclusão de que o uso do fluido de corte reduziu a temperatura de usinagem, preservando o gume de um desgaste excessivo. O desgaste médio do ensaio sem fluido atingiu 0,26 mm com a ferramenta próxima do colapso. No ensaio com emulsão o desgaste médio foi de 0,21 mm com o ensaio interrompido antes da fresa apresentar sinais de proximidade do colapso (**figura 4.16**).

A análise visual das fresas fornece uma informação qualitativa da temperatura de usinagem. As fresas do ensaio ED01 se tornaram escurecidas, com sinais evidentes de sobreaquecimento do aço-rápido. No ensaio ED03 as fresas não apresentaram nenhuma alteração perceptível de cor.

Apesar do conhecido efeito negativo dos choques térmicos que são causados pela aplicação de fluido de corte no fresamento [1, 3, 6, 24, 62], para os ensaios realizados neste trabalho não foi verificado tal inconveniente. Atribui-se isso principalmente ao fato do uso de fresas de aço-rápido com elevada tenacidade em conjunto com a aplicação copiosa de fluido de corte. O ensaio com fresa de aço-rápido com 5% de cobalto (S8), de menor tenacidade, foi realizado somente a seco.

As ferramentas utilizadas nestes ensaios têm um custo bastante reduzido em comparação com os custos da hora de trabalho das máquinas-ferramentas normais. Desta forma, não faz sentido trabalhar com este tipo de fresa com condições de corte que levem a vidas de algumas horas. A usinagem mais econômica é obtida com aumento da taxa de remoção, através de maiores velocidades de corte, com conseqüente redução de vida. Com este objetivo foram realizados os ensaios ED02 e ED04, com velocidade de corte 2 vezes maior que nos demais ensaios.

A velocidade de corte de 50 m/min foi totalmente inadequada para as condições do ensaio ED02. O colapso da ferramenta se deu de forma muito rápida, impedindo qualquer análise confiável de resultado.

Comumente, o colapso final de uma ferramenta se dá por quebra ou por deformações plásticas severas. Próximo do final da vida, o gume está totalmente sem

condições adequadas de corte, elevando as forças e a temperatura de trabalho. Se a fixação da fresa não é totalmente firme, a elevação da força na direção do eixo de rotação da fresa (F_z) sobrepõe a capacidade de fixação desta, aumentando a profundidade de corte axial (a_p) até a ruptura da ferramenta por esforço excessivo. Caso a fixação resista a esse aumento de esforço axial, o aumento da temperatura de usinagem reduz drasticamente a resistência da fresa, levando a deformações plásticas severas dos gumes. Qualquer uma das condições deve ser evitada sob pena de danificar a peça e a máquina-ferramenta, além da inutilização da fresa, não permitindo mais sua reafiação.

No ensaio ED02 o aumento da força F_z não foi suficiente para remoção da fresa de sua pinça de fixação. Entretanto a velocidade de corte utilizada elevou demais a temperatura de usinagem, levando à completa deformação plástica dos gumes da fresa. O colapso total foi ainda retardado por uma parada para preparação do corpo de prova, propiciando o resfriamento da ferramenta.

O ensaio ED04, realizado com $v_c = 50$ m/min e emulsão, apresentou comportamento semelhante ao ensaio ED03 ($v_c = 25$ m/min e emulsão). Supõe-se que o aumento da velocidade de corte reduziu os esforços mas não aumentou de forma perceptível a temperatura de trabalho (**figura 4.15**). O ensaio foi interrompido muito antes do final da vida de fresa, sendo portanto esta a razão do menor desgaste médio apresentado. Entretanto, pode-se inferir que os desgastes nos ensaios ED03 e ED04 são equivalentes (**figura 4.16**). Decidiu-se pela interrupção do ensaio ED04 antes do final da vida da fresa para economia de tempo e material, sendo que no momento da interrupção a tendência do resultado a ser obtido já podia ser deduzida.

Na condição do ensaio ED04 tem-se uma produtividade 2 vezes maior que no ensaio ED03. Contudo, para a usinagem com emulsão, considera-se que as velocidades de corte utilizadas ainda são baixas. Deve-se aumentar ainda mais v_c até que a temperatura de usinagem proporcione uma vida da fresa em torno de 15 min, tendo-se nessa condição uma usinagem muito mais econômica.

Os últimos dois ensaios de desgaste foram realizados com fresa sem cobalto e minimização de fluido de corte (ED05) e com fresa com 5% de cobalto sem fluido de corte (ED06). O comportamento da resultante média F_{xy} em função do comprimento linear de rasgo usinado foram semelhante para ambos os ensaios (**figura 4.15**), existindo uma tendência do ensaio ED05 apresentar F_{xy} menor para um mesmo

comprimento usinado. O menor valor de F_{xy} para ED05 pode ser atribuído à melhor lubrificação da região de corte feita pela utilização da minimização de fluido de corte. No entanto, uma exata quantificação de quanto o ensaio ED05 é diferente de ED06 exige a aplicação de algumas técnicas estatísticas mais complexas e tal análise foge dos objetivos do trabalho, não acrescentando informação de grande relevância.

Comparando-se os ensaios ED05 e ED06 com o ensaio ED01 (**figura 4.15**) observou-se que a vida das fresas praticamente dobrou e F_{xy} final reduziu em torno de 25%. Atribuiu-se isso à questão discutida anteriormente de preservação do gume de corte.

No ensaio ED05 o uso da minimização melhorou a lubrificação na região de corte e aumentou a troca de calor através do jato de ar comprimido. Tem-se assim um gume trabalhando em uma temperatura um pouco inferior, resistindo melhor ao desgaste, com sua geometria preservada e reduzindo a força de corte.

Não existiu no ensaio ED06 nenhuma fonte de redução de temperatura de trabalho. Contudo, o efeito de preservação do gume foi obtido pela utilização de uma fresa com material mais nobre (aço-rápido com 5% de cobalto). Esse material mantém sua dureza em temperaturas superiores à do aço-rápido sem cobalto, permitindo que o gume resista mais tempo às condições de usinagem. O cobalto, entretanto, torna a fresa mais frágil e estas ferramentas apresentaram desgaste diferente das demais utilizadas nesta parte do trabalho. Na **figura 4.16** nota-se um desgaste acentuado com marcas paralelas na direção da velocidade de corte, que ocorreu provavelmente em função da combinação do corte intermitente com uma fresa de tenacidade mais baixa.

Os fatores que contribuíram para a preservação dos gumes nos ensaios ED05 e ED06 melhoraram o desempenho das ferramentas em relação à usinagem a seco com fresa sem cobalto (ED01), mas foram bastante inferiores ao efeito de redução de temperatura obtido pela utilização abundante de emulsão.

Conclui-se este item com a observação de que não foi possível fazer análises de espectro de freqüências e histogramas ao longo da vida da fresa como nos itens anteriores. Nas paradas do ensaio para aquisição de imagens da fresa, essa era removida de sua fixação e posteriormente refixada. Este processo de desmontagem altera consideravelmente as características de excentricidade da fresa, que têm influência direta nos espectros e histogramas, conforme visto no início deste capítulo. Além disso, observou-se que o desgaste final de cada fresa era semelhante nos seus 4

dentes. Isto confirma que a excentricidade foi alterada durante o ensaio, pois espera-se que em uma fresa atuando excêntrica um gume tenha um desgaste mais acentuado e o diametralmente oposto um desgaste menos acentuado. A remoção e posterior montagem da fresa de forma aleatória na fixação altera a condição de excentricidade e, conseqüentemente, o dente sobrecarregado. O resultado deste processo ao longo do ensaio foi a equivalência dos desgastes entre os dentes da fresa.

4.2. Ensaio de Fresamento de Topo Esférico com Altas Velocidades de Corte

A parte final das análises dos resultados refere-se aos ensaios com fresas de topo esférico e altas velocidades de corte identificados por EV. Estes experimentos foram executados de acordo com os parâmetros apresentados no item 3.2 (ver **tabela 3.3**).

A apresentação desses resultados é diferente dos demais já apresentadas em função das características próprias deste tipo de ensaio. Como foi discutido no item 2.5, o sistema de medição não é capaz de adquirir o sinal de força em altas freqüências sem a introdução de distorções que prejudicam os resultados.

A freqüência de entrada de dentes nestes ensaios foi superior a 1 kHz. Além disso, a freqüência natural do dinamômetro, especificada pelo fabricante em aproximadamente 1 kHz (ver item 7.1.3), foi bastante reduzida pelas montagens que foram necessárias para obtenção da inclinação da fresa em relação à superfície a ser usinada (ver **figura 3.6**). Por isso, qualquer análise de resultado nesta faixa de freqüência ou acima dela estará totalmente comprometida e não pode ser efetuada.

Uma solução simples para este problema é a utilização de filtros para eliminar a faixa de freqüência a partir do qual não se pode mais garantir o resultado. O sinal que resultar deste processo pode então ser analisado com segurança [27, 33, 36, 91, 92].

No caso dos experimentos realizados neste trabalho o resultado do processo de filtragem do sinal é somente sua componente estática. Por se tratar de um processo de alta freqüência, todas componentes do sinal com freqüência superior a 250 Hz têm que ser eliminadas para se garantir a confiabilidade do resultado, restando somente a parte estática do sinal medido. Sendo assim, todas as análises dos experimentos com altas velocidades de corte foram baseadas na componente estática do sinal, que para este caso é igual ao valor médio do sinal.

A **figura 4.17** até a **figura 4.22** apresentam os resultados dos ensaios com altas velocidades de corte. Cada uma destas figuras possui um quadro com os parâmetros de corte mais importantes utilizados.

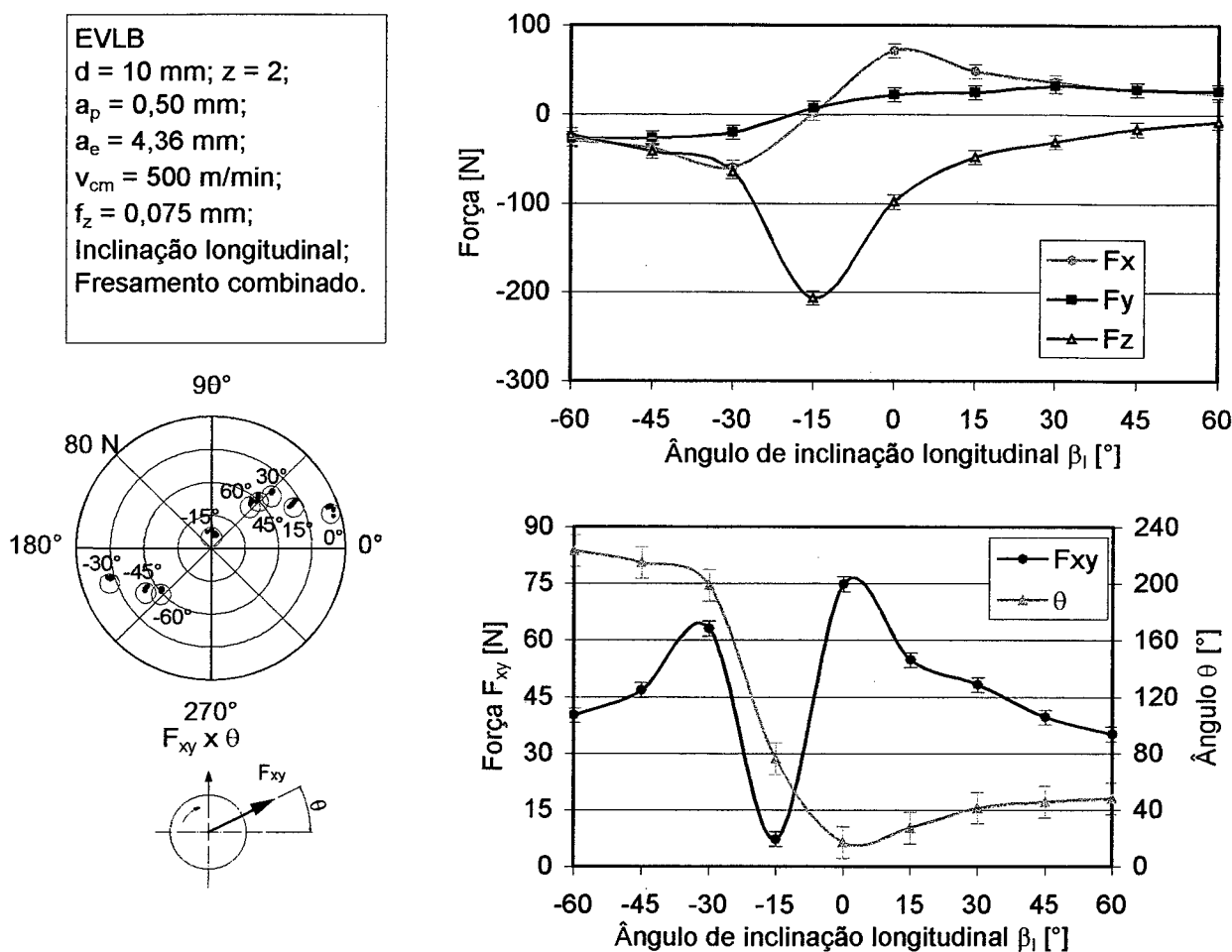


Figura 4.17 - Resultado do ensaio com altas velocidades de corte EVLB (F_x , F_y , F_z , F_{xy} e θ em função da inclinação da fresa e F_{xy} em função de θ)

O experimentos foram divididos de acordo com a inclinação da fresa em relação à superfície usinada. Para facilitar o entendimento das análises recomenda-se a observação da **figura 3.9** que exemplifica as denominações das condições de avanço e inclinação da fresa.

Construíram-se três gráficos com os resultados obtidos. O primeiro é o valor da componente estática de F_x , F_y e F_z em função do ângulo de inclinação da fresa em relação à superfície de usinagem. O segundo mostra o valor da resultante de forças no plano xy (F_{xy}) e seu ângulo de direção (θ), calculados a partir dos valores das

componentes estáticas de F_x e F_y , também em função da inclinação da fresa. Nestes dois gráficos estão indicados os valores médios referentes a nove repetições do mesmo ensaio, além do intervalo de confiança da média, calculado com nível de confiança de 95%.

No terceiro gráfico estão indicados, numa escala radial, os valores da componente estática de F_{xy} em função de θ para todos os ensaios realizados. A escala de F_{xy} vai de 0 N no centro ao valor máximo indicado no gráfico. Foram destacados, quando possível, os conjuntos de pontos referentes às repetições executadas numa mesma condição. Esses círculos estão identificados com o ângulo de inclinação da fresa para aquela condição de ensaio. Abaixo do gráfico radial existe uma figura que indica a convenção utilizada para a direção e sentido de F_{xy} , a origem de θ , o sentido de rotação e a direção e sentido de avanço da fresa.

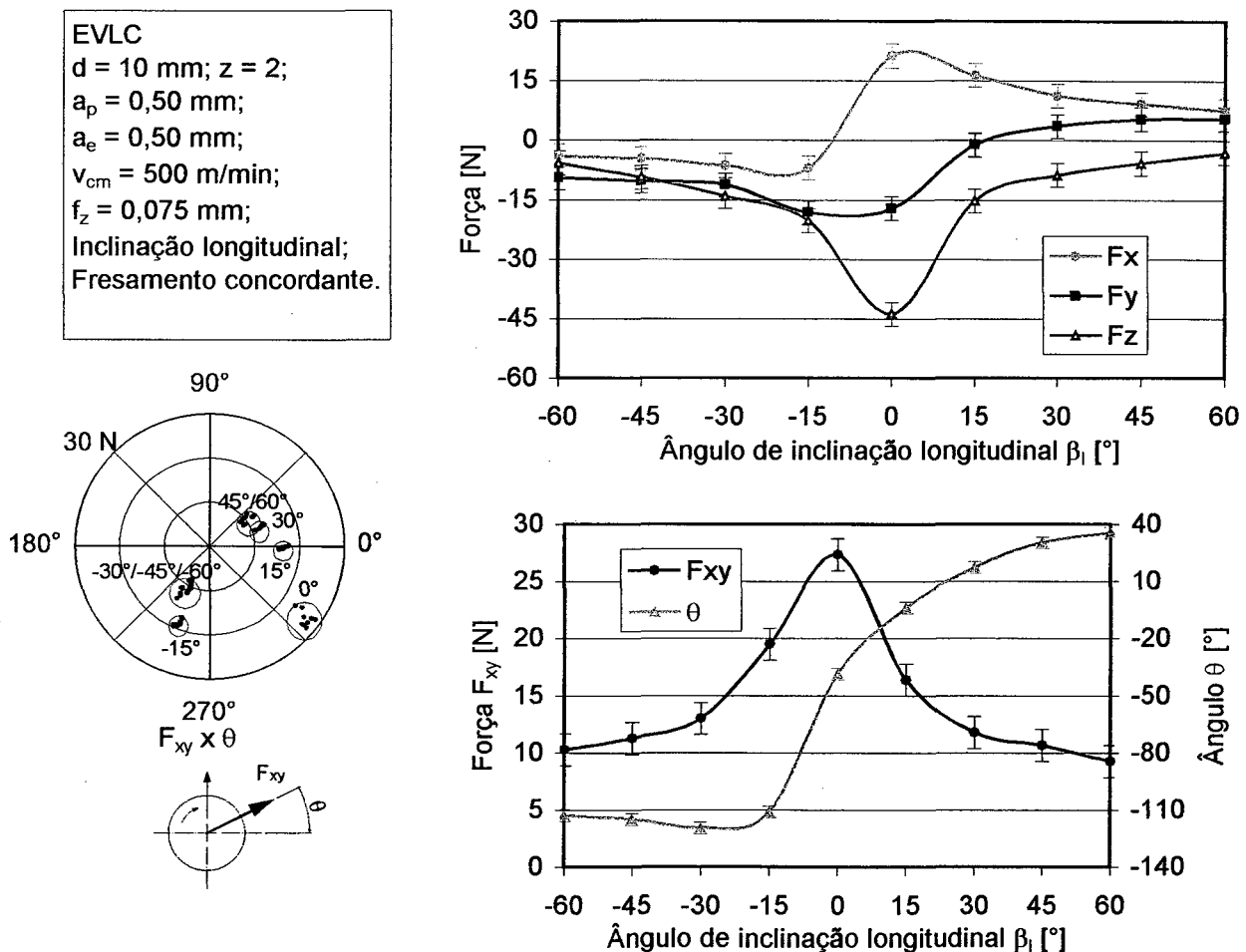


Figura 4.18 - Resultado do ensaio com altas velocidades de corte EVLC (F_x , F_y , F_z , F_{xy} e θ em função da inclinação da fresa e F_{xy} em função de θ)

Todos os seis grupos de experimentos realizados possuem uma série de resultados em comum. O primeiro ponto a ser observado é a redução das forças quanto maior a inclinação, positiva ou negativa, da ferramenta em relação à superfície usinada. Isso ocorreu pois, como foi destacado no item 3.2, optou-se por utilizar a rotação da árvore da máquina-ferramenta constante para todos os ensaios. Desta forma, tem-se a velocidade de corte real variando de 0 m/min, no centro da fresa, até aproximadamente 1000 m/min, no ponto extremo do gume para a inclinação máxima de 60°, positiva ou negativa. Sendo assim, como regra geral pode-se dizer que as forças reduzem com o aumento da inclinação da fresa.

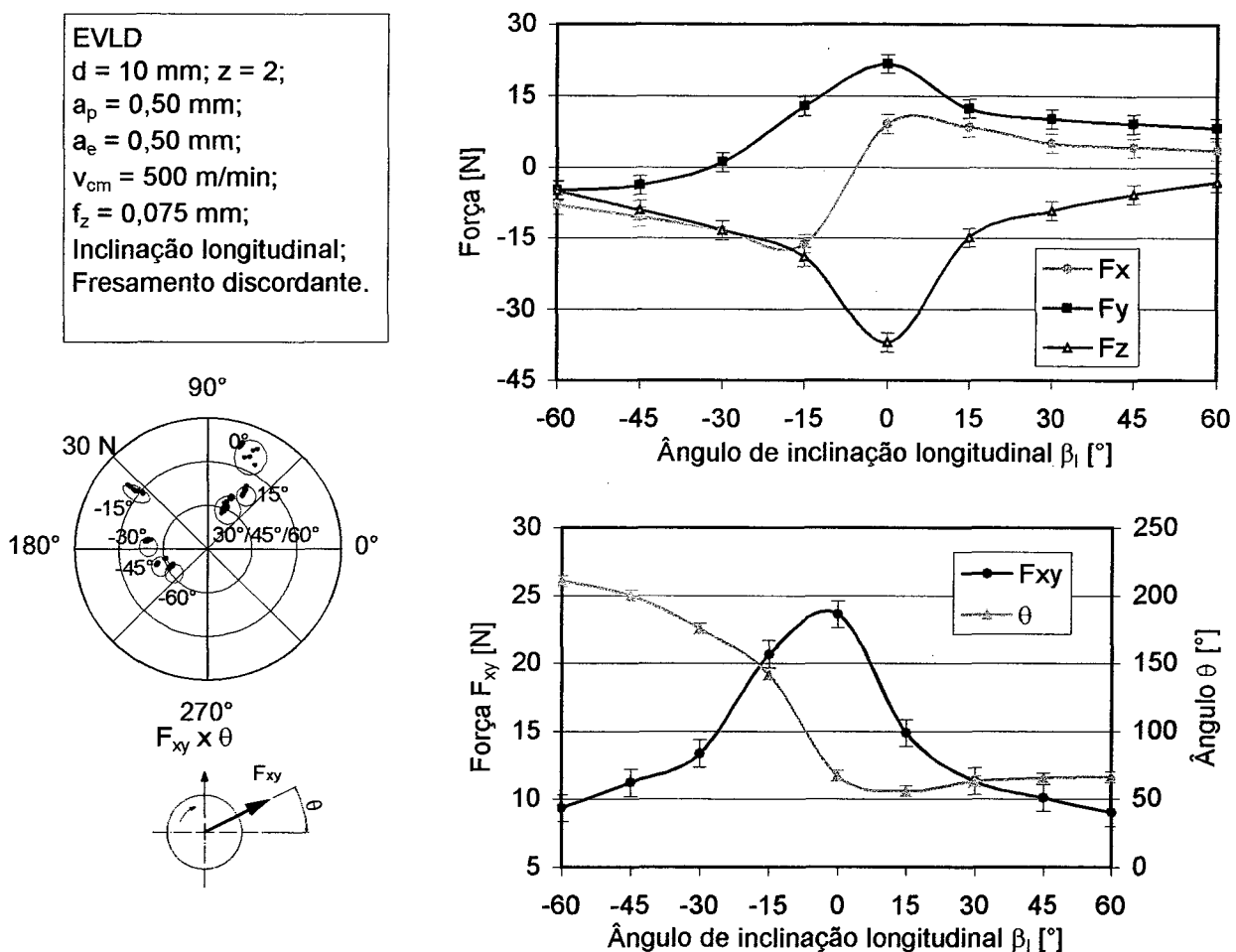


Figura 4.19 - Resultado do ensaio com altas velocidades de corte EVLD (F_x , F_y , F_z , F_{xy} e θ em função da inclinação da fresa e F_{xy} em função de θ)

A segunda característica comum a todos os ensaios foi a atuação sempre prejudicial ao processo do gume transversal da fresa. O ângulo de inclinação limite, a

partir do qual o centro da fresa deixa de atuar, é aproximadamente 26° , para as condições de corte utilizadas. A pior condição de usinagem foi o ensaio com inclinação longitudinal e fresamento combinado com uma inclinação de -15° (EVLB, figura 4.17). Neste caso tem-se a fresa atuando de forma similar a uma broca com o gume transversal empurrando o material da peça a sua frente. O esforço na direção z se elevou fortemente e a formação de cavaco ficou totalmente prejudicada, a ponto de ser formado um estranho cavaco contínuo. Esta condição de usinagem deve ser evitada sob pena de se provocar danos na fresa e na peça. As condições de usinagem com inclinação longitudinal de -15° com fresamento concordante (EVLC, figura 4.18) e discordante (EVLD, figura 4.19) não é tão problemática pois, devido à geometria do corte, o gume transversal praticamente não atua no processo.

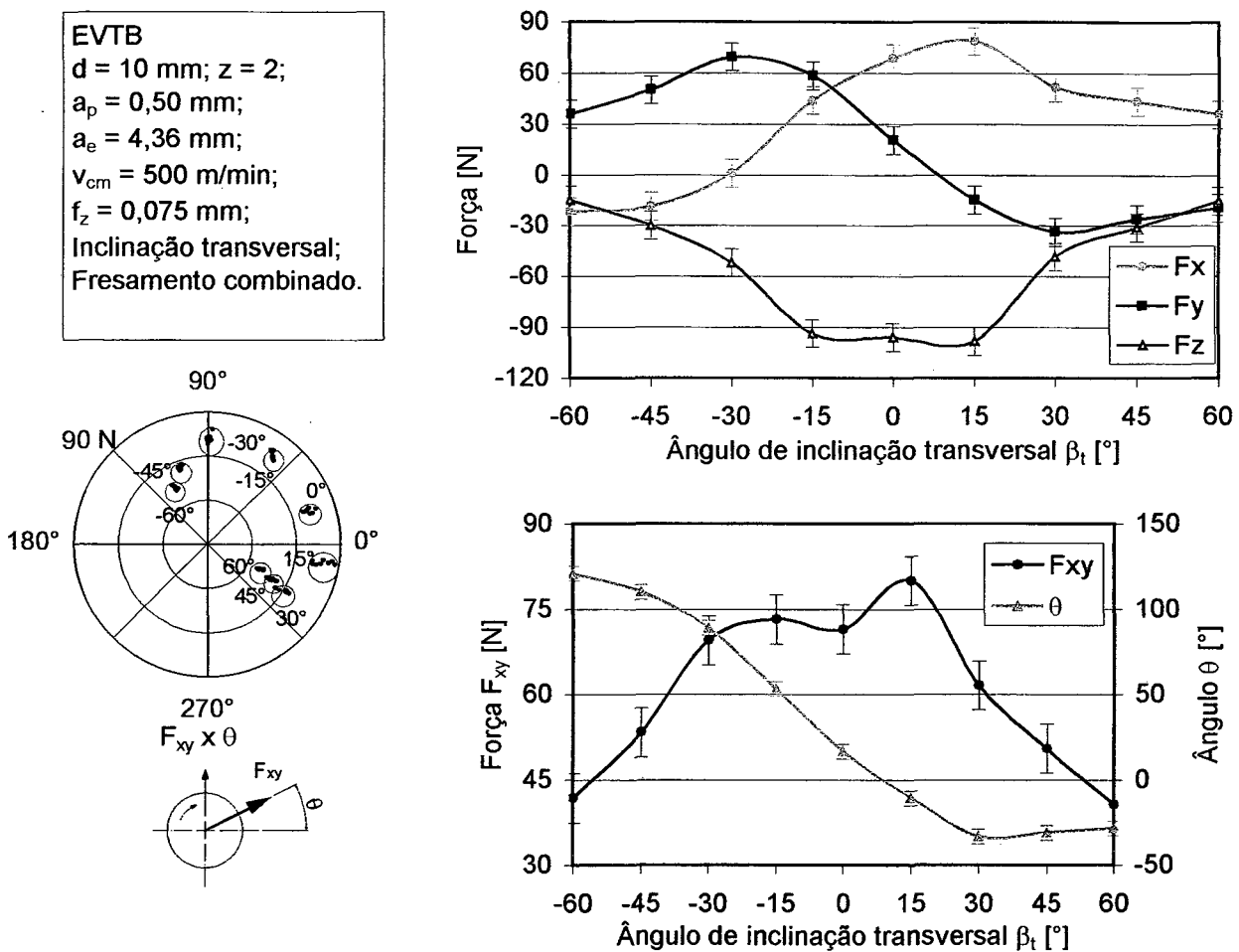


Figura 4.20 - Resultado do ensaio com altas velocidades de corte EVTB (F_x , F_y , F_z , F_{xy} e θ em função da inclinação da fresa e F_{xy} em função de θ)

As condições mais favoráveis de ensaio com inclinação longitudinal foram as de inclinação positiva, com a fresa sendo puxada e não empurrada contra a peça. Com o uso da inclinação positiva garante-se que o gume transversal da fresa não será atuante no processo.

No ensaio com inclinação transversal e fresamento combinado (EVTB, figura 4.20) tem-se o gume transversal atuando sempre na faixa de -15° a 15° . No entanto, o aumento de força observado, principalmente em z, não foi tão significativo quanto no ensaio EVLB, sendo que isto ocorreu porque a fresa não está sendo efetivamente empurrada contra a peça como num processo de furação. Apesar disso, deve-se evitar tais condições devido à grande parcela de esmagamento de material que ocorre durante a atuação do gume transversal.

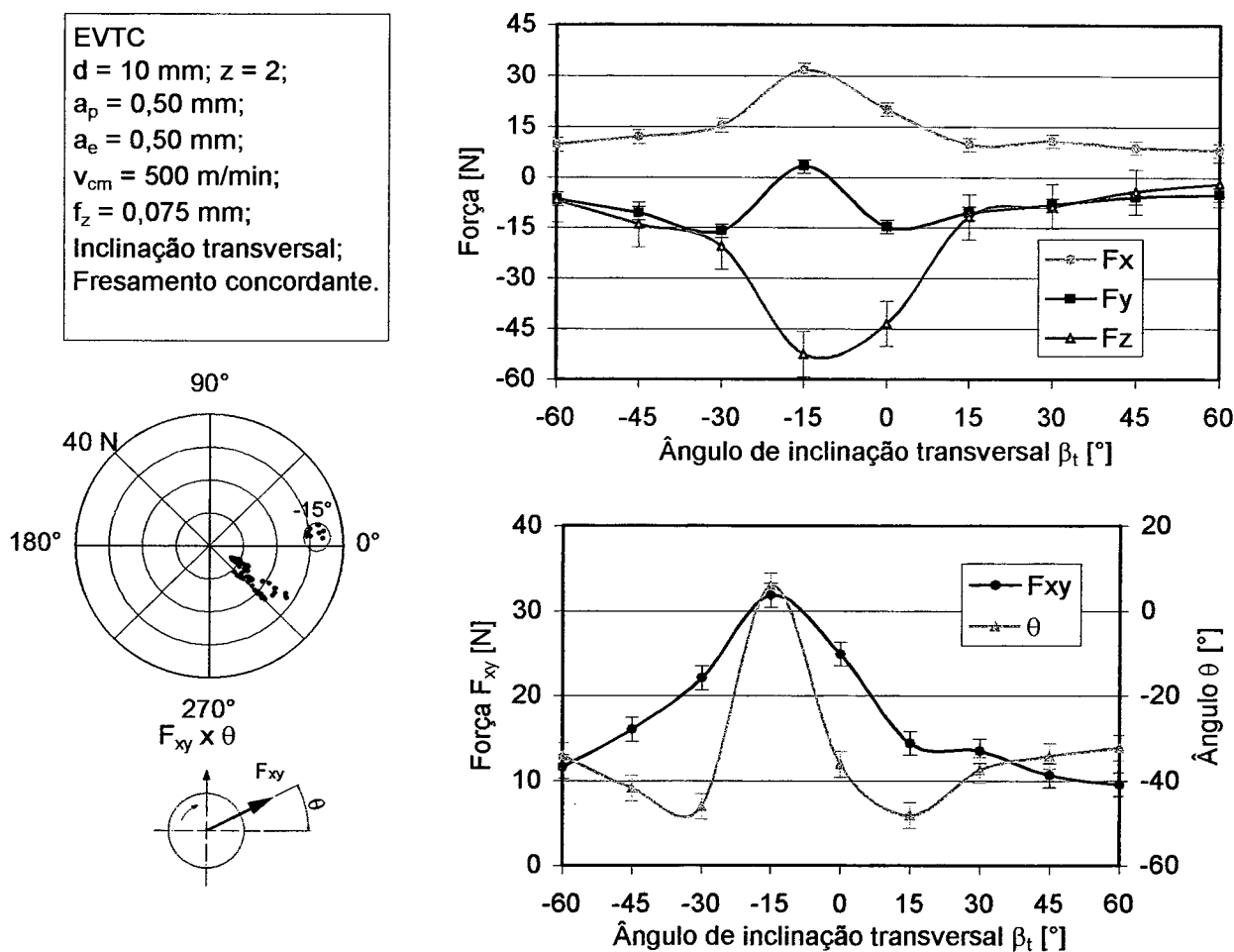


Figura 4.21 - Resultado do ensaio com altas velocidades de corte EVTC (F_x , F_y , F_z , F_{xy} e θ em função da inclinação da fresa e F_{xy} em função de θ)

Para os ensaios com inclinação transversal e fresamento concordante (EVTC, figura 4.21) e discordante (EVTD, figura 4.22), tem-se a atuação do gume transversal da fresa somente para a faixa de -15° a 0° , sendo que a inclinação de -15° é a que produz os maiores valores de F_{xy} e F_z , pois para 0° a atuação do gume é pequena.

Assim como nos ensaios com inclinação longitudinal, a utilização da inclinação transversal positiva foi mais adequada ao processo de fresamento pois elimina a atuação prejudicial do gume transversal da fresa.

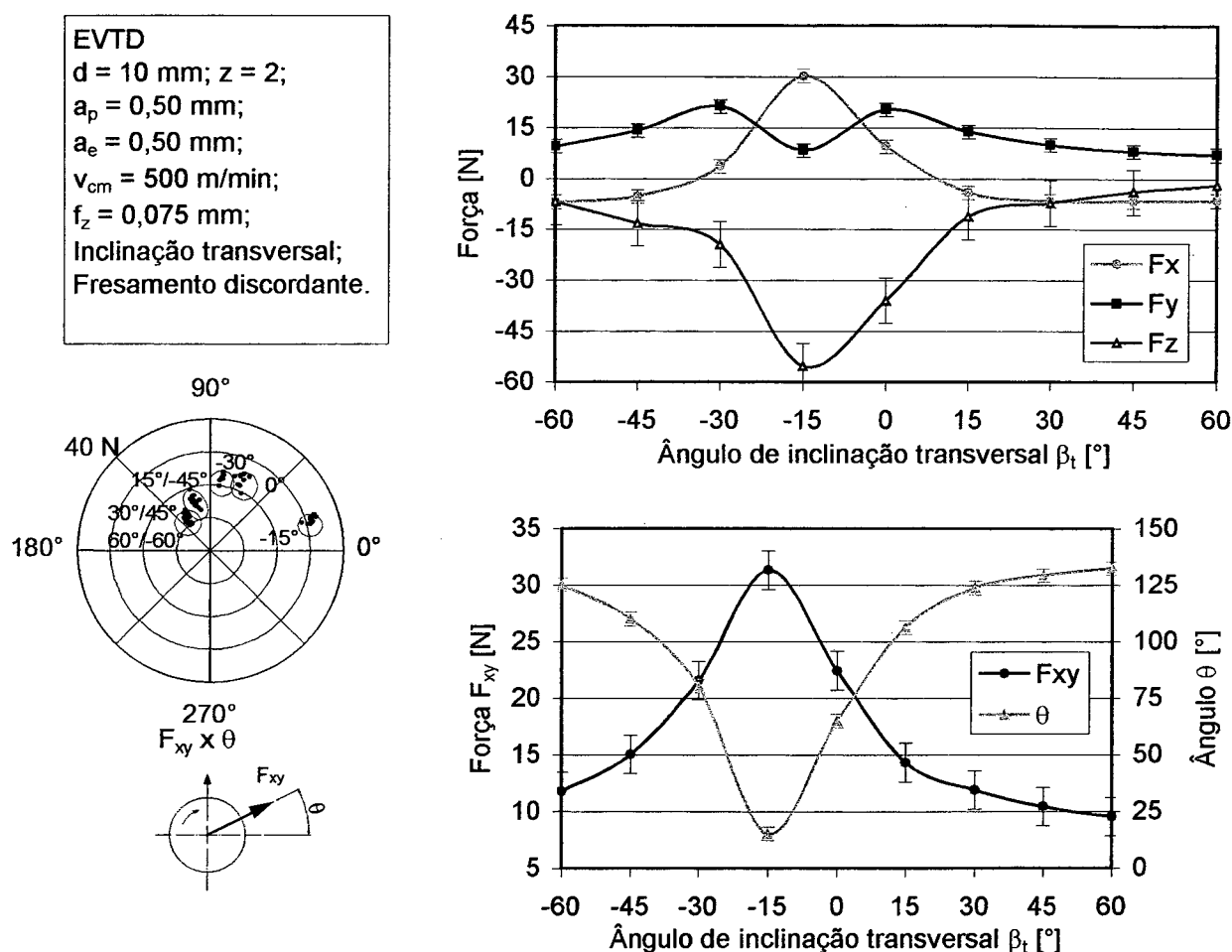


Figura 4.22 - Resultado do ensaio com altas velocidades de corte EVTD (F_x , F_y , F_z , F_{xy} e θ em função da inclinação da fresa e F_{xy} em função de θ)

A comparação da intensidade da componente estática das forças para todos os ensaios produziu um resultado interessante. Com exceção dos ensaios em que o gume transversal atua no processo, em geral de -15° a 15° , e separando-se os ensaios com a_e igual a 4,36 mm e a_e 0,50 mm, a intensidade das forças para uma mesma inclinação

da fresa foi praticamente a mesma em todas as condições de ensaio, independente da inclinação ser transversal ou longitudinal ou o fresamento ser concordante ou discordante.

Para os ensaios EVLC, EVLD, EVTC e EVTD a intensidade de F_{xy} e F_z foi praticamente a mesma na faixa de inclinação de 0° a 60° . Em -15° a atuação do gume transversal fez com que o grupo de ensaios EVTC e EVTD produzisse forças um pouco superiores ao grupo de ensaios EVLC e EVLD. Na faixa de -60° a -30° os ensaios com inclinação transversal têm também uma pequena tendência de produzir esforços superiores aos ensaios com inclinação longitudinal.

Nos ensaios EVLB e EVTB tem-se praticamente a mesma intensidade de F_{xy} e F_z para as faixas de inclinação de -60° a -30° e 30° a 60° . Na faixa de -15° a 15° a diferente forma de atuação do gume transversal da fresa produziu resultados bastante diferentes.

Caso se considere necessária uma avaliação em conjunto de F_{xy} , F_z e também de θ para a confirmação das conclusões acima descritas, no item 7.5 a **figura 7.10** e a **figura 7.11** mostram estas comparações.

Apesar das intensidades das forças serem semelhantes em diversos casos, o ângulo de direção da resultante F_{xy} (θ) foi bastante diferente para os casos estudados, dependendo fortemente da geometria do corte. Pode-se relacionar o ângulo de direção da resultante (θ) com a força de avanço (F_y). Para θ variando de 0° a 180° tem-se F_y positiva, e para θ variando de 180° a 360° (ou -180° a 0°) tem-se F_y negativa.

No ensaio com inclinação longitudinal e fresamento combinado (EVLB, **figura 4.17**) tem-se para a faixa de inclinação de -60° a -30° força de avanço negativa, pois nesta condição de usinagem a peça está atrás da fresa, que tem movimento para frente e para baixo e empurra a peça para trás. Na faixa de inclinação positiva ocorre o contrário, com força de avanço positiva, pois a peça está na frente da fresa (ver **figura 3.1**). Em 0° tem-se fresamento combinado convencional e força de avanço positiva, e em -15° a atuação danosa do gume transversal impede a análise de θ pois F_{xy} é próxima de zero.

Nos ensaios de inclinação longitudinal com fresamento concordante (EVLC, **figura 4.18**) e discordante (EVLD, **figura 4.19**) esperava-se força de avanço negativa e positiva, respectivamente, pois num processo de fresamento concordante a força de avanço é normalmente negativa e, no discordante, positiva. Contudo, para o ensaio

EVLC na faixa de 30° a 60° F_y foi positiva e, para o ensaio EVLD na em -45° e -60° , F_y foi negativa. Isso ocorre pois nas inclinações extremas a peça está atrás da fresa para inclinações negativas, ou na frente para inclinações positivas, conforme discutido no parágrafo anterior para o ensaio EVLB.

Observando-se o ensaio com inclinação transversal e fresamento combinado (EVTB, **figura 4.20**) tem-se para a faixa de inclinação de -60° a -30° fresamento puramente discordante e para a faixa de inclinação de 30° a 60° fresamento puramente concordante. Em -15° prevalece o discordante, em 15° prevalece o concordante e em 0° tem-se efetivamente o fresamento combinado. Dessa forma, a força de avanço é positiva para inclinações de -60° até aproximadamente 8° e negativa para inclinações maiores que 8° até 60° .

Os experimentos com inclinação transversal e fresamento concordante (EVTC, **figura 4.21**) e discordante (EVTD, **figura 4.22**) seguem teoria de força de avanço negativa e positiva, respectivamente. Somente no ensaio EVTC com inclinação de -15° isso não ocorreu, pois o gume transversal atua no processo e o fresamento não é totalmente concordante, existindo uma parcela de fresamento discordante. No ensaio EVTD com esta mesma inclinação, a parcela de fresamento concordante foi suficiente apenas para uma redução na força de avanço, e não sua mudança de sinal.

Com exceção das condições de ensaio onde o gume transversal da fresa tem efeito claramente negativo no processo, não se pode inferir nenhum comportamento de desgaste da ferramenta em função das forças nos resultados aqui apresentados. Como discutido anteriormente, os resultados de intensidade foram semelhantes para uma mesma inclinação da fresa. Portanto, estes gráficos devem ser utilizados como referência para a busca das condições que melhor favoreçam as necessidades de usinagem com relação à direção desejada da força.

5. Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos

5.1. Conclusões

São apresentadas neste item as conclusões finais das análises dos experimentos, realizadas no capítulo anterior, e de todo o trabalho.

Nos ensaios realizados observou-se que as condições de montagem são a principal causa da excentricidade da fresa, estando de acordo com o apresentado na revisão da literatura do item 2.3. A utilização de pinças produzidas com boa qualidade dimensional e o cuidado na montagem reduzem consideravelmente a excentricidade da fresa e suas conseqüências.

Demonstrou-se com os resultados dos ensaios a sobrecarga à qual alguns dentes da fresa são submetidos, enquanto outros atuam menos que o especificado para as condições ajustadas do processo.

A detecção da ocorrência de excentricidade durante a usinagem pode ser feita através da medição em processo das componentes de força F_x e F_y . Com o auxílio de sistemas de aquisição de sinais que fazem o processamento dos dados simultaneamente à medição, pode-se calcular o espectro de freqüências do sinal ou o histograma dos pontos medidos, que fornecem boas informações sobre o nível de excentricidade da fresa. O espectro do sinal medido acusa a presença de excentricidade através de um pico na freqüência de rotação da fresa, indicativo do deslocamento do seu conteúdo da freqüência de entrada de dentes para a de rotação. Quanto maior este pico maior a intensidade da excentricidade. O histograma dos pontos de força medidos apresentou duas regiões de concentração de pontos para o caso de excentricidade no processo.

Conforme discutido, a deflexão atenua o efeito da excentricidade e é muito difícil de ser observada pelo sistema utilizado de medição de forças. Seria possível sua avaliação com o auxílio de um equipamento capaz de medir, durante o processo, o deslocamento da fresa causado pela deflexão.

A ocorrência de vibração auto-excitada pôde ser facilmente detectada pelo operador devido ao forte ruído do processo de fresamento nestas condições e a formação muito irregular dos cavacos. Apesar do espectro de freqüências e do

histograma dos pontos do sinal medido apresentarem fortes características da vibração auto-excitada, um sistema simples de monitoramento de forças durante o processo acusaria prontamente a forte sobrecarga dos esforços, sem necessidade de nenhum processamento mais complexo do sinal.

Os resultados dos ensaios de força para avaliação da influência dos parâmetros d , z e a_e na resultante de forças F_{xy} apresentaram uma série de padrões de comportamento que podem ser utilizados no planejamento do processo e na definição da melhor estratégia de fresamento. Os gráficos apresentados servem de referência para este tipo de trabalho pois permitem estimar principalmente a direção e sentido de F_{xy} durante o processo, sua intensidade e seu nível de oscilação.

Nos ensaios para avaliação do desgaste, a principal conclusão foi que a utilização em abundância de emulsão reduziu a temperatura de trabalho da fresa, tendo como efeito a preservação das condições do gume por um tempo muito maior. Obteve-se uma vida superior a 6 vezes em comparação com o ensaio sem fluido e a força resultante final ficou aproximadamente 25% menor. A alta tenacidade da fresa de aço-rápido sem cobalto permitiu que o gume resistisse sem problemas aos choques térmicos do processo com emulsão.

Apesar desta aparente vantagem, o objetivo principal do processo é a obtenção de uma alta produtividade e não simplesmente aumento de vida de ferramenta. Desta forma deve-se buscar uma maior velocidade de corte no fresamento com fluido, com conseqüente redução de vida e aumento de produtividade. A utilização da velocidade de corte 2 vezes maior foi ainda insuficiente para obtenção da máxima eficiência do processo.

A aplicação da minimização da quantidade de fluido de corte ou o uso de uma fresa de aço-rápido com 5% de cobalto aumentou em torno de 2 vezes a vida da fresa e reduziu aproximadamente 25% a força resultante final, em comparação com o ensaio sem fluido e fresa sem cobalto. A minimização apresentou tal resultado em função do efeito lubrificante da névoa de fluido e da troca de calor do jato de ar comprimido, tendo como conseqüência a redução da temperatura de trabalho e a preservação do gume da fresa. No ensaio com fresa de aço-rápido com 5% de cobalto não existiu o efeito de redução de temperatura. No entanto, o cobalto aumenta a resistência à temperatura do aço-rápido, também preservando o gume da fresa.

Para efeito de um processo de usinagem com preocupações relativas ao meio ambiente, a utilização do cobalto é vantajosa pois elimina-se totalmente a utilização do fluido de corte. A minimização exige encapsulamento da máquina-ferramenta, tratamento de resíduos e limpeza posterior de peças, apesar da pequena quantidade de óleo utilizada.

Os resultados dos experimentos de fresamento de topo esférico com altas velocidades de corte foram prejudicados pela dificuldade de medição e análise de forças cíclicas de alta frequência. Contudo, obtiveram-se muitas informações e padrões de comportamento a partir da componente estática do sinal, que podem ser muito úteis no planejamento do processo e na definição de estratégias de fresamento. Por ser o desgaste o principal limitante deste tipo de processo e devido à estratégia de fresamento ter influência direta no desgaste, a correta definição dos parâmetros e estratégias é fundamental.

Observou-se que nas condições de inclinação que permitem a atuação do gume transversal da fresa o resultado da usinagem foi bastante prejudicado. Os problemas associados foram a sobrecarga de forças, vibrações indesejadas e forte esmagamento de material da peça. Deve-se portanto, sempre que possível, adotar uma estratégia de usinagem que evite a atuação do gume transversal da fresa.

A comparação da intensidade da resultante F_{xy} nas diversas condições ensaiadas não apresentou diferenças significativas. Entretanto, o sentido e direção de F_{xy} apresentaram resultados bastante diversos, acompanhando sempre a geometria do corte para cada caso ou o fresamento concordante, discordante ou combinado. Sendo assim, com as informações apresentadas, não foi possível fazer uma estimativa simples do comportamento do desgaste das fresas nas diversas condições dos experimentos.

5.2. Sugestões para Futuros Trabalhos

Durante a execução deste trabalho surgiram muitas questões que não puderam ser verificadas ou analisadas, sendo sugeridas para futuros trabalhos as principais delas.

A análise da excentricidade e da deflexão da fresa pode ser enriquecida com a medição em processo da excentricidade e da deflexão com o auxílio de sensores de deslocamento. Uma sugestão é a introdução de um valor conhecido de excentricidade e a posterior medição da deflexão e excentricidade efetiva durante o processo. Com isso, tem-se subsídios para verificar o quanto a deflexão atenua a excentricidade. Além disso, pode-se também medir a posição angular da fresa e sincronizar esta informação com o sinal de força, permitindo-se relacionar um pico de força a um determinado dente da fresa.

Também com relação à deflexão, sugere-se a execução de experimentos para verificação da relação entre as forças, a deflexão e a qualidade dimensional da superfície usinada, conforme proposto por SMITH e TLUSTY [63] e discutido no item 2.5, para os casos de fresamento concordante, discordante e combinado.

Informações novas e importantes poderiam ser obtidas com a construção de um suporte de fixação de fresa instrumentado. Neste suporte seriam inseridos circuitos eletrônicos que permitiriam a medição com extensômetros e termopares, e o sinal medido seria enviado através de transmissão sem contato para o sistema de aquisição de sinais.

Com este equipamento poderiam ser montados extensômetros no corpo da fresa para medição de forças e deflexões a que a ferramenta está submetida. A temperatura do gume durante o processo poderia ser melhor estimada com a introdução de termopares no dente da fresa, próximo à região de corte. Com isso, saber-se-ão quais as diferenças de temperatura no uso dos diferentes fluidos de corte, além de se verificar qual o nível de choque térmico a que a fresa está submetida. A busca de uma velocidade de corte no fresamento com emulsão que produza uma temperatura na região de corte semelhante ao fresamento sem fluido poderia ser muito facilitada com o uso deste suporte instrumentado.

Os ensaios de desgaste foram executados com paradas e remoção da fresa de seu suporte para obtenção de imagens, procedimento que não permitiu fazer a análise

da evolução do espectro de frequências e dos histogramas ao longo da vida da ferramenta. Sugere-se que este trabalho seja feito, pois pode-se obter subsídios para o monitoramento do desgaste da fresa. Ainda quanto aos ensaios de desgaste, seria importante a avaliação do comportamento de desgaste e evolução das forças para o fresamento concordante e discordante, além do fresamento combinado executado neste trabalho.

Nos experimentos com altas velocidades de corte deve-se tentar corrigir a principal deficiência da análise, que é a medição confiável com altas frequências de entrada de dentes. Existem algumas formas de isso ser feito mas nenhum método é trivial e elimina totalmente o problema.

Pode-se construir um novo dinamômetro piezelétrico conforme propôs DAMARITÜRK [89], mas esta solução é complexa, cara e não aumenta muito a frequência de ressonância do equipamento. Outra possibilidade é buscar formas de medição de força cuja resposta dinâmica seja suficiente para o estudo proposto. Caso isso também seja difícil, pode-se tentar a supressão matemática dos efeitos da dinâmica do sistema de medição no sinal de força medido, conforme propôs HERGET [27]. Esta última solução é de elevada complexidade matemática e de processamento de sinal, mas aparentemente uma das mais exeqüíveis, devendo somente ser verificada sua real eficiência.

A utilização de uma faixa do sinal medido que englobe frequências superiores à de entrada de dentes amplia muito as possibilidades de análise do processo. Poderão ser realizadas as mesmas análises efetuadas neste trabalho para o fresamento com velocidades de corte mais baixas. Também com estes novos dados pode-se buscar maiores informações que relacionem as forças, o desgaste da fresa e o acabamento obtido na peça. Desta forma, o planejamento, a determinação de estratégias de fresamento e o monitoramento do processo serão executados de forma mais exata e segura.

6. Referências Bibliográficas

- [1] DROZDA, T. J.; WICK, C. (Ed.) *Tool and Manufacturing Engineers Handbook – Machining*. 4. ed. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineers, 1983. v. 1, p. 1.1-1.66, 10.1-10.76.
- [2] STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte II*. 2. ed. Florianópolis : Editora da UFSC, 1995. p. 141-216.
- [3] SANDVIK COROMANT. *Modern Metal Cutting*. Sandviken, Sweden, 1994. p. X.1-X.159.
- [4] DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo : MM Editora, 1999. 242 p.
- [5] KÖNIG, W.; KLOCKE, F. *Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. 6. Auflage. Berlin : Springer - Verlag, 1999. 471 p.
- [6] KÖLLING, H. D. *Prozessoptimierung und Leistungssteigerung beim Schafffräsen*. Aachen, 1986. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - RWTH Aachen, Alemanha.
- [7] ARMAREGO, E. J. A.; DESHPANDE, N. P. *Computerized Predictive Cutting Models for Force in End-Milling Including Eccentricity Effects*. Annals of the CIRP, v. 38, n. 1, p. 45-49, 1989.
- [8] ARMAREGO, E. J. A.; DESHPANDE, N. P. *Computerized End-Milling Force Predictions with Cutting Models Allowing for Eccentricity and Cutter Deflections*. Annals of the CIRP, v. 40, n. 1, p. 25-29, 1991.
- [9] KLINE, W. A.; DEVOR, R. E. *The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces In End Milling*. International Journal of Machine Tool Design & Research, v. 23, n. 2, p. 123-140, 1983.
- [10] TAI, C. C.; FUH, K. H. *A Predictive Force Model in Ball-End Milling Including Eccentricity Effects*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 34, n. 7, p. 959-979, 1994.

- [11] YANG, M. Y.; CHOI, J. G. *A Tool Deflection Compensation System for End Milling Accuracy Improvement*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 120, n. 2, p. 222-229, maio 1998.
- [12] WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B.; MÜHLE, H. B.; *Mandrilamento de precisão com cabeçotes reguláveis e sistema de balanceamento*. Máquinas e Metais, n. 441, p. 180-191, abr. 2000.
- [13] MINIS, I.; YANUSHEVSKY, R.; TEMBO, A. *Analysis of Linear and Nonlinear Chatter in Milling*. Annals of the CIRP, v. 39, n. 1, p. 459-462, 1990.
- [14] WECK, M.; ALTINTAS, Y.; BEER, C. *CAD Assisted Chatter-Free NC Tool Path Generation in Milling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 34, n. 6, p. 879-891, 1994.
- [15] HOCK, S. *Hochgeschwindigkeitsfräsen im Werkzeug- und Großformenbau - Eingriffsverhältnisse und Technologie*. Darmstadt, 1996. 152 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - TU Darmstadt, Alemanha.
- [16] JANOVSKY, D. *Einfluß der Technologie auf Maßgenauigkeit und Prozeßsicherheit beim Hochgeschwindigkeitsfräsen im Werkzeug- und Formenbau*. Darmstadt, 1996. 153 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - TU Darmstadt, Alemanha.
- [17] CAMACHO, J. H. *Frästechnologie für Funktionsflächen im Formenbau*. Hannover, 1991. 174 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universität Hannover, Alemanha.
- [18] SCHULZ, H. *Hochgeschwindigkeitsbearbeitung - High-Speed Machining*. München : Carl Hanser Verlag, 1996. 286 p.
- [19] SCHULZ, H.; MORIWAKI, T. *High-Speed Machining*. Annals of the CIRP, v. 41, n. 2, p. 637-643, 1992.
- [20] HOCK, S.; JANOVSKY, D. *Hochgeschwindigkeits-Fräsen im Werkzeug- und Formenbau*. Werkstatt und Betrieb, v. 126, n. 7, p. 371-381, 1993.
- [21] HOCK, S.; JANOVSKY, D. *Freiformflächen im Werkzeug- und Formenbau bearbeiten*. Werkstatt und Betrieb, v. 125, n. 8, p. 597-606, 1992.
- [22] KAUFELD, M. *Maschinenkonzepte zum Hochgeschwindigkeits-Fräsen*. Werkstatt und Betrieb, v. 129, n. 1-2, p. 55-60, 1996.

- [23] SCHULZ, H.; HOCK, S. *High-Speed Milling of Dies and Moulds – Cutting Conditions and Technology*. Annals of the CIRP, v. 44, n. 1, p. 35-38, 1995.
- [24] FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo : E. Blücher, 1969. 751 p.
- [25] ZHENG, L.; LIANG, S. Y. *Identification of Cutter Axis Tilt in End Milling*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 119, n. 2, p. 178-185, maio 1997.
- [26] SCHROETER, R. B. *Usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho*. Florianópolis, 1997. 194 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [27] HERGET, T. *Simulation und Messung des zeitlichen Verlaufs von Zerspankraftkomponenten beim Hochgeschwindigkeitsfräsen*. Darmstadt, 1994. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - TU Darmstadt, Alemanha.
- [28] CHRISTOFFEL, K. *Werkzeugüberwachung beim Bohren und Fräsen*. Aachen, 1984. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - RWTH Aachen, Alemanha.
- [29] CHEN, J. C.; BLACK, JT. *A Fuzzi-Nets In-Process (FNIP) System for Tool-Breakage Monitoring in End-Milling Operations*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 37, n. 6, p. 783-800, 1997.
- [30] TANSEL, I. N.; MEKDECI, C.; MCLAUGHLIN, C. *Detection of Tool Failure in End Milling with Wavelet Transformations and Neural Networks (WT-NN)*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 35, n. 8, p. 1137-1147, 1995.
- [31] ALTINTAS, Y. *Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 114, n. 4, p. 386-392, nov. 1992.
- [32] ALTINTAS, Y.; YELLOWLEY, I. *In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Forces Models*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 111, n. 2, p. 149-157, maio 1989.

- [33] ALTINTAS, Y.; YELLOWLEY, I.; TLUSTY, J. *The Detection of Tool Breakage in Milling Operations*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 110, n. 3, p. 271-277, ago. 1988.
- [34] ALTINTAS, Y. *In-Process Detection of Tool Breakages Using Time Series Monitoring of Cutting Forces*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 28, n. 2, p. 157-172, 1988.
- [35] ELBESTAWI, M. A.; PAPAZAFIRIOU, T. A.; DU, R. X. *In-Process Monitoring of Tool Wear in Milling Using Cutting Force Signature*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 31, n. 1, p. 55-73, 1991.
- [36] LIN, S. C.; YANG, R. J. *Force-Based Model for Tool Wear Monitoring in Face Milling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 35, n. 9, p. 1201-1211, 1995.
- [37] ORABY, S. E.; HAYHURST, D. R. *Development of Models for Tool Wear Force Relationships in Metal Cutting*. International Journal of Mechanical Sciences, v. 33, n. 2, p. 125-138, 1991.
- [38] THE CINCINNATI MILLING MACHINE CO. *A treatise on milling and milling machines - Section 2*. 3. ed. Cincinnati, Ohio, 1946. 326 p.
- [39] KRONENBERG, M. *Grundzüge der Zerspanungslehre, Zweiter Band: Mehrschneidige Zerspanung (Stirnfräsen, Bohren)*. 6. Auflage. Berlin : Springer - Verlag, 1963. p. 1-179.
- [40] WERTHEIM, R.; SATRAN, A.; BER, A. *Modifications of the Cutting Edge Geometry and Chip Formation In Milling*. Annals of the CIRP, v. 43, n. 1, p. 63-68, 1994.
- [41] FENG, H. Y.; MENQ, C. H. *A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 118, n. 4, p. 461-469, nov. 1996.
- [42] KLINE, W. A.; DEVOR, R. E.; SHAREEF, I. A. *The Prediction of Surface Accuracy in End Milling*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 104, n. 3, p. 272-278, ago. 1982.

- [43] SUNTHERLAND, J. W.; DEVOR, R. E. *An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 108, n. 4, p. 269-279, nov. 1986.
- [44] SIM, C.; YANG, M. *The Prediction of the Cutting Force in Ball-End Milling with a Flexible Cutter*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 33, n. 2, p. 267-284, 1993.
- [45] WECK, M. *Werkzeugmaschinen - Fertigungssysteme, Band 4: Meßtechnische Untersuchung und Beurteilung*. 5. Auflage. Düsseldorf : VDI - Verlag, 1996. p. 213-367.
- [46] SMITH, S.; TLUSTY, J. *Update on High-Speed Milling Dynamics*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 112, n. 2, p. 142-149, maio 1990.
- [47] HARRIS, C. M.; CREDE, C. E. (Ed.) *Shock and Vibration Handbook – Basic Theory and Measurements*. New York : McGraw-Hill, 1961. v. 1.
- [48] TLUSTY, J. *Dynamics of High-Speed Milling*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 108, n. 2, p. 59-67, maio 1986.
- [49] ALTINTAS, Y.; BUDAK, E. *Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling*. Annals of the CIRP, v. 44, n. 1, p. 357-326, 1995.
- [50] WERNER, A. *Prozeßauslegung und Prozeßsicherheit beim Einsatz von schlanken Schafffräsem*. Aachen, 1992. 147 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - RWTH Aachen, Alemanha.
- [51] LEE, A. C.; LIU, C. S. *Analysis of Chatter Vibration in the End Milling Process*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 31, n. 4, p. 471-479, 1991.
- [52] SMITH, S.; TLUSTY, J. *Efficient Simulation Programs for Chatter in Milling*. Annals of the CIRP, v. 42, n. 1, p. 463-466, 1993.
- [53] DAVIES, M. A.; DUTTERER, B.; PRATT, J. R.; SCHAUT, A. J. *On the Dynamics of High-Speed Milling with Long, Slender Endmills*. Annals of the CIRP, v. 47, n. 1, p. 55-60, 1998.

- [54] ALTINTAS, Y.; LEE, P. *A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills*. Annals of the CIRP, v. 45, n. 1, p. 59-64, 1996.
- [55] ALTINTAS, Y.; LEE, P. *Mechanics and Dynamics of Ball End Milling*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 120, n. 4, p. 684-692, nov. 1998.
- [56] BUDAK, E.; ALTINTAS, Y. *Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling - Part 1: General Formulation*. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, v. 120, n. 1, p. 22-30, mar. 1998.
- [57] BUDAK, E.; ALTINTAS, Y. *Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling - Part 2: Application of the General Formulation to Common Milling Systems*. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, v. 120, n. 1, p. 31-36, mar. 1998.
- [58] ALTINTAS, Y.; CHAN, P. K. *In-Process Detection and Suppression of Chatter in Milling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 32, n. 3, p. 329-347, 1992.
- [59] RADULESCU, R.; KAPOOR, S. G.; DEVOR, R. E. *An Investigation of Variable Spindle Speed Face Milling for Tool-Work Structures with Complex Dynamics, Part 1: Simulation Results*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 119, n. 3, p. 266-272, ago. 1997.
- [60] RADULESCU, R.; KAPOOR, S. G.; DEVOR, R. E. *An Investigation of Variable Spindle Speed Face Milling for Tool-Work Structures with Complex Dynamics, Part 2: Physical Explanation*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 119, n. 3, p. 273-277, ago. 1997.
- [61] SHIRASE, K.; ALTINTAS, Y. *Cutting Force and Dimensional Surface Error Generation in Peripheral Milling with Variable Pitch Helical End Mills*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 36, n. 5, p. 567-584, 1996.
- [62] STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte I*. 4. ed. Florianópolis : Editora da UFSC, 1995. 249 p.

- [63] SMITH, S.; TLUSTY, J. *An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 113, n. 2, p. 169-175, maio 1991.
- [64] EL MOUNAYRI, H.; SPENCE, A. D.; ELBESTAWI, M. *A Milling Process Simulation - A Generic Solid Modeller Based Paradigm*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 120, n. 2, p. 213-221, maio 1998.
- [65] FUH, K. H.; HWANG, R. M. *A Predicted Milling Force Model for High-Speed End Milling Operation*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 37, n. 7, p. 969-979, 1997.
- [66] LEE, P.; ALTINTAS, Y. *Prediction of Ball-End Milling Forces from Orthogonal Cutting Data*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 36, n. 9, p. 1059-1072, 1996.
- [67] BUDAK, E.; ALTINTAS, Y.; ARMAREGO, E. J. A. *Prediction of Milling Force Coefficients from Orthogonal Cutting Data*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 118, n. 2, p. 216-224, maio 1996.
- [68] ZHENG, L.; CHIOU, Y. S.; LIANG, S. Y. *Three Dimensional Cutting Force Analysis in End Milling*. International Journal of Mechanical Sciences, v. 38, n. 3, p. 259-269, 1996.
- [69] YÜCESAN, G.; ALTINTAS, Y. *Prediction of Ball End Milling Forces*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 118, n. 1, p. 95-103, fev. 1996.
- [70] TAI, C. C.; FUH, K. H. *Model for Cutting Forces Prediction in Ball-End Milling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 35, n. 4, p. 511-534, 1995.
- [71] FENG, H. Y.; MENQ, C. H. *The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process - Part 1: Model Formulation and Model Building Procedure*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 34, n. 5, p. 697-710, 1994.

- [72] FENG, H. Y.; MENQ, C. H. *The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process - Part 2: Cut Geometry Analysis and Model Verification*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 34, n. 5, p. 711-719, 1994.
- [73] PANDIT, S. M.; LIN, G. *Data Dependent Systems Methodology for Validation of Simulation Models Illustrated by End-Milling*. International Journal of Production Research, v. 29, n. 6, p. 1251-1261, 1991.
- [74] YANG, M.; PARK, H. *The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 31, n. 1, p. 45-54, 1991.
- [75] KLINE, W. A.; DEVOR, R. E.; LINDBERG, J. R. *The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts*. International Journal of Machine Tool Design & Research, v. 22, n. 1, p. 7-22, 1982.
- [76] ABRARI, F.; ELBESTAWI, M. A. *Closed Form Formulation of Cutting Forces for Ball and Flat End Mills*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 37, n. 1, p. 17-27, 1997.
- [77] LIAO, C. L.; TSAI, J. S. *Dynamic Response Analysis in End Milling Using Pretwisted Beam Finite Element*. Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME, v. 117, n. 1, p. 1-10, jan. 1995.
- [78] MONTGOMERY, D.; ALTINTAS, Y. *Mechanism of Cutting Force and Surface Generation in Dynamic Milling*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 113, n. 2, p. 160-168, maio 1991.
- [79] ALTINTAS, Y. *Direct Adaptive Control of End Milling Process*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 34, n. 4, p. 461-472, 1994.
- [80] KIM, M. K.; CHO, M. W.; KIM, K. *Application of the Fuzzy Control Strategy to Adaptive Force Control of Non-Minimum Phase End Milling Operations*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 34, n. 5, p. 677-696, 1994.

- [81] ROBER, S. J.; SHIN, Y. C. *Control of Cutting Force for End Milling Processes Using an Extended Model Reference Adaptive Control Scheme*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 118, n. 3, p. 339-347, ago. 1996.
- [82] FUSSELL, B. K.; SRINIVASAN, K. *An Investigation of the End Milling Process Under Varying Machining Conditions*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 111, n. 1, p. 27-36, fev. 1989.
- [83] KOLARITS, F. M.; DEVRIES, W. R. *A Mechanistic Dynamic Model of End Milling for Process Controller Simulation*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 113, n. 2, p. 176-183, maio 1991.
- [84] ALTINTAS, Y.; ORDUBADI, F.; SASSANI, F. *Design and Analysis of Adaptive Controllers for Milling Process*. Transactions of Canadian Society for Mechanical Engineers (CSME), v. 14, n. 1/2, p. 17-25, 1990.
- [85] MA, C. C. H.; ALTINTAS, Y. *Direct Adaptive Cutting Force Milling Processes*. Automatica, v. 26, n. 5, p. 899-902, 1990.
- [86] ALTINTAS, Y.; SPENCE, A. *End Milling Force Algorithms for CAD Systems*. Annals of the CIRP, v. 40, n. 1, p. 31-34, 1991.
- [87] ALTINTAS, Y.; SPENCE, A. *CAD Assisted Adaptive Control for Milling*. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, v. 113, n. 3, p. 444-450, set. 1991.
- [88] GAUTSCHI, G. H. *Piezoelectric Multicomponent Force Transducers and Measuring Systems*. In: Conference Transducer'78, [s.l. : s. n.], 1978. 23 p.
- [89] DAMARITÜRK, H. S. *Temperaturen und Wirkmechanismen beim Hochgeschwindigkeitsfräsen von Stahl*. Darmstadt, 1990. 135 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - TU Darmstadt, Alemanha.
- [90] KETTELER, G. *Prozeßüberwachung mit Acoustic-Emission beim Messerkopfstirnfräsen*. Aachen, 1997. p. 13-14. Tese (Doutorado em Engenharia) - RWTH Aachen, Alemanha.

- [91] ALTINTAS, Y.; YELLOWLEY I. *The Identification of Radial Width and Axial Depth of Cut in Peripheral Milling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 27, n. 3, p. 367-381, 1987.
- [92] YELLOWLEY I. *Observations on the Mean Values of Forces, Torque and Specific Power in the Peripheral Milling Process*. International Journal of Machine Tool Design & Research, v. 25, n. 4, p. 337-346, 1985.
- [93] CHENG, D. K. *Analysis of Linear Systems*. Reading, Massachusetts : Addison-Wesley, 1959. p. 1-13.
- [94] CASTRUCCI, P. B. L.; CURTI, R. *Sistemas não-lineares*. São Paulo : Edgard Blücher, 1981. v. 2, p. 1-6. (Controle Automático de Sistemas Dinâmicos).
- [95] SCHWARZ, R. J.; FRIEDLAND, B. *Linear Systems*. New York : McGraw-Hill, 1965. p. 1-27.
- [96] SCHULZ, H. *Hochgeschwindigkeitsfräsen metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe*. München : Carl Hanser Verlag, 1989. 348 p.
- [97] SUTTER, G.; MOLINARI, A.; FAURE, L. et al. *An Experimental Study of High Speed Orthogonal Cutting*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 120, n. 1, p. 169-172, fev. 1998.
- [98] TEIXEIRA, C. R.; SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. *Aspectos ecológicos nos processos de usinagem*. Metal Mecânica IPESI, n. 331, p. 68-76, jun./jul. 1999.
- [99] KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K. *Trockenbearbeitung - Grundlagen, Grenzen, Perspektiven*. VDI Berichte, n. 1240, p. 1-40, fev. 1996.
- [100] MACHINABILITY DATA CENTER *Machining data handbook*. 3. ed. Cincinnati, Ohio : Metcut Research Associates, Inc., 1980. v. 1, p. 2.181-2.231.
- [101] SKF FERRAMENTAS S.A. *Manual Técnico SKF*. São Paulo : SKF Ferramentas S.A., 1987. p. 112-169.
- [102] KREIDLER, V. *Konstante Zerspanbedingungen beim Hochgeschwindigkeits-Fräsen*. Werkstatt und Betrieb, v. 129, n. 7-8, p. 657-661, 1996.

7. Anexos

7.1. Características dos Equipamentos e Produtos Utilizados

7.1.1. Fresadora vertical convencional

Modelo: POLARIS F400

Fabricante: Indústrias Romi S.A.

Comando numérico: CNC 610 Diadur

Potência fuso: 15 CV (20 CV regime 30 min)

Rotação máxima fuso: 6000 rpm

Curso dos eixos: x = 700 mm

y = 420 mm

z = 600 mm

Velocidade de avanço máxima: 20 m/min

7.1.2. Fresadora vertical de alta velocidade

Modelo: KÖRNER CNC - 532S

Fabricante: Maschinenfabrik KÖRNER GmbH & Co., Alemanha

Potência fuso: 3,5 kW

Rotação do fuso: 10000 - 40000 rpm

Curso dos eixos: x = 500 mm

y = 500 mm

z = 350 mm

Velocidade de avanço máxima: 15 m/min

7.1.3. Sistema de medição de forças

⇒ Sistema de medição de forças utilizado nos ensaios de fresamento de topo reto convencional:

□ **Dinamômetro Piezelétrico 3 Componentes F_x , F_y , F_z**

Fabricante: Kistler Instrumente AG, Suíça

Tipo: 9265 A2

Faixa de medição F_x, F_y : -15 ... 15 kN

F_z : -10 ... 30 kN

Faixa calibrada F_x, F_y : 0 ... 1,5 kN

F_z : 0 ... 3 kN

Sensibilidade F_x, F_y : $\approx -7,9$ pC/N

F_z : $\approx -3,6$ pC/N

Rigidez F_x, F_y : ≈ 1 kN/ μ m

F_z : ≈ 2 kN/ μ m

Freqüência natural F_x, F_y : $\approx 1,7$ kHz

F_z : $\approx 2,7$ kHz

Resolução: $< 0,01$ N

Linearidade: $\leq \pm 0,5\%$ FSO

Histerese: $\leq 0,5\%$ FSO

Cross Talk: $\leq \pm 2\%$

□ **Amplificador de sinal**

Fabricante: Kistler Instrumente AG, Suíça

Tipo: 5011 A10

Faixa de medição: ± 10 ... ± 999000 pC

Sensibilidade do sensor: 0,01 ... 9990 pC/M.U.

Escala: 0,001 ... 9990000 M.U./V

Tensão de saída: ± 10 V

Resistência de isolamento na entrada: $>10^{14}$ Ω

Limite de freqüência (-3 dB, Filtro desligado): ≈ 0 ... 200 kHz

Linearidade: $\leq \pm 0,05\%$

Erro máximo para faixa de medição de

$\leq \pm 99,9 \text{ pC}: \leq \pm 3\%$

$\geq \pm 100 \text{ pC}: \leq \pm 1\%$

Placa de aquisição de dados

Modelo: INTERDATA 2

Fabricante: LABSOLDA - UFSC

Conversor A/D 12 bits de 16 canais (14 disponíveis)

Faixa de medição de tensão: $\pm 10 \text{ V}$

Frequência máxima de aquisição (soma de todos canais): 35 kHz

Microcomputador PC

Processador: Intel 486DX2 66 MHz

Memória RAM: 8 MB

Programa para aquisição de sinais digitais

ITD_GA60

Fabricante: LABSOLDA - UFSC

Programa para análise dos sinais

DIAdem versão 6.00.009

Fabricante: GfS Systemtechnik GmbH & Co. KG., Alemanha

➤ Sistema de medição de forças utilizado nos ensaios de fresamento de topo esférico com altas velocidades de corte:

Dinamômetro Piezelétrico 3 Componentes F_x, F_y, F_z

Fabricante: Kistler Instrumente AG, Suíça

Tipo: 9121

Faixa de medição F_x, F_y : -3 ... 3 kN

F_z : -6 ... 6 kN

Faixa calibrada	$F_x, F_y:$ 0 ... 300 N $F_z:$ 0 ... 600 N
Sensibilidade	$F_x, F_y:$ $\approx -7,9$ pC/N $F_z:$ $\approx -3,8$ pC/N
Rigidez	$F_x, F_y, F_z:$ ≈ 600 N/ μ m
Freqüência natural	$F_x, F_y, F_z:$ $\approx 1,0$ kHz
Resolução:	$< 0,01$ N
Linearidade:	$\leq \pm 1\%$ FSO
Histerese:	$\leq 0,5\%$ FSO
Cross Talk:	$\leq \pm 3\%$

Amplificador de sinal

Fabricante: Kistler Instrumente AG, Suíça

Tipo: 5006

Faixa de medição: ± 10 ... ± 500000 pC

Sensibilidade do sensor: 0,1 ... 11000 pC/M.U.

Tensão de saída: ± 10 V

Resistência de isolamento na entrada: $\approx 10^{14}$ Ω

Limite de freqüência (-3 dB, Filtro desligado): ≈ 0 ... 180 kHz

Linearidade: $\leq \pm 0,05\%$

Erro máximo para faixa de medição: $\leq \pm 3\%$

Placa de aquisição de dados

Modelo: DAP 2400/6

Fabricante: Microstar Laboratories, Inc., EUA

Conversor A/D 14 bits de 16 canais

Faixa de medição de tensão: ± 10 V

Freqüência máxima de aquisição (soma de todos canais): 200 kHz

Microcomputador PC

Processador: Intel Pentium 200 MMX

Memória RAM: 128 MB

- Programa para aquisição e análise de sinais digitais
DIAdem versão 6.00.009
Fabricante: GfS Systemtechnik GmbH & Co. KG., Alemanha

7.1.4. Sistema de aquisição de imagens

- Câmera ½" CCD compacta preto e branco
Modelo: TM-7CN
Fabricante: PULNiX America, Inc., EUA
Número de *pixel*: 768 x 494
Tamanho da célula: 8,4 μm x 9,8 μm
Varredura: 525 linhas 60 Hz
Sincronização: cristal interno
Resolução TV: 570 x 350
Iluminação mínima: 0,5 lux (F=1,4)
Montagem das lentes: *C-mount*

- Placa de aquisição de imagens
Modelo: Matrox Pulsar
Fabricante: Matrox Electronic Systems Ltd., Canadá
Aquisição: *standard e non-standard*, monocromática, analógica ou digital, *frame* ou *line scan*
Taxa máxima de aquisição: 45 MHz analógico e 30 MHz digital
Conversor A/D 10 bits
Interface digital larga 16 bits
Barramento PCI
Transferência em tempo real ou memória VGA própria (2 MB)
Display: 1600 x 1200 monocromático com *pseudo-color non-destructive overlay*

- Lente
Lente fixa Cosmocar/Pentax 50 mm f1.4 para 1" *C-mount*
Modelo: C25011
Fabricante: Asahi Precision Co., Ltd., Japão

- Microcomputador PC
Processador: Intel Pentium 200 MMX
Memória RAM: 64 MB

- Programa de aquisição de imagens
Matrox Intellican 2.0
Fabricante: Matrox Electronic Systems Ltd., Canadá

- Sistema de iluminação
Modelo: Fiber-Lite A3200/230
Fabricante: Dolan-Jenner Industries, Inc., EUA

7.1.5. Equipamentos para avaliação geométrica das fresas

- Medidor de fresas e brocas
Test Measuring Gauge
Modelo: Guhring PG100
Fabricante: Guehring Automation GmbH & Co., Alemanha
Ampliação: 10 e 25 vezes

- Microscópio de ferramentaria
Modelo: Measurescope N° 18771
Fabricante: Nikon Corporation, Japão
Ampliação: 10 vezes

7.1.6. Sistema de minimização de fluidos de corte

Modelo: MMKS T 150

Fabricante: I.T. Chemisch-technische Produkte GmbH, Alemanha

Volume máximo de fluido: 1,3 l

Pressão: 0 - 7 bar

Vazão de fluido de corte regulada nos ensaios: 25 ml/h por bico (2 bicos total)

7.1.7. Descrição dos fluidos de corte utilizados

Emulsão

Fluido sintético solúvel em água

Bardahl Maxlub Recut 2

Fabricante: Promax Produtos Máximos S.A. Indústria e Comércio

Minimização

Óleo de origem vegetal

IT Micro 4300

Fabricante: I.T. Chemisch-technische Produkte GmbH, Alemanha

7.2. Composição Química das Ferramentas de Aço-Rápido e Corpos de Prova Utilizados

Tipo de aço-rápido			Composição química [%]					
ISO	AISI	Designação	C	W	Mo	V	Co	Cr
S4	M2	HS 6-5-2	0,82-0,92	5,70-6,70	4,60-5,30	1,70-2,20	--	3,50-4,50
S8	M35	HS 6-5-2-5	0,85-0,95	5,70-6,70	4,60-5,30	1,70-2,20	4,70-5,20	3,50-4,50

Tabela 7.1 - Composição química padronizada dos aços-rápidos utilizados [62]

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	Co	V
Composição [%]	0,40	0,23	0,81	0,019	0,022	0,16	0,10	0,02	0,01	0,01	0,002

Tabela 7.2 - Composição química básica do aço ABNT 1040, fornecida pelo fabricante

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Composição [%]	0,40	0,40	1,4	0,030	0,010	1,9	0,2

Tabela 7.3 - Composição química básica do aço DIN 40CrMnMo7 [15]

7.3. Médias e Desvio-Padrão de F_{xy} e θ para os Ensaio de Força EF

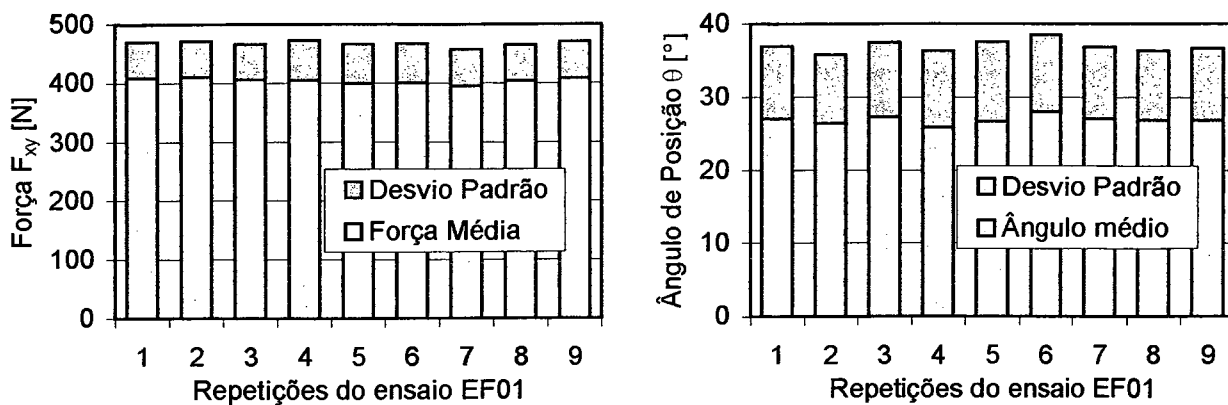


Figura 7.1 - Média e desvio-padrão de F_{xy} e θ para as repetições do ensaio EF01

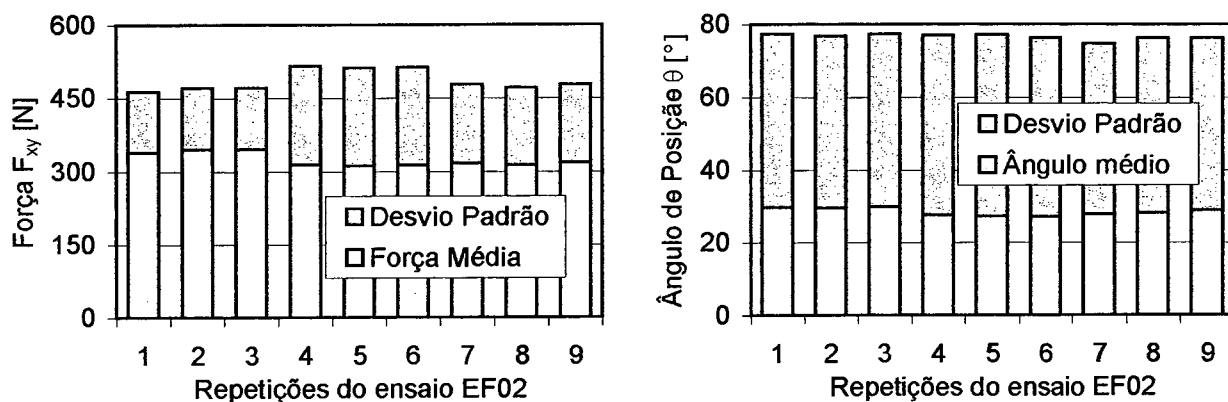


Figura 7.2 - Média e desvio-padrão de F_{xy} e θ para as repetições do ensaio EF02

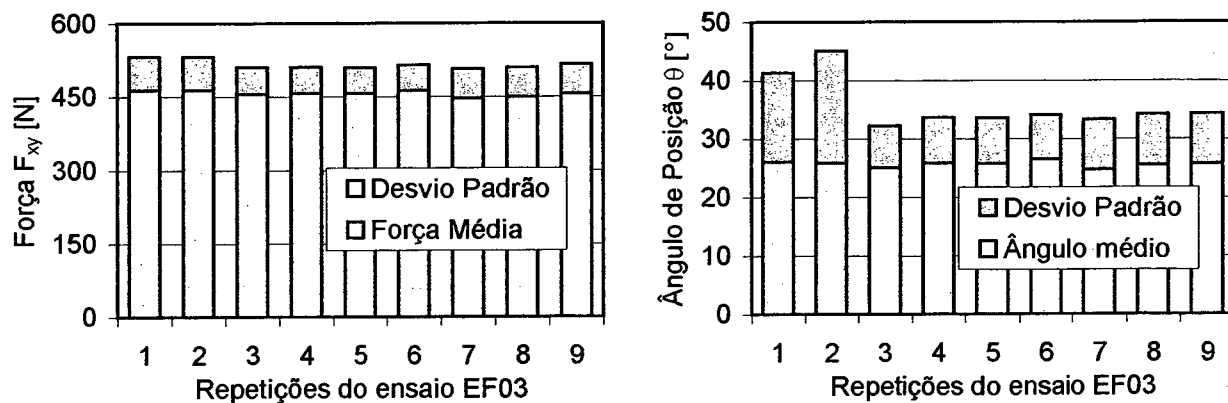


Figura 7.3 - Média e desvio-padrão de F_{xy} e θ para as repetições do ensaio EF03

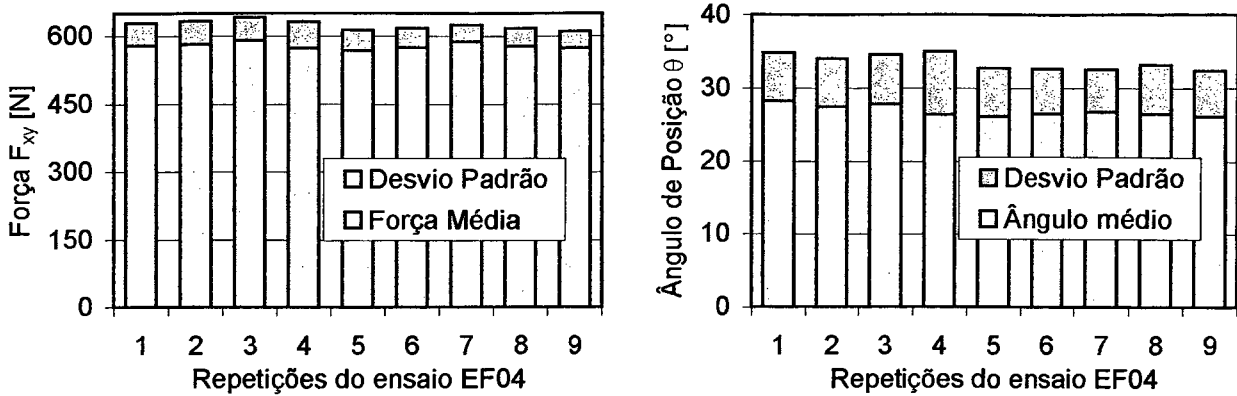


Figura 7.4 - Média e desvio-padrão de F_{xy} e θ para as repetições do ensaio EF04

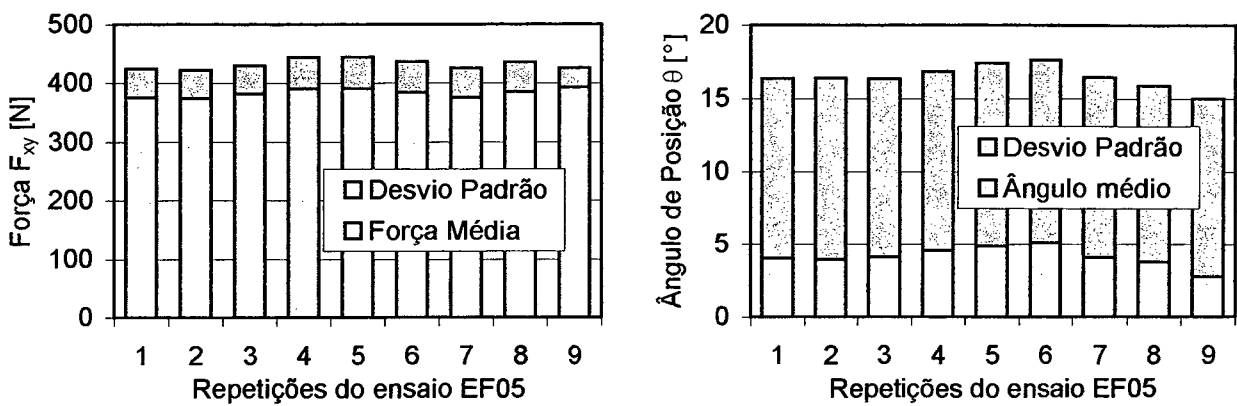


Figura 7.5 - Média e desvio-padrão de F_{xy} e θ para as repetições do ensaio EF05

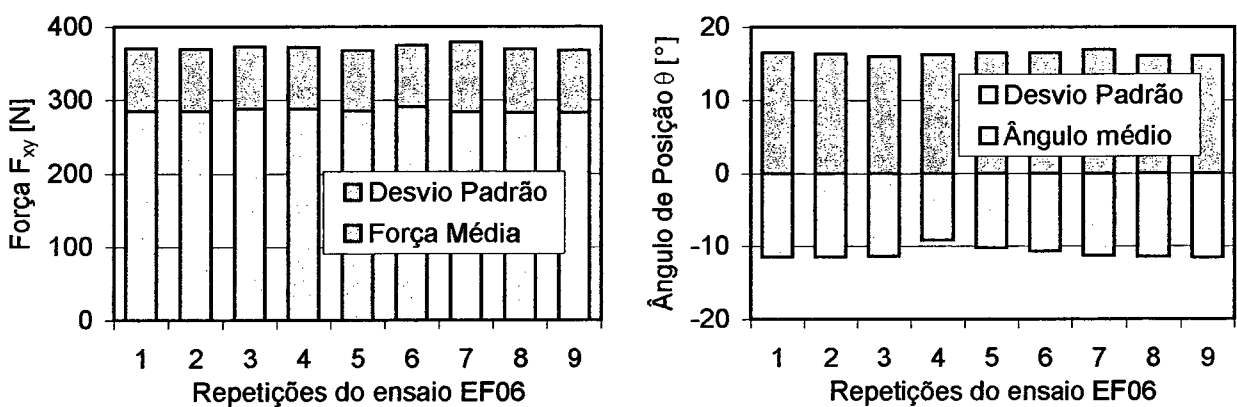


Figura 7.6 - Média e desvio-padrão de F_{xy} e θ para as repetições do ensaio EF06

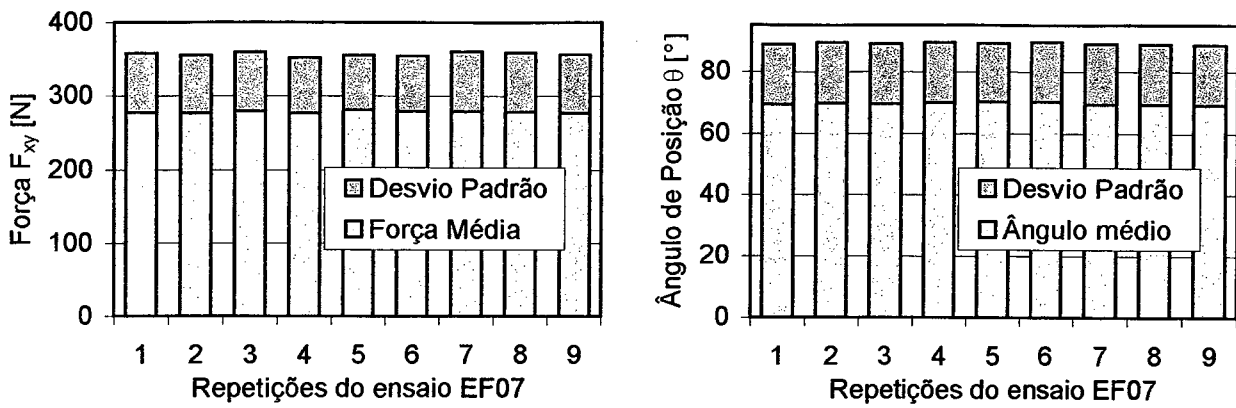


Figura 7.7 - Média e desvio-padrão de F_{xy} e θ para as repetições do ensaio EF07

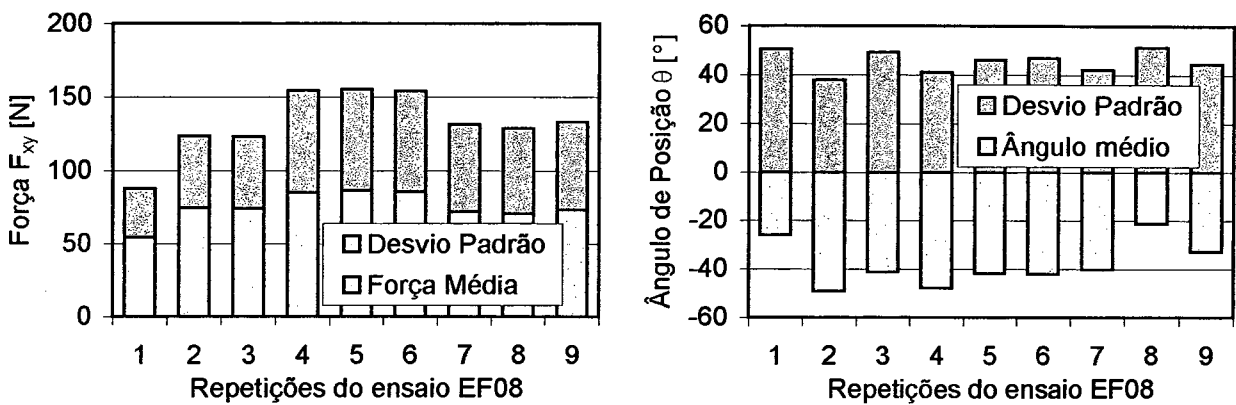


Figura 7.8 - Média e desvio-padrão de F_{xy} e θ para as repetições do ensaio EF08

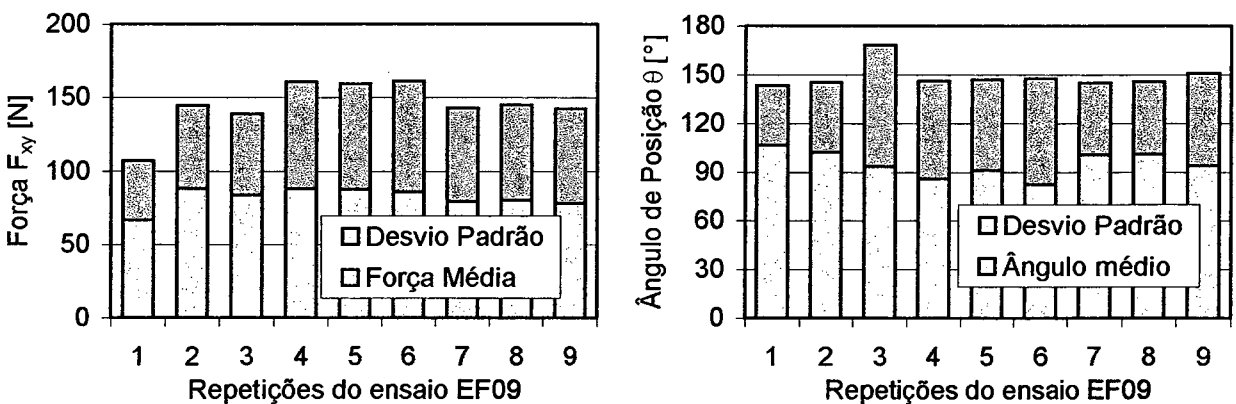


Figura 7.9 - Média e desvio-padrão de F_{xy} e θ para as repetições do ensaio EF09

7.4. Médias e Desvio-Padrão do Desgaste do Flanco Principal para os Ensaio de Desgaste ED

Ensaio	Fluido de corte	Material fresa	v_c [m/min]	Desgaste médio [mm]	Desvio-Padrão [mm]
ED01	Seco	S4	25	0,26	0,01
ED02	Seco	S4	50	-	-
ED03	Emulsão	S4	25	0,21	0,01
ED04	Emulsão	S4	50	0,13	0,02
ED05	Minimização	S4	25	0,20	0,04
ED06	Seco	S8	25	0,27	0,04

Tabela 7.4 - Resultados das medições de desgaste para os ensaios ED (média e desvio-padrão)

No ensaio ED02 ocorreu o colapso total da ferramenta impedindo a medição do desgaste final.

7.5. Comparações entre os Ensaios com Altas Velocidades de Corte

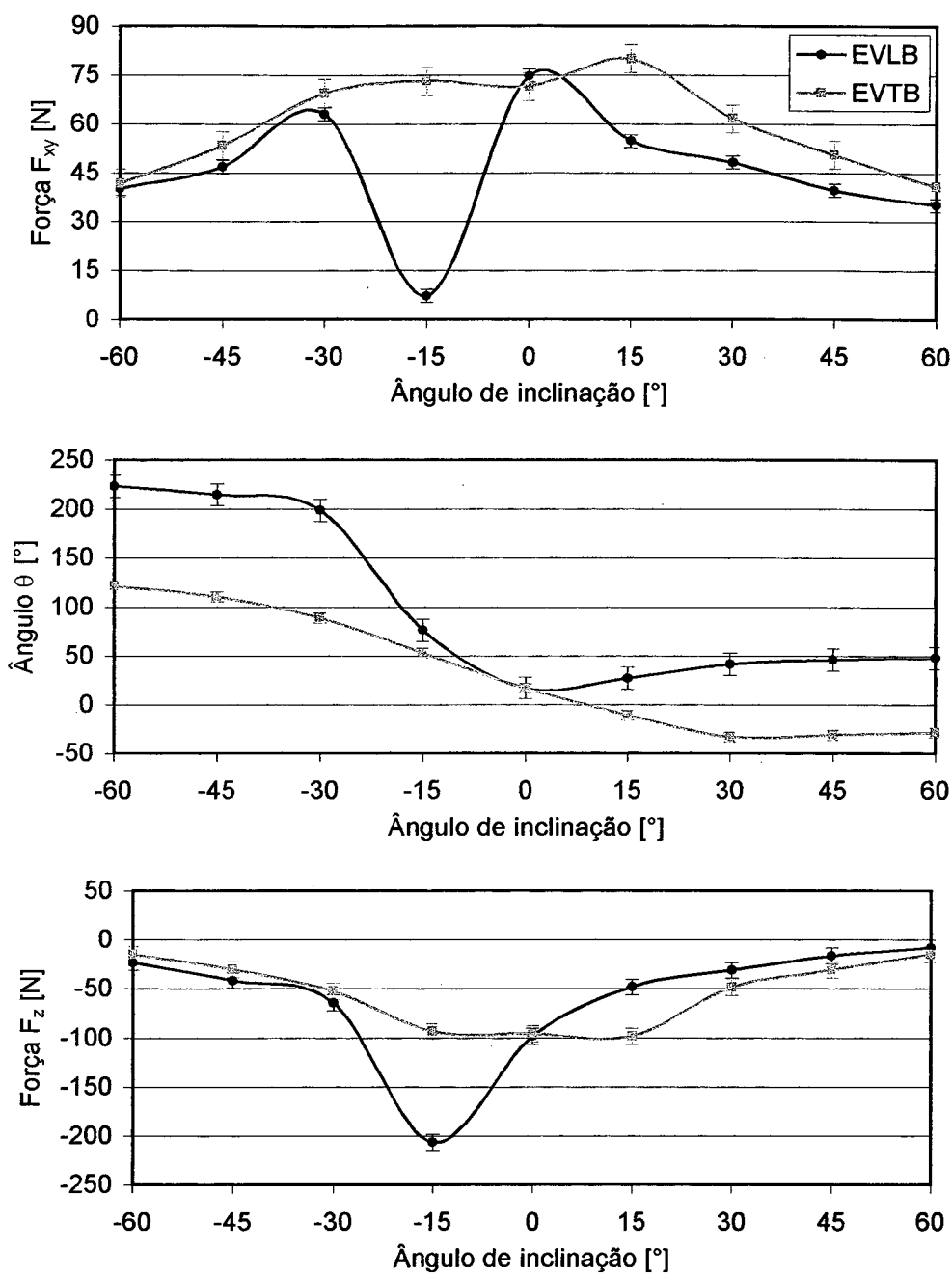


Figura 7.10 - Comparações entre os ensaios EVLB e EVTB
(EVLB - inclinação longitudinal e fresamento combinado;
EVTB - inclinação transversal e fresamento combinado)

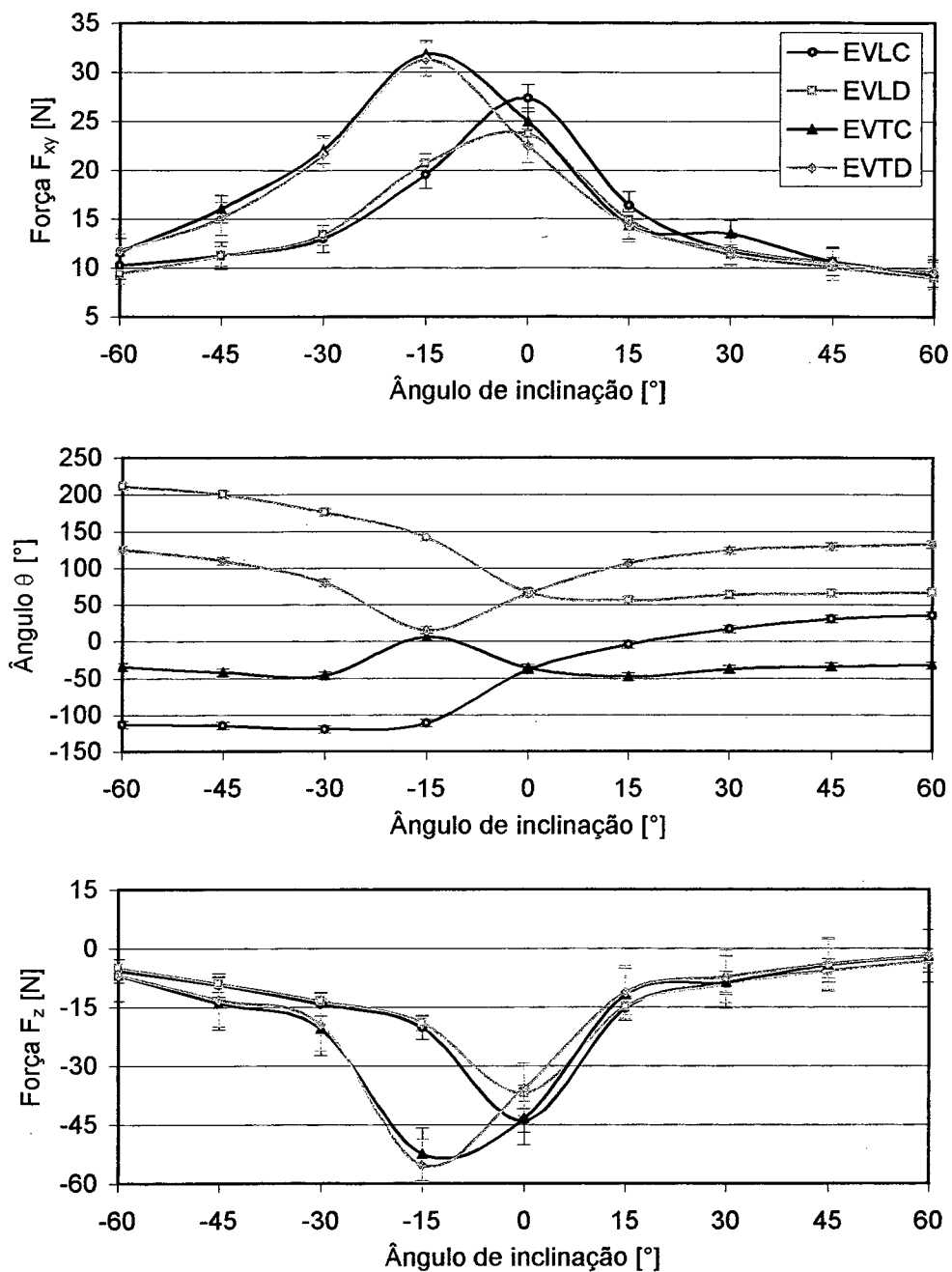


Figura 7.11 - Comparações entre os ensaios EVLC, EVLD, EVTC e EVTD

(EVLC - inclinação longitudinal e fresamento concordante;

EVLD - inclinação longitudinal e fresamento discordante;

EVTC - inclinação transversal e fresamento concordante;

EVTD - inclinação transversal e fresamento discordante)