

**ALEXANDRE MORI SAITO
ROBERTO YUDHI TANAKA**

Dez (1995)



**MODELAGEM DAS FORÇAS DE CORTE PARA A
APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO DO DESGASTE DA
FERRAMENTA EM FRESAMENTO DE TOPO**

Trabalho de Formatura apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção da
Graduação em Engenharia

São Paulo
2002

**ALEXANDRE MORI SAITO
ROBERTO YUDHI TANAKA**

**MODELAGEM DAS FORÇAS DE CORTE PARA A
APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO DO DESGASTE DA
FERRAMENTA EM FRESAMENTO DE TOPO**

Trabalho de Formatura apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção da
Graduação em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

São Paulo
2002

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção da Graduação em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer o professor Gilmar Ferreira Batalha por ter nos convidado, sugerido o tema e ser o nosso orientador, ao pós-graduando Cesar Abraham Flores Cisneros, o qual está participando do projeto e orientou as nossas pesquisas, ao professor João Paulo Marcicano, ao professor Marco Stipkovic, pelo empenho em nos fornecer meios de realizar a pesquisa, à Escola de Engenharia Mauá pelo apoio ao trabalho, à técnica do Laboratório de Metalografia da Escola de Engenharia Mauá Margarete Cristina Moreira pela ajuda durante o processo de medição de desgaste e ao aluno de Graduação da Escola Politécnica Guilherme Rossi pela paciência e suporte durante o tempo de pesquisa.

RESUMO

A otimização do tempo de troca da ferramenta proporcionada pelo seu monitoramento durante o processo de usinagem é tão importante quanto desejável comercialmente. Um sistema que obtenha dados e permita prever a condição da ferramenta sem que necessite interromper o processo de usinagem é um requisito fundamental para o diagnóstico, controle e otimização do processo.

Muitos estudos estão sendo feitos nessa área com ênfase no monitoramento indireto da ferramenta, assim, o presente trabalho visa apresentar um modelo de predição das forças de corte na operação de fresamento de topo que auxilie futuros trabalhos cujo objetivo seja o desenvolvimento de sistemas de monitoramento da condição da ferramenta em um processo de fresamento. Para tanto, além do desenvolvimento do modelo de predição das forças de corte, foi feita uma análise do processo de fresamento, dos mecanismos de desgaste envolvidos e das forças durante a usinagem.

O resultado obtido por meio do modelo desenvolvido permite a obtenção tanto de mapas de força de usinagem em função do tempo como de mapas de K_s em função do tempo, para determinados pares peça/ferramenta.

Palavras-chave: modelo de força de corte, fresamento de topo, desgaste, monitoramento.

ABSTRACT

In machining processes monitoring an optimization of the time for tool changing is very important for the process improvement, and therefore commercially desired. In this sense a data acquisition system that permits to predict the tool condition without the necessity of interrupt the machining process becomes a fundamental requisite for the process diagnostic, control and optimization. This study aimed to present a predictive model for instantaneous cutting forces in the end milling process. The developed model has as goal to be useful for a joint research whose subject is the development of tool condition monitoring systems for end milling processes. First of all this work make a short review of previous investigations on the indirect monitoring of the tool condition and cutting geometry and position in end milling processes. It is carried out also a fundamental characterizing for end mill tools and operations, as well as reviewed the importance of the characterization of the wear mechanisms involved and its possible correlation with the predicted cutting forces during end milling machining. The achieved results by the developed model allowed for the establishment of cutting force's maps versus machining time as well as the prediction of maps for the cutting force per unit of area of a cut (K_s) versus machining time for an end milled workpiece / tool pair.

Keywords: cutting force, end milling, machining, wear, monitoring.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
2 USINAGEM	4
2.1 Fresamento	4
2.2 Parâmetros de Usinagem	8
2.2.1 Velocidades.....	8
2.2.2 Grandezas de Corte.....	8
2.3 Mecanismo de Formação de Cavaco	9
2.3.1 Tipos de Cavacos.....	10
2.3.2 Formas de Cavaco.....	11
2.4 Taxa de Remoção de Material	13
3 FRESA DE TOPO	14
3.1 Geometria	16
3.1.1 Função, Influência e Grandeza dos Diversos Ângulos da Ferramenta.....	17
3.2 Tipos de Material	26
4 DESGASTE	27
4.1 Desgaste e Avarias	27
4.2 Mecanismos de Desgaste de Ferramenta	30
4.2.1 Aresta Postiça de Corte.....	30
4.2.2 Abrasão Mecânica.....	32
4.2.3 Aderência.....	32
4.2.4 Difusão.....	33
4.2.5 Oxidação.....	33
4.3 Desgaste em Fresas de Topo	34
4.3.1 Desgaste de flanco (<i>VB</i>).....	34

4.3.2	Desgaste da superfície de saída (<i>KT</i>)	36
4.3.3	Lascamento (<i>CH</i>)	37
4.3.4	Descamação (<i>FL</i>).....	38
4.3.5	Trincas (<i>CR</i>).....	39
4.3.6	Falha catastrófica (<i>CF</i>).....	40
4.4	Vida da Ferramenta.....	41
4.5	Como os Parâmetros de Usinagem Influenciam no Desgaste e na Vida da Ferramenta	42
4.6	Curva de Vida da Ferramenta	43
5	MEDIÇÃO DO DESGASTE	44
5.1	Medição dos Desgastes da Ferramenta	44
5.2	Medição Indireta.....	46
5.2.1	Medição por Força	46
5.2.2	Medição por Corrente e Potência.....	48
5.2.3	Medição por Vibração	48
5.2.4	Medição por Emissão Acústica.....	49
6	MODELAGEM DAS FORÇAS DE CORTE.....	50
6.1	Pressão Específica de Corte (K_s).....	50
6.1.1	Fatores que Influenciam a Pressão Específica de Corte	50
6.2	Linhas de Pesquisa Atuais.....	52
6.2.1	Modelo de Força Rígida Média e de Deflexão Estática	52
6.2.2	Modelo da Força Rígida Instantânea.....	53
6.2.3	Modelo de Força Rígida Instantânea e de Deflexão Estática	54
6.2.4	Força Instantânea com Deflexão Estática Realimentado	55
6.2.5	Modelo de Força Regenerativa e de Deflexão Dinâmica.....	56
6.3	Modelo Proposto	59
6.4	Simulação.....	63
7	RESULTADOS	65
7.1	Gráficos de Força vs. Posição Angular.....	65
7.2	Gráficos de Força vs. Tempo.....	67

8 DISCUSSÃO.....	69
9 CONCLUSÕES.....	73
10 TRABALHOS FUTUROS.....	73

-ANEXO-

ROTINA PARA PREDIÇÃO DAS FORÇAS DE FRESAMENTO

LISTA DE REFERÊNCIAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fresa tangencial.....	5
Figura 2. Fresa de topo de quatro dentes	5
Figura 3. Fresamento de topo	6
Figura 4. Fresamento tangencial.....	6
Figura 5. Fresamento discordante.....	7
Figura 6. Fresamento concordante.....	7
Figura 7. Fresadora horizontal	8
Figura 8. Fresadora vertical	8
Figura 9. Grandezas de corte.....	9
Figura 10. Formas do Cavaco	12
Figura 11. Fresamento lateral	15
Figura 12. Fresamento para rasgos	15
Figura 13. Furação.....	15
Figura 14. Fresa de topo de haste cilíndrica.....	16
Figura 15. Vista de frente do rebaixo do quebra cavacos.....	22
Figura 16. Raios de concordância do cavaco.....	23
Figura 17. Quebra-cavacos de rebaixo paralelo e angular	23
Figura 18. Quebra-cavacos de rebaixos modificados.....	24
Figura 19. Quebra-cavacos usados em ferramentas de aço rápido	25
Figura 20. Desgaste frontal	29
Figura 21. Desgaste de cratera	29
Figura 22. Deformação plástica da aresta de corte	30
Figura 23. Lascamento.....	30
Figura 24. Trincas de origem térmica	30
Figura 25. Trincas de origem mecânica	30
Figura 26. Quebra da ferramenta	30
Figura 27. Aresta postiça de corte.....	31
Figura 28. Desgaste frontal vs. velocidade de corte mostrando a região de formação da aresta postiça de corte	32
Figura 29. Desgaste em fresas de topo.....	34

Figura 30. Desgaste de flanco uniforme.....	35
Figura 31. Desgaste de flanco não uniforme.....	35
Figura 32. Desgaste de flanco localizado.....	36
Figura 33. Desgaste de cratera.....	36
Figura 34. Desgaste em forma de escada.....	37
Figura 35. Lascamento uniforme.....	37
Figura 36. Lascamento não-uniforme.....	38
Figura 37. Lascamento localizado.....	38
Figura 38. Descamação.....	39
Figura 39. Trincas em forma de pente.....	39
Figura 40. Trincas paralelas.....	40
Figura 41. Trincas irregulares.....	40
Figura 42. Falha catastrófica.....	40
Figura 43. Mapa de desgaste.....	42
Figura 44. Desgaste da ferramenta em função da velocidade de corte para um determinado tempo de usinagem.....	43
Figura 45. Desgastes da ferramenta.....	44
Figura 46. Modelo de força rígida instantânea na fresa de topo.....	54
Figura 47. Modelo de força regenerativa e de deflexão dinâmica.....	57
Figura 48. Identificação dos eixos x, y e z.....	59
Figura 49. Forças de corte: tangencial e radial.....	59
Figura 50. Profundidade de corte $a(\phi)$	60
Figura 51. Decomposição da força tangencial.....	61
Figura 52. Decomposição da força radial.....	62
Figura 53. Gráfico da força no eixo x.....	65
Figura 54. Gráfico da força no eixo y.....	66
Figura 55. Gráfico da força no eixo z.....	66
Figura 56. Gráficos de Força vs. Posição Angular nas direções dos eixos cartesianos.....	67
Figura 57. Gráfico de Força no Eixo x vs. Tempo.....	67
Figura 58. Gráfico da Força no Eixo y vs. Tempo.....	68
Figura 59. Gráfico da Força no Eixo z vs. Tempo.....	68

Figura 60. Gráfico de Força vs. Posição Angular do modelo para fresa de topo helicoidal	69
Figura 61. Gráfico de Força vs. Posição Angular para fresa de topo helicoidal cônica de ponta esférica	70
Figura 62. Gráfico de Força vs. Posição Angular para fresa de topo helicoidal cilíndrica de ponta esférica.....	70
Figura 63. Gráfico de Força vs. Tempo para fresa de topo helicoidal cilíndrica de ponta tipo "bull nose"	71
Figura 64. Perfis das fresas de topo helicoidais	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

γ	Ângulo de saída
λ	Ângulo lateral de saída (ângulo da hélice)
ϕ	Posição angular instantânea de um ponto de referência na ferramenta
ω	Velocidade angular da ferramenta
γ'_p	Ângulo de saída do corte de topo
α'_{p1}	Ângulo de folga principal do corte de topo
α'_{p2}	Ângulo de folga secundário do corte de topo
κ'_r	Ângulo de concavidade da aresta do corte de topo
α_{03}	Ângulo de folga secundário do corte lateral
α_f	Ângulo de incidência lateral
γ_f	Ângulo de saída lateral
α_n	Ângulo de incidência principal
α'_n	Ângulo de incidência secundário
γ_o	Ângulo de saída do corte lateral
ε_r	Ângulo de quina
Δt	Variação de tempo
3D	Nas três dimensões (x, y e z)
a_e	Espessura de penetração
a_p	Profundidade ou largura de corte
APC	Aresta Postiça de corte
$b_{\alpha 1}$	Largura do filete cilíndrico
$b_{\alpha 2}$	Largura da superfície detalonada
b_c	Largura do cavaco
C	Coefficiente ajuste da força axial
c	Coefficiente de amortecimento
CF	Falha catastrófica
CH	Lascamento
CH1	Lascamento uniforme

CH2	Lascamento não-uniforme
CH3	Lascamento localizado
CR	Trincas
CR1	Trincas em forma de pente
CR2	Trincas paralelas
CR3	Trincas irregulares
d_1	Diâmetro do corte
d_2	Diâmetro da haste
E	Eficiência da transmissão
f	Avanço
F_A	Componente axial da força de corte
F_A^x	Componente na direção do eixo x de F_A
F_A^y	Componente na direção do eixo y de F_A
F_c	Força de corte
FL	Descamação
F_T	Componente tangencial da força de corte
F_{Tt}	Componente paralela ao plano xy de F_T
F_{Tt}^x	Componente na direção do eixo x de F_{Tt}
F_{Tt}^y	Componente na direção do eixo y de F_{Tt}
F_T^z	Componente na direção axial de F_T
F^x	Componente na direção do eixo x da força de corte total que atua sobre a peça
F^y	Componente na direção do eixo y da força de corte total que atua sobre a peça
f_z	Avanço por dente
F^z	Componente na direção do eixo z da força de corte total que atua sobre a peça
h_i	altura de um ponto sobre a aresta de corte i
HSS	<i>High Speed Steel</i> (Aço rápido)
K e x	Constantes de Taylor
k	Coefficiente de rigidez
KB	Largura de cratera

KM	Distância do centro da cratera à aresta de corte
K_s	pressão específica de corte
KT	Desgaste da superfície de saída
KT1	Desgaste de cratera
KT2	Desgaste em forma de escada
kW_m	Potência nominal do motor
l_1	Comprimento total
l_2	Comprimento do corte
l_3	Comprimento da haste
n	Rotação por minuto
P	"Unit Power"
Pot	Potência
Pot_{sp}	Potência específica
Q	Taxa de remoção de material
R	Raio da ferramenta
RMS	Raiz Quadrada Média
T	Torque
VB	Largura do desgaste de flanco
VB1	Desgaste de flanco uniforme
VB2	Desgaste de flanco não-uniforme
VB3	Desgaste de flanco localizado
VB_{max}	Largura máxima do desgaste de flanco
v_c	Velocidade de corte
v_f	Velocidade de avanço
v_t	Velocidade tangencial de corte
z	Número de dentes
z_i	Deflexão normal à superfície de corte da ferramenta

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

As operações de usinagem - fresamento, torneamento, retificação etc. - são largamente utilizadas na manufatura de peças e objetos metálicos constituem uma grande parte dos custos e influenciam diretamente na qualidade do produto.

O fresamento destaca-se, entre outros processos de usinagem utilizados na indústria mecânica manufatureira, pela sua grande versatilidade e por proporcionar altas taxas de remoção de cavaco, sendo o segundo processo mais usado no meio industrial [1].

O monitoramento da condição da ferramenta que está executando uma usinagem traz benefícios, como a redução do custo devido a trocas prematuras da ferramenta (por utilizar menos ferramentas) e acarretaria menor frequência de paradas da máquina, (diminuindo a perda de tempo para a troca e ajuste da ferramenta na máquina). A troca tardia da ferramenta pode acarretar perda da qualidade, retrabalho ou mesmo refugo do produto, ou ainda levar à destruição não só da ferramenta não trocada, mas também das ferramentas subseqüentes ou até a danificação da própria máquina.

O desenvolvimento de sistemas que efetuem o monitoramento da condição das ferramentas de usinagem se faz necessário para que, integrando-se aos mecanismos de controle da produção, forneça informações relevantes como o nível de desgaste das ferramentas ou a quebra da ferramenta permitindo que, desta forma, os mecanismos de controle numérico possam ajustar os parâmetros de produção para as novas condições de usinagem ou indicar a necessidade de substituição da ferramenta. Assim, se tem um controle de produção em que haveria trocas de informações, ou seja, o controle numérico (CNC) controlando a produção e o dispositivo de monitoramento da condição da ferramenta fornecendo informações ao controle numérico para que este ajuste os parâmetros do

processo em razão de desgaste ou quebra da ferramenta. Portanto, uma otimização do tempo de troca da ferramenta proporcionada pelo seu monitoramento durante o processo de usinagem é tão importante quanto desejável comercialmente.

Existem vários trabalhos acadêmicos apresentando diferentes sistemas e metodologias para o monitoramento do desgaste da ferramenta para o fresamento por medição direta [2, 3, 4, 5, 6] e por medição indireta, com maior destaque utilizando emissão acústica [7, 8, 9, 10] e força [11, 12, 13, 14, 15, 16] para a medição, mas poucos apresentam aplicabilidade na indústria [17].

Pode-se comprovar a sua importância e também a sua viabilidade na prática observando a existência de empresas que oferecem sistemas para o monitoramento da condição da ferramenta (utilizando a sigla TCM - *Tool Condition Monitoring*) como a Promess [18], de Michigan, nos EUA; a Prometec [19] de Aachen, na Alemanha e a Sensis [20], localizada na cidade de São Carlos, no Brasil.

1.2 Objetivos

Com o intuito de participar de um estudo em desenvolvimento na Escola Politécnica da USP cujo tema é o "Monitoramento do Desgaste em Ferramentas de Fresamento de Topo", foi proposto a execução de um trabalho que apresentasse um modelo matemático para a previsão das forças de corte do processo de fresamento de topo. O modelo seria, então, comparado a um caso prático, no qual seria feita a medição das forças de corte por meio de uma mesa dinamométrica e também a medição de sinais de emissão acústica durante o processo de corte por meio de sensores, de forma a ajudar o entendimento e a validação dos resultados da medição do desgaste pelos dois métodos.

Portanto, este presente trabalho apresenta um modelo com parâmetros que podem se aplicáveis ao processo de usinagem em estudo e também apresenta informações pertinentes ao tema "Monitoramento do

Desgaste em Ferramentas de Fresamento de Topo" que servirão, então, de apoio ao estudo em andamento.

2 USINAGEM

Usinar é remover material de uma peça na forma de cavaco, sendo que, se a peça a usinar é composta por material metálico, a usinagem pode ser chamada de usinagem dos metais. A grande maioria dos produtos manufaturados requer uma operação de usinagem em algum ponto de seu processo de fabricação, sendo que esta usinagem pode variar desde a remoção de material sem nenhuma precisão até processos de usinagem que utilizam tolerâncias de 1 micron. Daí o fato de a usinagem ser considerada o mais importante dos processos de manufatura básicos.

Devido à sua alta complexidade, os processos de usinagem têm sido alvo de inúmeros estudos e pesquisas para melhor entendê-los. A sua complexidade se deve principalmente aos seguintes fatores:

- diferentes materiais se comportam de maneira distinta;
- o nível de tensão é muito elevado;
- a taxa de tensão é alta;
- o processo é sensível a muitos fatores, entre eles, a variações no diâmetro da ferramenta, material da ferramenta, temperatura, fluidos de corte e vibrações.

Um ciclo de usinagem corresponde ao conjunto de operações realizadas em uma peça, podendo se resumir a uma única operação. Neste caso o ciclo pode ser dividido em três eventos básicos: aproximação da ferramenta, usinagem efetiva da peça e afastamento da ferramenta. [21]

2.1 Fresamento

O fresamento ou fresagem é a operação de usinagem com remoção de cavaco que possui as seguintes características:

- a ferramenta utilizada, a fresa, é multicortante, possuindo arestas de corte dispostas simetricamente em torno de um eixo (Figura 1 e Figura 2);
- o movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor do seu eixo;

- o movimento de avanço é geralmente feito pela própria peça, que está presa à mesa da máquina.

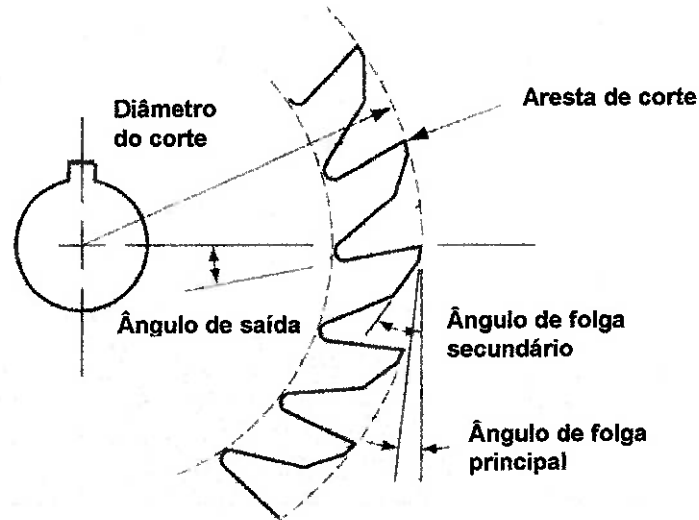


Figura 1. Fresa tangencial [22]

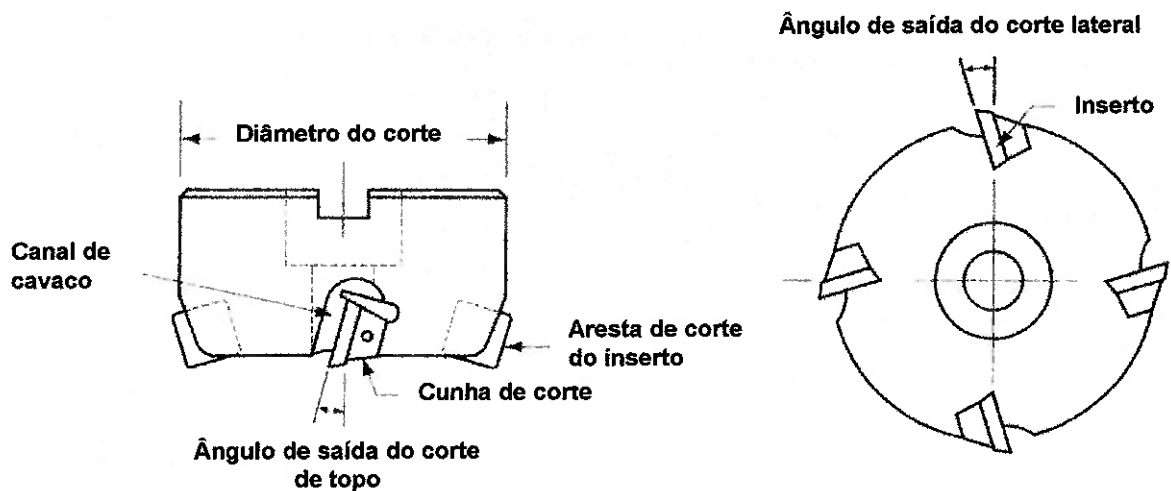


Figura 2. Fresa de topo de quatro dentes [22]

A característica que distingue a operação de fresamento da operação de furação é a orientação entre o eixo da ferramenta e o eixo de avanço: no fresamento estes eixos são perpendiculares enquanto que na furação são paralelos.

A operação de fresamento normalmente gera superfícies planas, mas pode gerar outras formas, dependendo do formato da ferramenta. Devido à

grande variedade de formatos de ferramentas possíveis e à alta taxa de produção, o fresamento é um dos mais versáteis e utilizados processos de usinagem.

Há dois tipos básicos de operações de fresamento:

- fresamento de topo ou frontal (Figura 3): no fresamento de topo o eixo da ferramenta é perpendicular à superfície da peça a ser usinada. O cavaco possui espessura regular e a máquina é pouco exigida, pois a força é distribuída em vários dentes da fresa. O acabamento superficial é melhor que o conseguido com o fresamento tangencial e o volume de cavaco retirado por tempo, bem maior. As ferramentas utilizadas são as fresas frontais ou de topo.
- fresamento tangencial (Figura 4): neste tipo de fresamento o eixo da fresa está paralelo à superfície a ser usinada. O cavaco possui forma de vírgula e é exigido um grande esforço da máquina e da ferramenta, sendo que não se consegue baixa rugosidade no acabamento superficial. As ferramentas utilizadas são chamadas de fresas cilíndricas ou tangenciais;

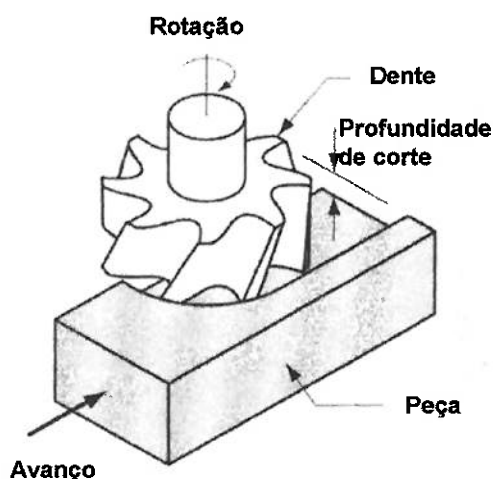


Figura 3. Fresamento de topo [22]

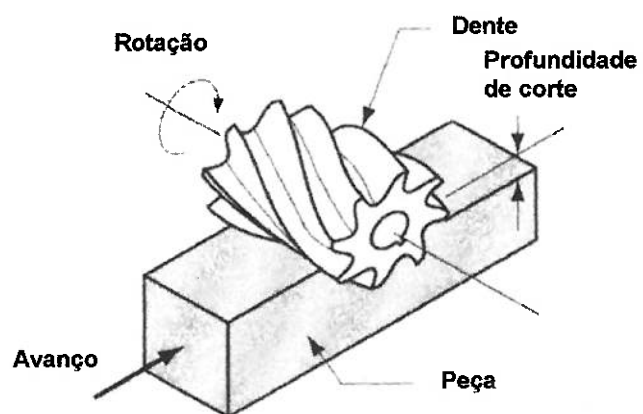


Figura 4. Fresamento tangencial [22]

No fresamento tangencial o sentido de rotação da ferramenta e o sentido de avanço da peça podem ser combinados de duas formas, gerando dois processos de fresamento diferentes, o fresamento com movimento discordante (Figura 5) e o fresamento com movimento concordante (Figura 6).

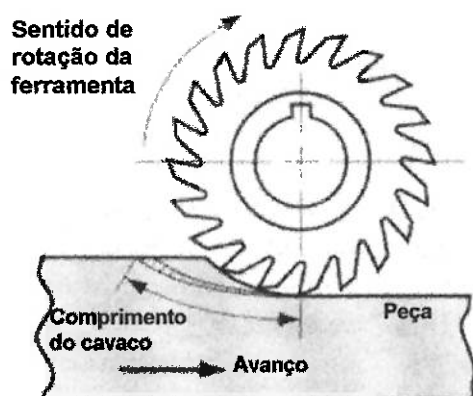


Figura 5. Fresamento discordante [22]

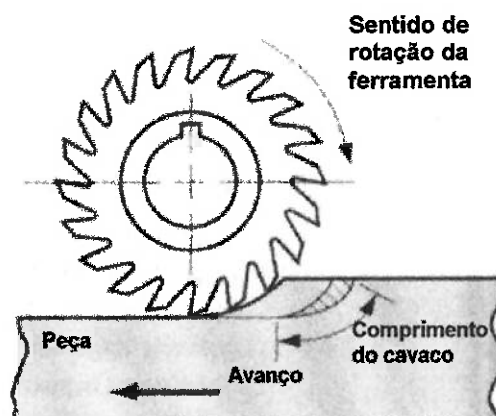


Figura 6. Fresamento concordante [22]

No fresamento com movimento discordante o avanço da peça é contrário ao sentido de rotação da fresa. Em virtude da maior espessura dos cavacos na saída dos dentes e das vibrações conseqüentes não se consegue bom acabamento. O volume de cavaco retirado por tempo é pequeno. O sentido das forças de corte tende a "arrancar" a peça da mesa da máquina.

Já no fresamento com movimento concordante o avanço da peça tem o mesmo sentido da rotação da fresa, o corte do material é mais acentuado no início, o que oferece um acabamento melhor que o conseguido com o movimento discordante. O sentido das forças de corte tende a fixar a peça à mesa da máquina.

As fresadoras podem ser classificadas segundo a posição do seu eixo árvore em fresadoras horizontais (Figura 7) e fresadoras verticais (Figura 8). [23]

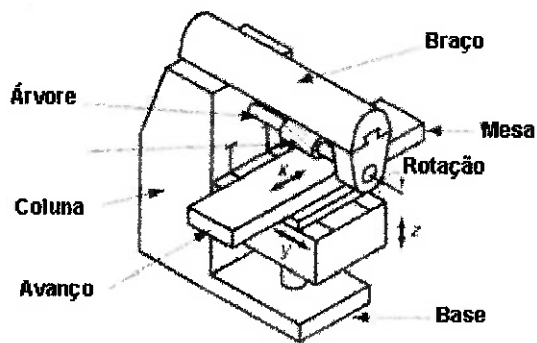


Figura 7. Fresadora horizontal [22]

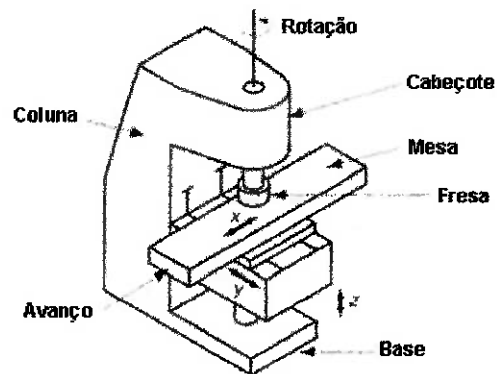


Figura 8. Fresadora vertical [22]

2.2 Parâmetros de Usinagem

A seguir são apresentados os parâmetros de usinagem¹ mais relevantes para o processo de fresamento.

2.2.1 Velocidades

- Velocidade de corte (v_c): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e o sentido de corte;
- Velocidade de avanço (v_f): é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço. [24]

2.2.2 Grandezas de Corte

Grandezas de corte são as grandezas que devem ser ajustadas na máquina direta ou indiretamente para a retirada do cavaco:

- Avanço (f): é o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso;
- Avanço por dente (f_z): é o percurso de avanço de cada dente, medido na direção do avanço da ferramenta;

¹ As simbologias utilizadas seguem a norma técnica NBR 6162/89, porém a nomenclatura segue a referência bibliográfica indicada [24]

- Profundidade ou largura de corte (a_p): é a profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho. No fresamento de topo, a_p corresponde à largura de corte (Figura 9);
- Espessura de penetração (a_e): é a espessura de corte em cada curso ou revolução, medida no plano de trabalho e numa direção perpendicular à direção de avanço (Figura 9) [24].

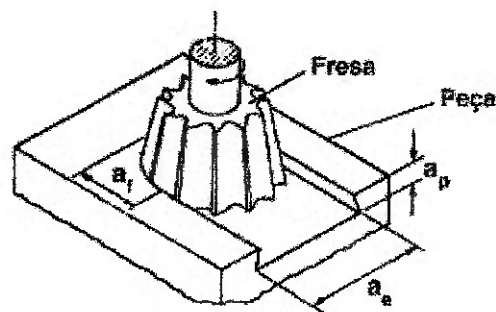


Figura 9. Grandezas de corte [23]

2.3 Mecanismo de Formação de Cavaco

No processo de formação de cavaco, as velocidades e as deformações que ocorrem são muito grandes. Nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro ou de aço rápido, a formação de cavaco se processa da seguinte forma:

- Durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção de material (ainda solidária à peça) é recalçada contra a superfície de saída da ferramenta;
- O material recalçado sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento (sem que haja com isso uma perda de coesão) entre a porção de material recalçada e a peça. Este deslizamento se realiza segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção

de material recalcada. Durante a usinagem estes planos instantâneos irão definir uma certa região entre a peça e o cavaco, dita região de cisalhamento;

- Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo naturalmente da ductilidade do material e das condições de usinagem. Para os materiais altamente deformáveis, a ruptura se realiza somente nas imediações da aresta cortante, o cavaco originado é denominado cavaco contínuo. Para os materiais frágeis se origina o cavaco de cisalhamento ou de ruptura;
- Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto tal ocorre, uma nova porção de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno.

Do exposto conclui-se que o fenômeno da formação de cavaco, nas condições normais de trabalho com ferramenta de metal duro ou aço rápido é um fenômeno periódico, inclusive a formação do cavaco contínuo. Tem-se alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento, para cada pequena porção de material removido [24].

2.3.1 Tipos de Cavacos

Uma das classificações mais comuns consiste na subdivisão em três tipos de cavacos:

- a) Cavaco contínuo: Apresenta-se constituído de lamelas justapostas numa disposição contínua e agrupadas em grupos lamelares. O cavaco contínuo forma-se na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, com pequeno e médio avanço, não havendo

interferência devido à vibrações externas ou à variação de condições de atrito na superfície de saída da ferramenta. A velocidade de corte é geralmente superior a 60 m/min;

- b) Cavaco de cisalhamento: Apresenta-se constituído de grupos lamelares bem distintos e justapostos. Estes elementos de cavaco foram cisalhados na região de cisalhamento e parcialmente soldados em seguida. Forma-se quando houver diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, devido ao aumento da deformação, à heterogeneidade da estrutura metalográfica, ou à vibrações externas que conduzem às variações da espessura do cavaco. Este tipo de cavaco também se forma empregando-se grandes avanços, velocidades de corte geralmente inferiores a 100 m/min e ângulo de saída pequeno;
- c) Cavaco de ruptura: Apresenta-se constituído de fragmentos arrancados da peça usinada. Há uma ruptura completa do material em grupos lamelares (na região do cisalhamento), os quais permanecem separados. Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, tais como ferro fundido e latão [24].

2.3.2 Formas de Cavaco

Além dos três tipos de cavaco mencionados anteriormente, pode-se diferenciá-los quanto à sua forma. Certas formas de cavaco dificultam a operação de usinagem, prejudicam o acabamento superficial da peça e desgastam mais ou menos a ferramenta. Há quatro formas de cavaco (Figura 10) [24]:

- a) Cavaco em fita;
- b) Cavaco helicoidal;
- c) Cavaco espiral;
- d) Cavaco em lascas ou pedaços.

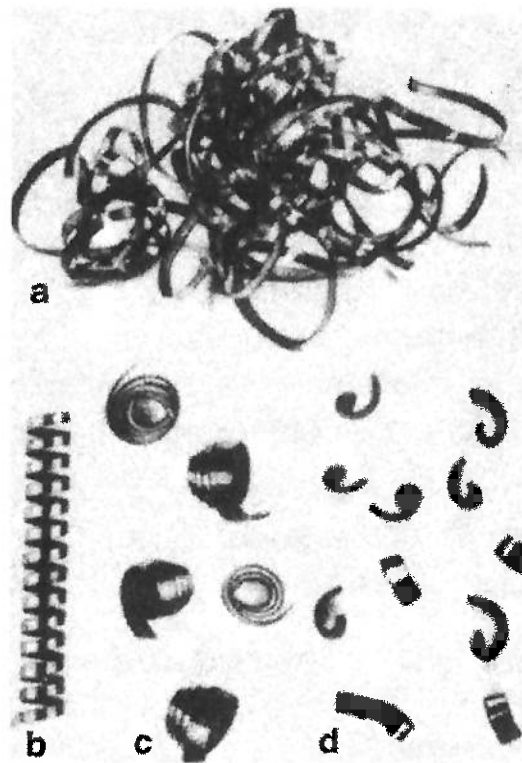


Figura 10. Formas do Cavaco. a) em fita; b) helicoidal; c) espiral; d) em lascas

O cavaco em fita pode provocar acidentes, ocupa muito espaço e é difícil de ser transportado. Geralmente a forma de cavaco mais conveniente é a helicoidal; o cavaco em lascas é preferido somente quando houver pouco espaço disponível ou quando o cavaco deve ser removido por fluido refrigerante.

Pode-se provocar a mudança na forma do cavaco sob diferentes maneiras [24]:

- a) Alterando-se as condições de usinagem;
- b) Dando-se uma forma especial à superfície de saída da ferramenta;
- c) Colocando-se elementos adicionais na superfície de saída.

2.4 Taxa de Remoção de Material

A taxa de remoção de material é a quantidade, em volume, de material usinado em um determinado tempo. Calculando a taxa de remoção de material que a potência da máquina permite (Eq. 1, [25]) e comparando com a taxa de remoção de material que será exigido para efetuar o processo de usinagem segundo os parâmetros de corte utilizados (Eq. 2, [25]), apresenta-se uma forma de verificar se a usinagem não ultrapassa o limite de potência da máquina.

$$Q = \frac{kW_m \cdot E}{P} \quad (1)$$

$$Q = \frac{a_e \cdot a_p \cdot f_z \cdot z \cdot n}{1000} \quad (2)$$

3 FRESA DE TOPO

As fresas de topo podem ser de corte à direita ou de corte à esquerda, com ranhuras retas ou em hélice direita ou hélice esquerda. Cortam tanto na periferia como na parte frontal, podendo ser usadas em fresadoras horizontais e verticais. São usadas para facear, ranhurar, executar bolsões, rebaixos, matrizes, gravações, rasgos de todos os tipos e tamanhos, fresar contornos [26] utilizando-se os métodos de aplicação: fresamento lateral, fresamento para rasgos, fresamento de topo e furação (Figura 11, Figura 12 e Figura 13) [27]. Se o corte se efetua simultaneamente na periferia e na parte frontal, a direção de corte e da hélice devem ter nomes iguais (usualmente corte à direita e hélice direita), pois desta forma os cavacos são puxados para cima, gerando-se porém uma força axial que tende a tirar a ferramenta de seu suporte (cone ou mandril). Neste caso, há necessidade de uma fixação eficiente, quer por um maior aperto no mandril, no caso de fresas de haste cilíndrica, quer por meio de um parafuso de fixação encaixado no furo roscado, existente para tal fim, na parte traseira das fresas de haste cônica.

Na fresamento de contornos, em que são usados apenas os gumes periféricos, as direções de corte e da hélice devem ser opostas, pois assim gera-se uma força axial que aumenta a fixação da fresa no cone de suporte.

A face frontal pode ser plana ou semi-esférica, como na fresa de matrizaria. O número de dentes depende do material a ser usinado, da forma da peça a ser gerada, assim como do diâmetro da ferramenta.

Um comprimento grande em balanço leva à instabilidade, especialmente flexão da ferramenta, que conduz a erros de forma da peça. [26]

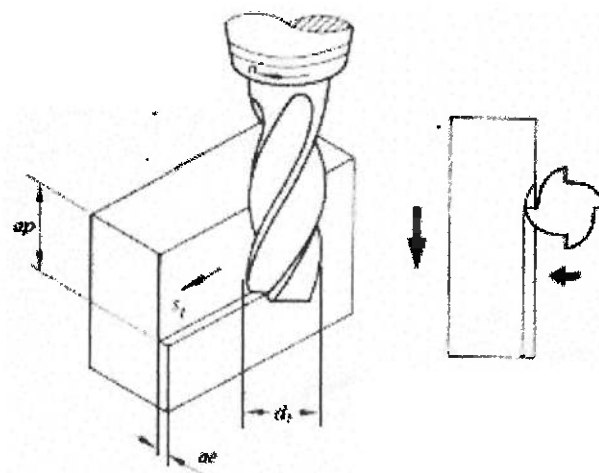


Figura 11. Fresamento lateral [27]

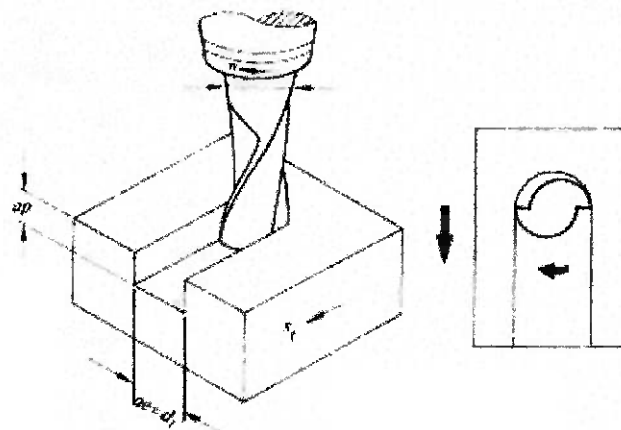


Figura 12. Fresamento para rasgos [27]

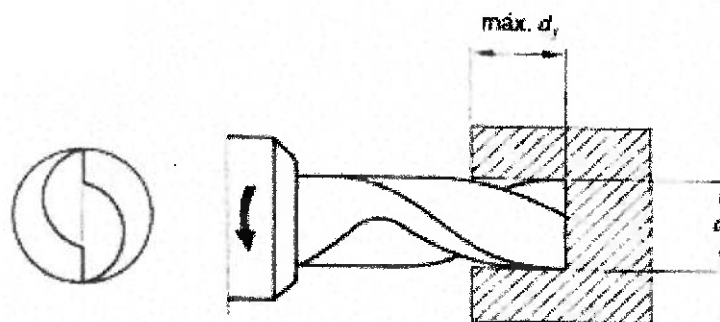


Figura 13. Furação [27]

3.1 Geometria

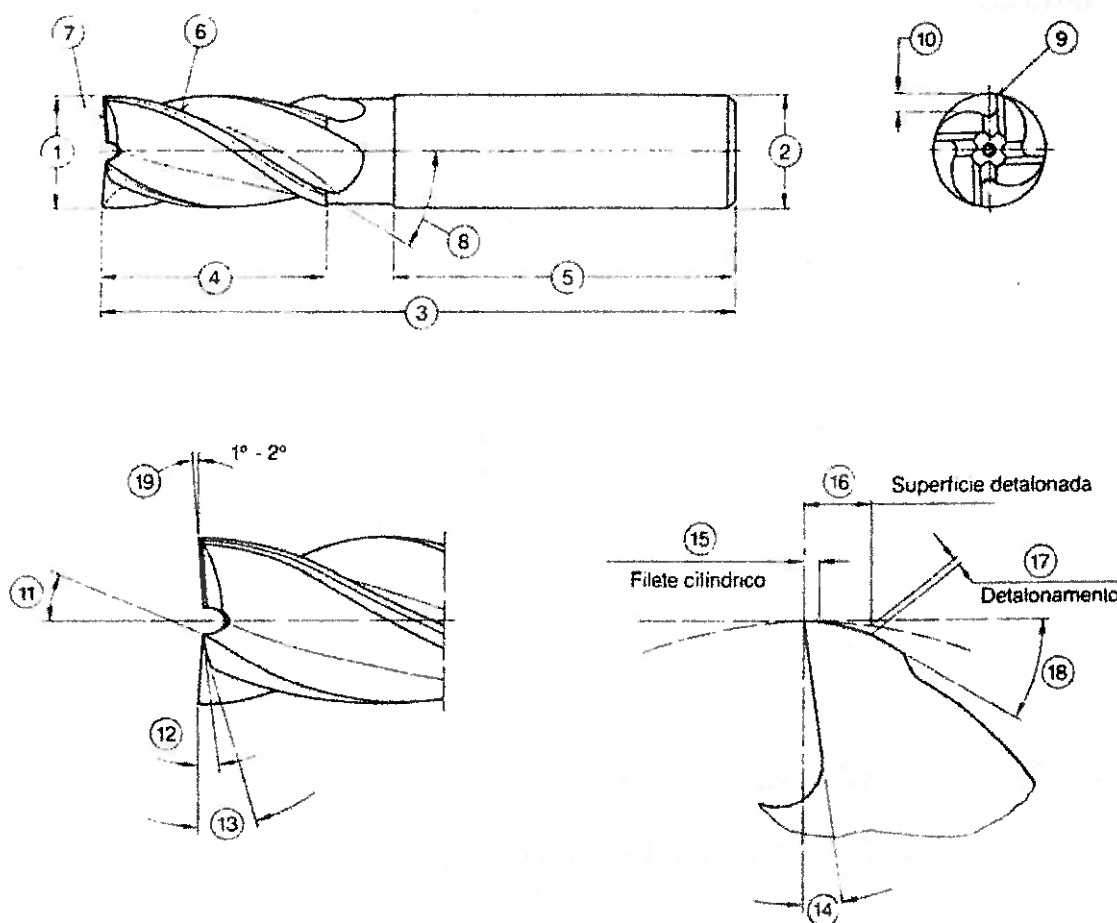


Figura 14. Fresa de topo de haste cilíndrica [26]

Os elementos dimensionais e os ângulos principais estão indicados na Figura 14 sendo²:

- | | |
|---|--|
| 1. diâmetro do corte (d_1) | 12. ângulo de folga principal do corte de topo (α'_{p1}) |
| 2. diâmetro da haste (d_2) | 13. ângulo de folga secundário do corte de topo (α'_{p2}) |
| 3. comprimento total (l_1) | 14. ângulo de saída do corte lateral (γ_0) |
| 4. comprimento do corte (l_2) | 15. largura do filete cilíndrico ($b\alpha_1$) |
| 5. comprimento da haste (l_3) | 16. largura da superfície detalonada ($b\alpha_2$) |
| 6. aresta de corte lateral | 17. valor do detalonamento |
| 7. aresta de corte de topo | 18. ângulo de folga secundário do corte lateral (α_{03}) |
| 8. ângulo lateral de saída (ângulo da hélice) (λ) | 19. ângulo de concavidade da aresta do corte de topo (κ'_r) |
| 9. dente | |
| 10. altura do dente | |
| 11. ângulo de saída do corte de topo (γ'_p) | |

² As nomenclaturas seguem o catálogo da SKF [27], porém as simbologias utilizadas seguem a referência [26]

3.1.1 Função, Influência e Grandeza dos Diversos Ângulos da Ferramenta

1. Ângulo de saída (γ):

Em fresas frontais (de topo) de metal duro deve-se observar especialmente o ângulo de saída ortogonal γ_o , que resulta dos ângulos de saída passivo γ_p (medido na direção axial), de saída lateral γ_f (medido na direção radial) e do ângulo de direção do gume κ_f .

Principalmente para facilitar a saída dos cavacos se empregam, freqüentemente, fresas frontais com ângulos de saída laterais γ_f negativos e ângulos de saída passivos γ_p positivos.

É um dos ângulos mais importantes da ferramenta, pois influi decisivamente na força e na potência necessárias ao corte, no acabamento da superfície usinada e no calor gerado.

Em princípio o ângulo de saída de cavaco deve ser o maior possível, pois isto determina uma retirada de cavaco mais fácil.

O ângulo de saída de cavaco depende dos seguintes fatores:

- a. Resistência do material da ferramenta de corte. Ferramentas de aço rápido (HSS) admitem ângulos de saída de cavaco maiores do que as de ligas fundidas ou de carbonetos;
- b. Resistência e dureza do material a usinar. Os materiais com maior resistência à compressão exercem mais pressão sobre a ferramenta, exigindo um menor ângulo de saída do cavaco;
- c. Quantidade de calor gerado pelo corte. Alguns materiais geram bastante calor ao serem usinados. Tais materiais requerem ferramentas de corte com pequenos ângulos de saída de cavaco, a fim de impedir que a temperatura próxima à aresta de corte se aproxime da temperatura de amolecimento do material da ferramenta;
- d. Aumento da velocidade de avanço. Maiores velocidades de avanço exigem menores ângulos de saída de cavaco. Para avanços muito pequenos faz-se, entretanto, o contrário, pois com

pequenos avanços a zona de pressão se situa muito próximo da aresta de corte fazendo com que esta sofra maior aquecimento e desgaste e porque o acabamento resulta melhor com ângulos de saída pequenos.

A utilização eficiente do metal duro no corte de materiais de difícil usinabilidade e em cortes interrompidos, como nas fresas, só se tornou possível com o emprego de ângulos de saída negativos. O efeito principal do ângulo de saída negativo é o de fazer com que a solitação do material perto do gume seja quase que exclusivamente de compressão.

Os inconvenientes do ângulo de saída negativo são: necessidade de maior força e potência de usinagem, maior calor gerado na ferramenta. [26]

2. Ângulo de direção do gume principal κ_1 :

Este ângulo tem as seguintes funções e vantagens:

- a. O ângulo de direção do gume principal distribui as tensões de corte favoravelmente no início e no fim do corte:

O emprego de um ângulo de direção menor do que 90° faz com que o corte se inicie afastado da quina da ferramenta, num lugar em que o gume é mais resistente e mais apto a aparar o impacto inicial. Além disso, o gume inicia o trabalho de modo gradual e uniforme. No caso de um ângulo de direção de 90° o corte se inicia subitamente em todo o gume. Igualmente, na saída da ferramenta, a súbita redução da força de avanço produz um retorno elástico da ferramenta e da peça, aumentando instantaneamente o avanço e a espessura do cavaco. Isto aumenta a pressão específica no gume da ferramenta, o que, muitas vezes, pode provocar a quebra ou lascamento do mesmo. No caso do emprego de um ângulo de direção menor, a saída da ferramenta é bem gradual.

- b. Diminui a espessura do cavaco e aumenta o comprimento atuante do gume:

O emprego de um pequeno ângulo de direção provoca:

- um cavaco mais fino e largo. A força de corte se distribui sobre um comprimento maior do gume, diminuindo a pressão específica sobre a ferramenta. Isto diminui, usualmente, o desgaste e aumenta, portanto, a vida da ferramenta;
 - permite aumentar o avanço de modo que a pressão específica na ferramenta seja mantida no máximo a que o gume pode resistir. Isto permite uma substancial redução no tempo de usinagem.
- c. Aumenta o ângulo de quina ε_r , aumentando sua resistência mecânica e a dissipação de calor;
- d. Produz uma força passiva na ferramenta, o que muitas vezes reduz a vibração:
- No caso de $\kappa_r = 90^\circ$, a força de avanço é paralela ao eixo longitudinal da peça, enquanto que para $\kappa_r < 90^\circ$ esta força pode ser decomposta em duas, com uma componente dirigida para a parte de trás da ferramenta. Esta força comprime a ferramenta contra as guias e o fuso, anulando as folgas e diminuindo o perigo de vibrações.
- e. Influi na direção de saída do cavaco.

Em fresas frontais recomenda-se usar a fresa com o menor ângulo κ_r possível segundo o tipo de serviço a realizar. Um menor ângulo de direção do gume faz com que:

- a. o corte se distribua ao longo de um maior comprimento do gume;
- b. diminua a espessura do cavaco para o mesmo avanço;
- c. maiores avanços sejam possíveis para a mesma pressão de corte sobre o gume da ferramenta;
- d. melhore a resistência mecânica da quina e aumente a capacidade de dissipação de calor.

Por outro lado, produz uma força direcionada transversalmente ao avanço, que pode deformar peças frágeis ou de paredes finas. Os ângulos de direção do gume principal em fresas de topo são usualmente de 45°, sendo também usados ângulos de 60°, 75° e até mais. [26]

3. Ângulo de incidência principal α_n :

A função do ângulo de incidência principal é evitar o atrito entre a peça e o flanco (superfície de incidência) da ferramenta e permitir que o gume penetre no material e corte livremente. Se o ângulo de incidência é muito pequeno o gume não pode penetrar convenientemente no material e a ferramenta cega rapidamente, ocorrendo atrito contra a peça, sobreaquecimento da ferramenta e mau acabamento superficial. Se o ângulo de incidência é demasiadamente grande, o gume quebra ou solta uma série de pequenas lascas, em virtude do apoio deficiente. A ferramenta cega rapidamente e, dependendo do excesso no ângulo de incidência, as lascas serão muito pequenas e só visíveis no microscópio ou serão maiores e visíveis a olho nu ou ainda, todo o gume da ferramenta quebra de uma só vez. [26]

4. Ângulo de incidência secundário α_n' :

Tem as mesmas funções e é afetado de forma idêntica que o ângulo de incidência principal. [26]

5. Ângulo de incidência lateral α_f :

Deve ser o menor possível, compatível com as condições de trabalho. Um ângulo pequeno de incidência assegura melhor dissipação do calor e máxima resistência do gume. [26]

6. Ângulo de direção do gume secundário K_r' :

A função do ângulo de direção do gume secundário é de permitir que apenas uma pequena parte deste gume entre em contato com a superfície usinada, evitando assim vibrações.

O ângulo de direção do gume secundário deve ser da ordem de 5°. Muito grande, reduz o ângulo de quina e reduz a resistência da ferramenta. Muito pequeno, provoca vibrações. [26]

7. Quebra-cavacos:

Os cavacos contínuos formados na usinagem de materiais de alta ductilidade apresentam problemas sérios:

- a. Estes cavacos são bastante afiados e usualmente muito quentes, podendo ferir o operador ou dificultar bastante o seu trabalho;
- b. No caso do emprego de ferramenta de metal duro ou cerâmica, em que altas velocidades produzem um grande volume de cavacos na unidade de tempo.

Com ferramentas de aço rápido (HSS), o emprego de ângulos convenientes pode determinar formas de cavacos e sentidos de saída adequados, de modo que normalmente o controle dos cavacos não apresenta maior problema. [28]

a. Quebra-cavacos em forma de rebaixo retificado na própria ferramenta:

Este tipo de quebra-cavacos consiste de um rebaixo esmerilhado no topo da ferramenta ou do dente da fresa (Figura 15). Os três fatores a considerar neste rebaixo são:

- a. Largura: Se o quebra-cavacos é muito estreito o cavaco vai ser dobrado excessivamente: o cavaco quebra muito miúdo, mas a força e a potência de corte aumentam. A pressão excessiva contra o cavaco solicita fortemente o gume, que lasca e quebra. Se o

quebra-cavaco é muito largo, o dobramento do cavaco resulta insuficiente para quebrá-lo. A largura correta do quebra-cavacos depende do avanço e da profundidade de corte e do tipo de material;

- b. Profundidade: A profundidade do rebaixo do quebra-cavacos deve ser suficiente para que o cavaco seja dobrado de encontro ao ressalto. Profundidade excessiva provoca um enrolamento muito apertado do cavaco, além de reduzir a espessura utilizável da pastilha de metal duro;
- c. Raio de concordância: o bordo do rebaixo do quebra-cavacos deve ter um raio de concordância adequado com o fundo. Um canto vivo impede o escoamento do cavaco, que tranca no bordo e provoca grandes esforços com quebras de partes da pastilha. Um raio muito amplo faz com que o cavaco seja dobrado de modo insuficiente para provocar a ruptura do mesmo (Figura 16). [28]

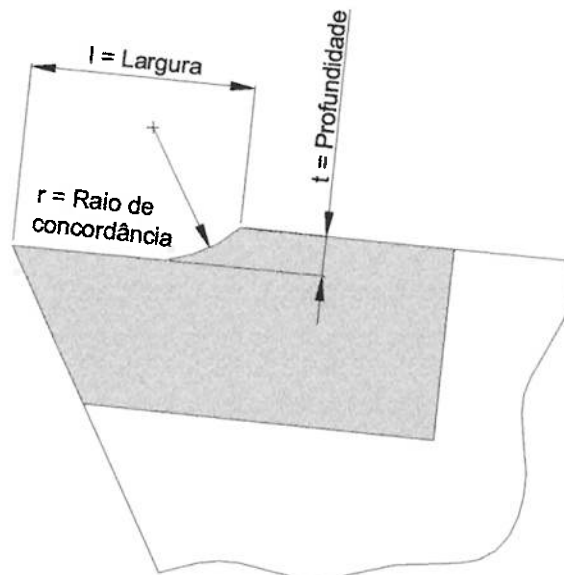


Figura 15. Vista de frente do rebaixo do quebra cavacos [28]

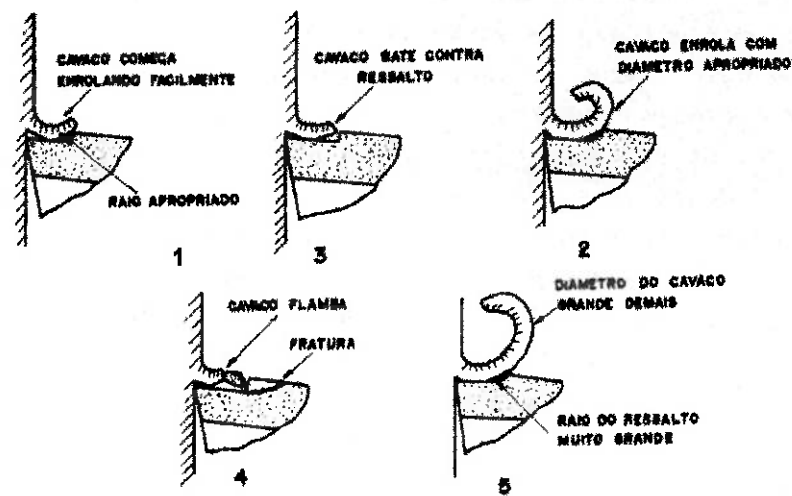


Figura 16. Raios de concordância do cavaco. 1 e 2, raios de concordância corretos; 3 e 4, canto vivo provoca choques; 5, raio muito amplo provoca dobramento insuficiente para ruptura do cavaco. [28]

a. Tipos de quebra-cavacos:

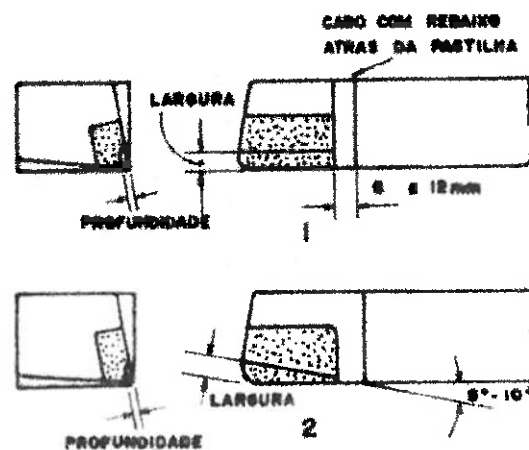


Figura 17. 1, Quebra-cavacos de rebaixo paralelo; 2, idem de rebaixo angular. [28]

- Quebra-cavacos de rebaixo paralelo:

Quando a ferramenta é usada para grandes profundidades de corte, ou profundidade de corte variável utiliza-se este tipo de quebra-cavacos (Figura 17). [28]

- Quebra-cavacos de rebaixo angular:

É mais utilizado pela facilidade de execução. O ângulo é geralmente de 8 a 10°. Tem como limitação o fato de que a profundidade de corte deve ser constante, pois se o cavaco se torna muito largo, a parte de trás se torna muito estreita para atuar convenientemente. [28]

- Quebra-cavacos de rebaixo modificados:

Para passes muito leves, com profundidades de corte inferiores a 0,8 mm, usa-se muitas vezes um quebra cavacos com ângulo de 45°, largura de 1,6 mm, profundidade de 0,4 a 0,6 mm como mostra a Figura 18a. No caso de ferramentas com grande raio de ponta, faz-se muitas vezes, adicionalmente ao rebaixo de 8°, um de aproximadamente 60°, como mostra a Figura 18b. [28]

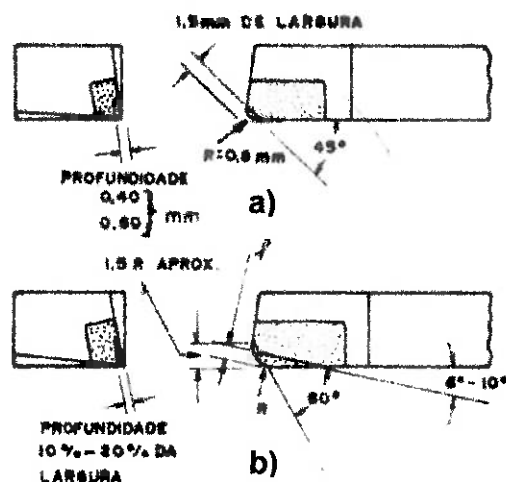


Figura 18. Quebra-cavacos de rebaiços modificados. [28]

- Quebra-cavacos usados em ferramentas de aço rápido (HSS):

Com aço rápido pode-se usar os mesmos tipos de quebra-cavacos rebaixados especificados até aqui para os metais duros. A largura de rebaixo pode ser feita igual, só que se recomenda uma profundidade 50% maior. Esta maior profundidade se torna necessária em virtude da maior

elasticidade dos cavacos produzidos nas menores velocidades de corte utilizadas em ferramentas de aço rápido e de ligas fundidas.

Em ferramentas de aço rápido pode-se usar também quebra-cavacos em forma de ranhuras de seção em forma de segmento de círculo ou de triângulo (Figura 19).

O primeiro é usado geralmente para usinagem de aço com avanços superiores a 0,4 mm. A ranhura tem raio que depende do avanço. Para raios maiores que 6 mm a ranhura vai normalmente até o gume principal. No caso de raios menores, convém deixar um friso estreito de 0,25 a 0,5 mm de largura, entre a ranhura e o gume principal.

Ranhuras de seção triangular são usadas para avanços inferiores a 0,4 mm, pois produzem um enrolamento bem apertado do cavaco, de modo a quebrar mesmo um cavaco bem fino. [28]

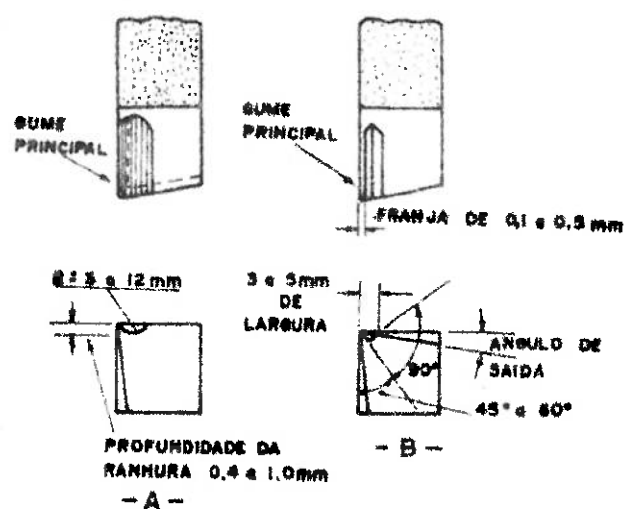


Figura 19. Quebra-cavacos usados em ferramentas de aço rápido. [28]

3.2 Tipos de Material

As exigências básicas a fazer para um material de corte segundo Stemmer [28] são:

- Elevada dureza a frio, bem superior à da peça usinada;
- Elevada dureza a quente;
- Tenacidade para resistir a consideráveis esforços de corte e impactos;
- Resistência à abrasão;
- Estabilidade química;
- Facilidade de obtenção a preços econômicos.

Verifica-se que nenhum material de corte disponível possui todas as características em mais alto grau. Desta forma, em cada trabalho específico deve-se verificar quais as exigências primordiais e quais as secundárias, de modo a se poder escolher a ferramenta de material mais adequado ao caso.

Basicamente, são empregados os seguintes grupos de materiais de corte [28]:

- a) Aços carbono;
- b) Aços rápidos comuns;
- c) Aços rápidos com cobalto;
- d) Aços rápidos com revestimento de TiN;
- e) Ligas fundidas;
- f) Carbonetos sinterizados;
- g) Cerâmica;
- h) Diamantes;
- i) Nitreto de boro cristalino cúbico (CBN).

4 DESGASTE

Há vários tipos de desgastes e avarias que acontecem em uma ferramenta de usinagem, sendo que o desgaste é um acontecimento indesejável, mas esperado. Até um certo nível de desgaste pode-se continuar a trabalhar com a ferramenta, porém, quando ocorrem as avarias - lascamento, trincas etc - na ferramenta, sua ocorrência implica no descarte da ferramenta, pois ocasionam a quebra da ferramenta. [21]

4.1 Desgaste e Avarias

Segundo *Diniz et al.* [23] os principais desgastes e avarias que ocorrem em uma ferramenta de usinagem são:

- Desgaste frontal (ou de flanco): ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça. É o tipo de desgaste mais comum. Todo processo de usinagem causa desgaste frontal (Figura 20). Sempre existe a formação do desgaste indicado pela letra a na figura. Em algumas ocasiões também ocorre a formação dos desgastes indicados como b e c na figura, sempre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, que são também chamados de desgaste de entalhe. Este tipo de desgaste que ocorre ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. É incentivado pelo aumento da velocidade de corte.
- Desgaste de cratera: é o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causada pelo atrito entre ferramenta e cavaco (Figura 21). Pode não ocorrer em alguns processos de usinagem, principalmente quando se utiliza ferramentas de metal duro recobertas (a cobertura de Al_2O_3 é a mais eficiente contra a craterização), ferramentas cerâmicas e quando o material da peça

é frágil (gera cavacos curtos). O crescimento do desgaste de cratera gera a quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste frontal.

- Deformação plástica da aresta de corte: é um tipo de avaria da ferramenta. Muitas vezes, a pressão aplicada à ponta da ferramenta somada à alta temperatura gera deformação plástica da aresta de corte, que toma uma forma bem típica, conforme mostrada na Figura 22. Tais deformações provocam deficiências do controle de cavacos e deterioração do acabamento superficial da peça. O crescimento desta deformação pode gerar a quebra da aresta de corte. É dependente dos esforços e da temperatura de corte.
- Lascamento: é um tipo de avaria da ferramenta, pois ao contrário dos desgastes frontal e de cratera que retiram continuamente partículas muito pequenas da ferramenta, no lascamento (Figura 23), partículas maiores são retiradas de uma só vez. Ocorrem principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Prejudicam o acabamento superficial da peça e, se continuam crescendo, provocam a quebra da ferramenta.
- Trincas: outro tipo de avaria da ferramenta. São causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. Quando as trincas tem origem térmica (variação da temperatura), elas ocorrem perpendicularmente à aresta de corte (Figura 24) e quando tem origem mecânica são paralelas à aresta (Figura 25). Alguns fatores que geram variação de temperatura ou de esforços mecânicos na usinagem são: corte interrompido, acesso irregular do fluido de corte, variação da espessura de corte (típica do fresamento) e solda da pastilha no porta-ferramenta. Este último ocorre pois o coeficiente de dilatação térmica do metal duro é aproximadamente a metade do coeficiente do aço, que é o

material do porta-ferramenta. Assim, quando a interface pastilha-porta-ferramenta atinge temperaturas altas que tendem a dilatar os dois corpos, o aço se dilata mais do que o metal duro, gerando tensões na interface que levam à trinca do material mais frágil, o metal duro. O crescimento das trincas leva à quebra da ferramenta.

- **Quebra:** como foi visto acima, todos os desgastes e avarias da ferramenta, ao crescerem podem gerar a quebra da ferramenta. Algumas vezes, porém, a quebra (Figura 26) pode ocorrer inesperadamente devido à alguns fatores como: ferramenta muito dura (em geral, quão mais resistente ao desgaste é a ferramenta, menos tenaz e menos resistente ao choque ela é), carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequenos, corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos canais de expulsão de cavacos ou dos bolsões de armazenamento dos cavacos, etc.. A quebra da ferramenta ocasiona não somente dano na ferramenta (as vezes não somente a aresta quebrada é danificada, mas toda a pastilha), mas também no porta-ferramenta (caso o corte não seja interrompido imediatamente após a quebra) e na própria peça. [23]

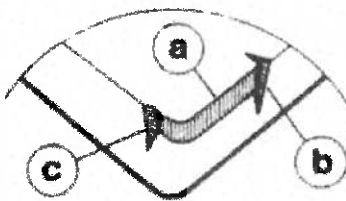


Figura 20. Desgaste frontal [23]

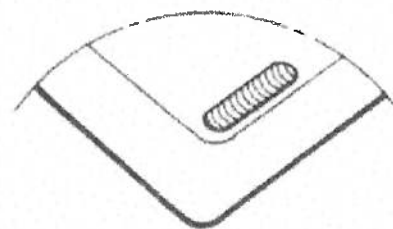


Figura 21. Desgaste de cratera [23]

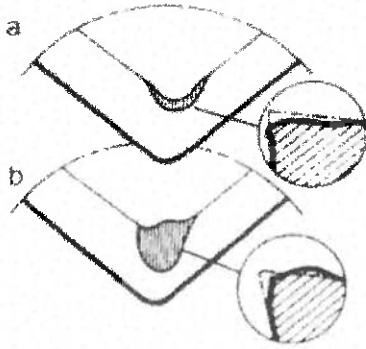


Figura 22. Deformação plástica da aresta de corte [23]

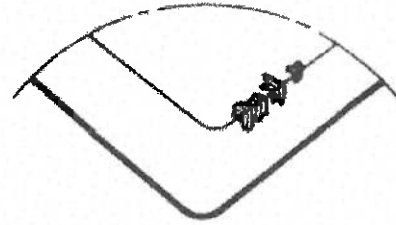


Figura 23. Lascamento [23]

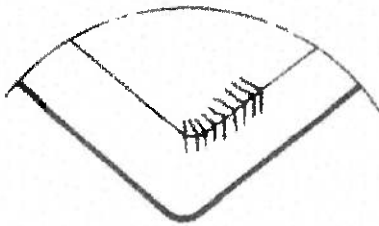


Figura 24. Trincas de origem térmica [23]

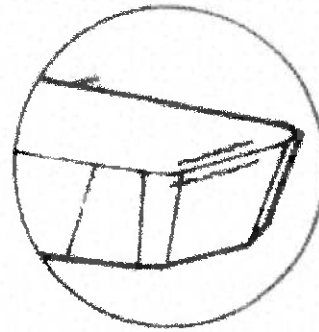


Figura 25. Trincas de origem mecânica [23]

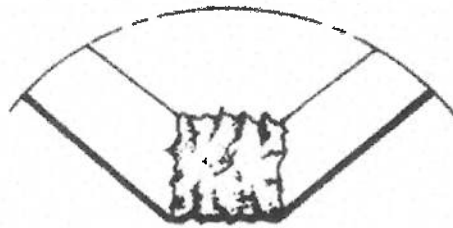


Figura 26. Quebra da ferramenta [23]

4.2 Mecanismos de Desgaste de Ferramenta

4.2.1 Aresta Postiça de Corte

Muitas vezes na usinagem pode-se formar na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, uma camada de cavaco que permanece aderida à aresta de corte. Em baixas velocidades de

corte a parte inferior do cavaco em contato com a ferramenta, sob a pressão de corte na zona de aderência, mantém este contato sem movimento relativo um espaço de tempo suficiente para se soldar à ferramenta. Com o posterior fluxo de cavaco sobre esta camada de cavaco presa à ferramenta ela se deforma e encrua, aumentando sua resistência mecânica e fazendo às vezes de aresta de corte (Figura 27).

A aresta postiça de corte tende a crescer gradualmente até que em certo momento se rompe bruscamente, arrancando partículas da superfície de folga da ferramenta, gerando um desgaste frontal muito grande, mesmo em velocidades de corte baixas (Figura 28). A superfície de saída da ferramenta, por outro lado, é protegida, já que o cavaco não atrita com a mesma, mas com a aresta postiça, fazendo com que o desgaste de cratera seja mínimo.

À medida que a velocidade de corte cresce, a temperatura de corte também cresce. Quando a temperatura de recristalização do material do cavaco é ultrapassada não há mais formação de aresta postiça, pois com a formação de novos grãos no cavaco não existe mais a possibilidade de encruamento do mesmo, fator fundamental para a formação de aresta postiça de corte. [23]

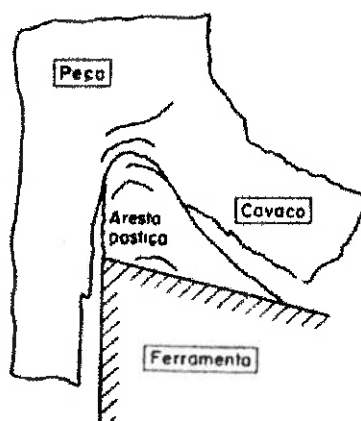


Figura 27. Aresta postiça de corte [23]

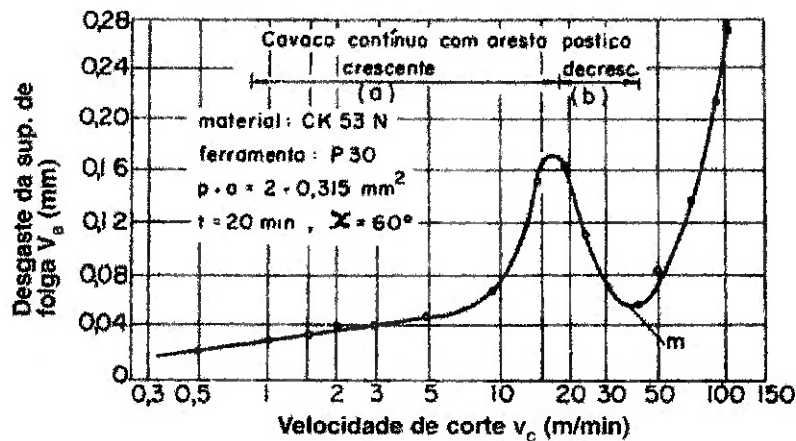


Figura 28. Desgaste frontal vs. velocidade de corte mostrando a região de formação da aresta postica de corte [23]

4.2.2 Abrasão Mecânica

A abrasão mecânica é uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Tanto o desgaste frontal, quanto o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém ela se faz mais proeminente no desgaste frontal, já que a superfície de folga da ferramenta sofre atrito contra uma parte rígida, a peça, e a superfície de saída sofre atrito contra uma parte flexível, o cavaco. [23]

4.2.3 Aderência

Se duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, forma-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência. A resistência deste extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Têm grande influência na diminuição deste tipo de desgaste a utilização adequada do fluido de corte e o recobrimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito. [23]

4.2.4 Difusão

A difusão entre ferramenta e cavaco é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro. Depende da temperatura, da duração do contato e da afinidade físico-química dos dois metais envolvidos na zona de fluxo.

A difusão é responsável principalmente pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte, pois é na superfície de saída da ferramenta que se tem as condições necessárias para a difusão. Ela não ocorre nas ferramentas de aço rápido (HSS), pois em geral não se utiliza altas velocidades de corte com estas ferramentas, e nas ferramentas de material cerâmico, que não têm afinidade físico-química com materiais ferrosos. Também o metal duro recoberto com camada de Al_2O_3 (cerâmico) sofre muito pouca difusão e, por isso, quase não apresenta desgaste de cratera. [23]

4.2.5 Oxidação

Altas temperaturas e a presença de ar e água geram oxidação para a maioria dos metais. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nestas regiões, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe. [23]

4.3 Desgaste em Fresas de Topo

A norma ISO 8688-2 [29] identifica e classifica os diversos tipos de desgastes e avarias que podem ocorrer na fresa de topo (Figura 29).

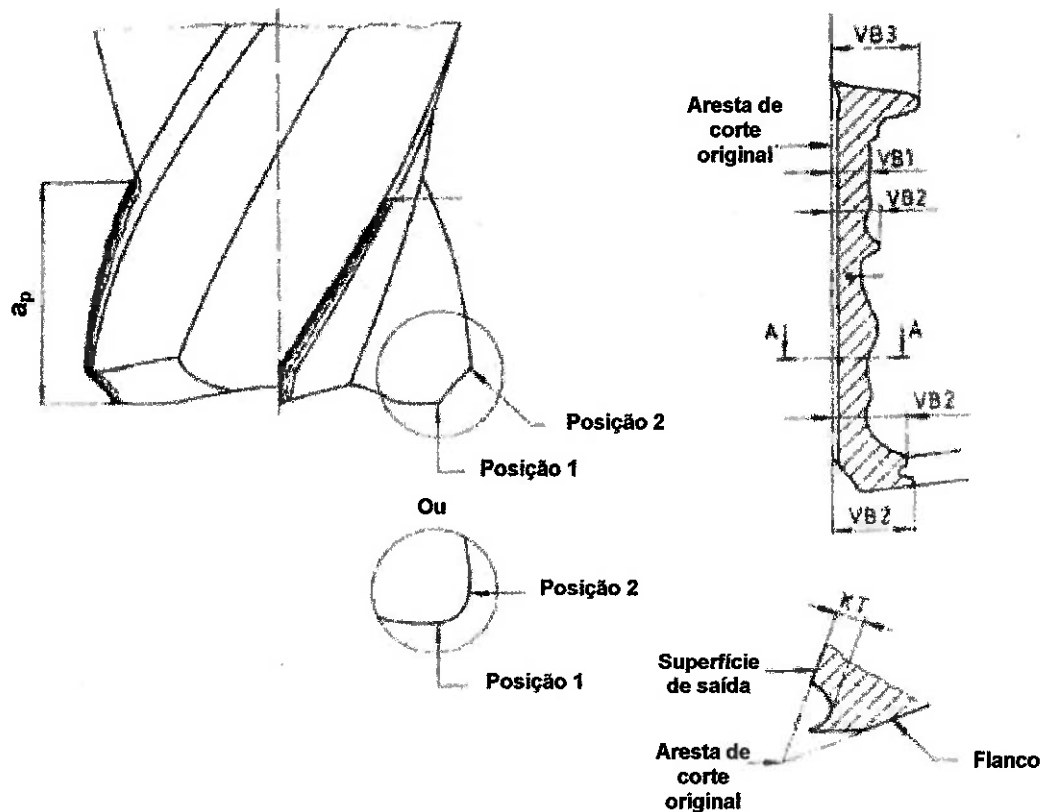


Figura 29. Desgaste em fresas de topo [29]

Individualmente os tipos de desgaste que podem ocorrer em fresas de topo são:

4.3.1 Desgaste de flanco (VB)

Perda progressiva de material no flanco da ferramenta durante a operação de usinagem resultando na formação de uma superfície de flanco desgastada. Pode ser dos seguintes tipos [29]:

- Desgaste de flanco uniforme (VB1): Região desgastada, normalmente de largura constante, que ocorre por toda extensão do flanco da aresta de corte ativa da ferramenta (Figura 30) [29];

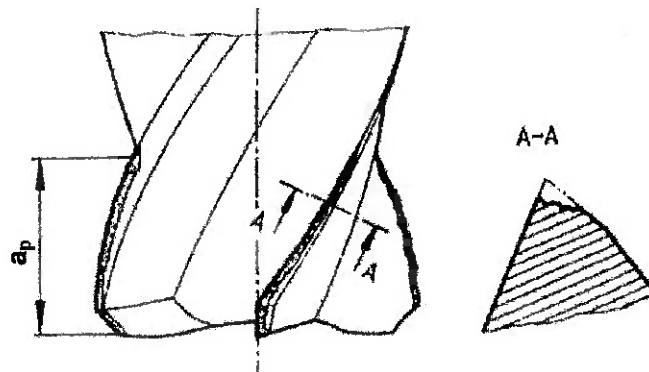


Figura 30. Desgaste de flanco uniforme [29]

- Desgaste de flanco não-uniforme (VB2): Região desgastada com largura irregular no flanco da aresta de corte ativa da ferramenta (Figura 31) [29];

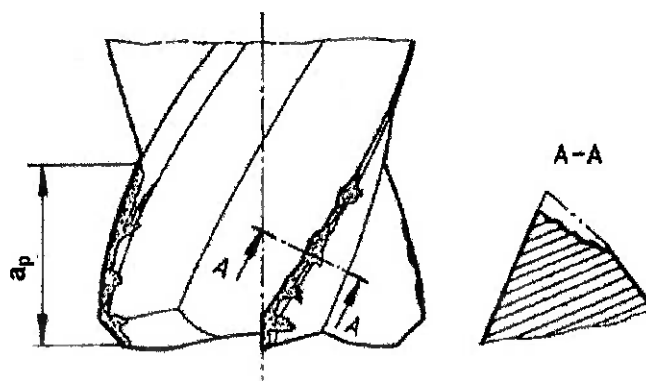


Figura 31. Desgaste de flanco não uniforme [29]

- Desgaste de flanco localizado (VB3): Desgaste de flanco localizado e exagerado que ocorre em uma área específica do flanco da aresta de corte ativa (Figura 32) [29].

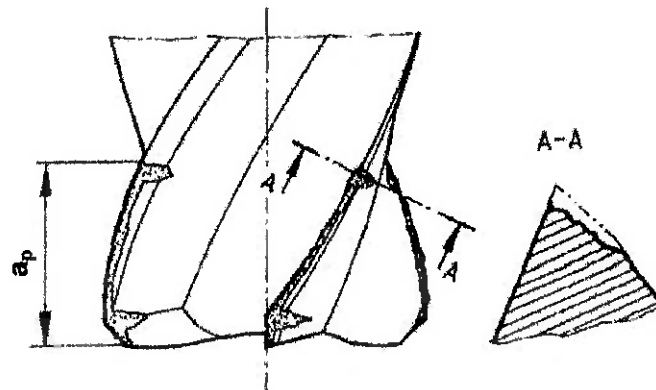


Figura 32. Desgaste de flanco localizado [29]

4.3.2 Desgaste da superfície de saída (KT)

Perda gradual de material na superfície de saída da ferramenta durante a operação de usinagem. Pode ser dos seguintes tipos [29]:

- Desgaste de cratera (KT1): Desenvolvimento progressivo de uma cratera orientada paralelamente à aresta de corte principal cuja profundidade máxima se dá há alguma distância da aresta de corte principal (Figura 33) [29];

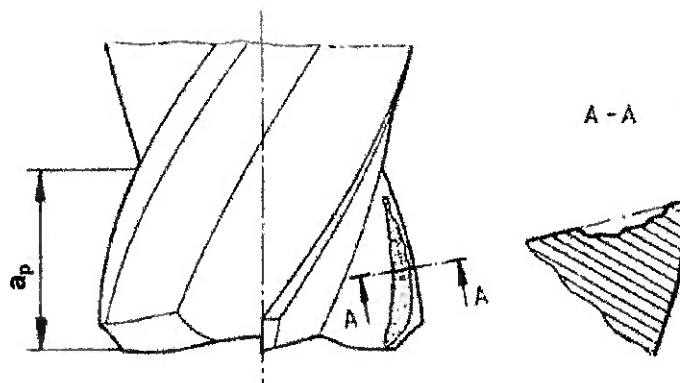


Figura 33. Desgaste de cratera [29]

- Desgaste em forma de escada (KT2): Forma de desgaste da superfície de saída em que a profundidade máxima da área desgastada, medida perpendicularmente à superfície, ocorre na intersecção da área desgastada com o flanco da aresta de corte principal da ferramenta (Figura 34) [29];

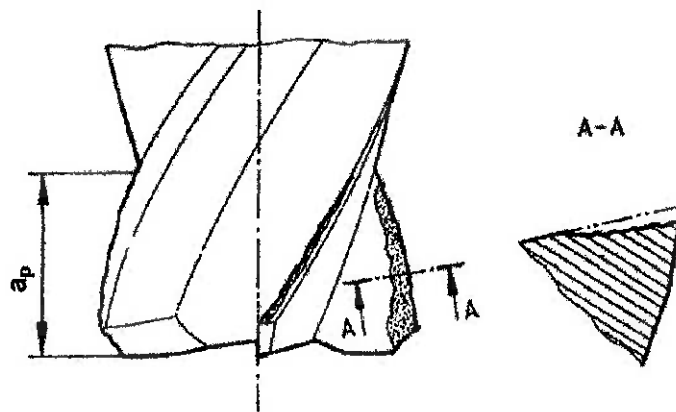


Figura 34. Desgaste em forma de escada [29]

4.3.3 Lascamento (CH)

Deterioração onde partes da aresta de corte se quebram. Pode ser dos seguintes tipos [29]:

- Lascamento uniforme (CH1): Perda de fragmentos, de dimensões aproximadamente iguais, da aresta de corte que influencia significativamente a uniformidade da área desgastada do flanco da ferramenta (Figura 35) [29];

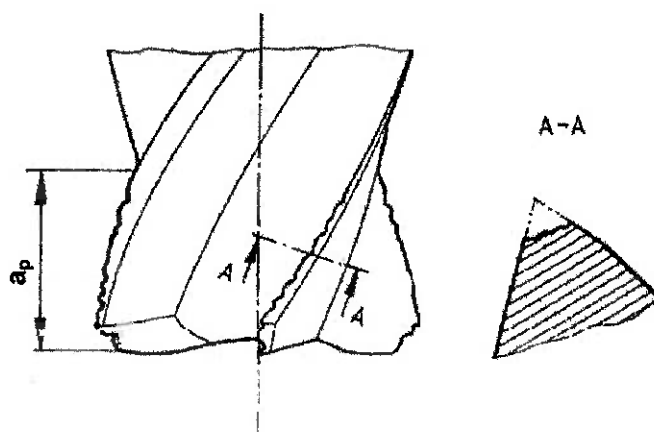


Figura 35. Lascamento uniforme [29]

- Lascamento não-uniforme (CH2): Lascamentos que ocorrem junto com trincas em um pequeno número de posições ao longo da aresta

de corte ativa mas sem correspondência entre as diversas arestas de corte (Figura 36) [29];

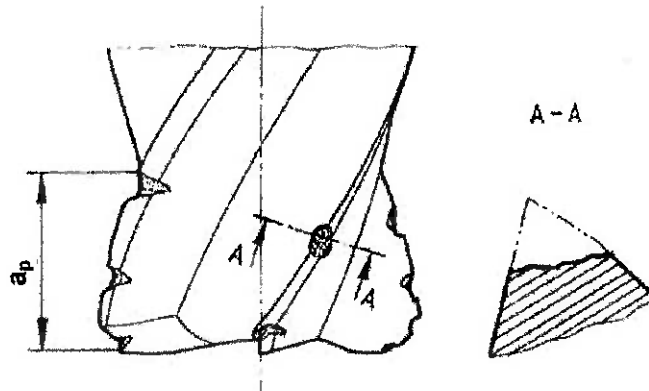


Figura 36. Lascamento não-uniforme [29]

- Lascamento localizado (CH3): Lascamentos que ocorrem nas mesmas posições nas diferentes arestas ativas de corte da ferramenta (Figura 37) [29].

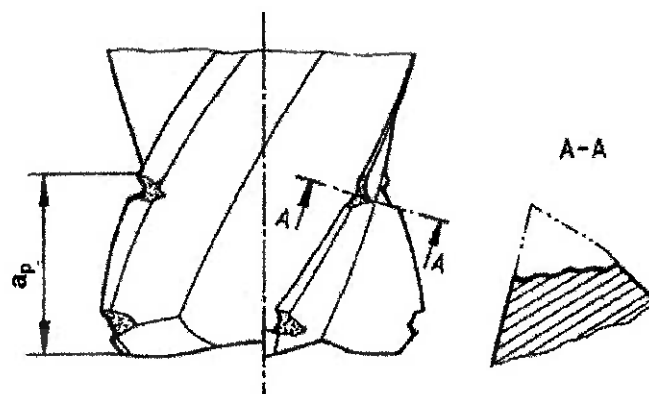


Figura 37. Lascamento localizado [29]

4.3.4 Descamação (FL)

Perda de fragmentos na forma de escamas das superfícies da ferramenta. Este tipo de desgaste ocorre principalmente em ferramentas revestidas mas pode ocorrer com outros tipos de ferramentas (Figura 38) [29].

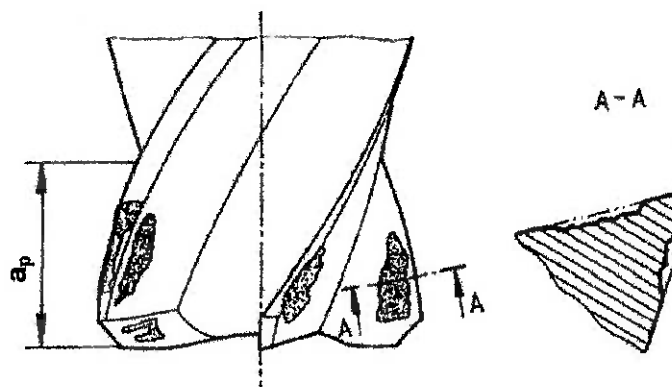


Figura 38. Descamação [29]

4.3.5 Trincas (CR)

Fraturas do material da ferramenta de corte que não causam perdas imediatas de material. Podem ser dos seguintes tipos [29]:

- Trincas em forma de pente (CR1): Trincas que ocorrem na superfície de saída e no flanco da aresta principal de corte da ferramenta e são orientadas aproximadamente na perpendicular à aresta principal de corte (Figura 39) [29];

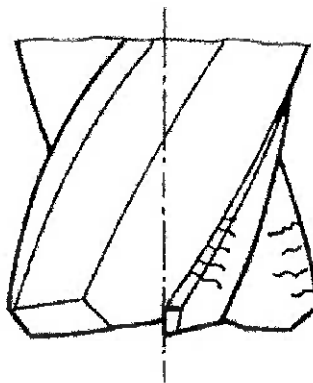


Figura 39. Trincas em forma de pente [29]

- Trincas paralelas (CR2): Trincas que aparecem na superfície de saída ou no flanco da aresta principal de corte da ferramenta e que são aproximadamente paralelas à aresta principal de corte (Figura 40) [29];

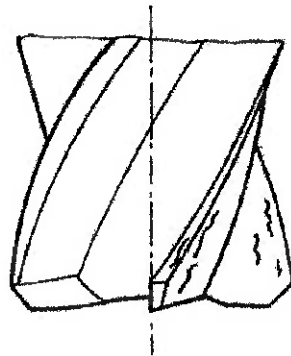


Figura 40. Trincas paralelas [29]

- Trincas irregulares (CR3): Trincas que aparecem na superfície de saída ou no flanco da aresta principal de corte da ferramenta e que não possuem orientação regular (Figura 41) [29].

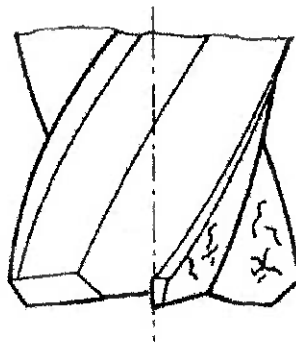


Figura 41. Trincas irregulares [29]

4.3.6 Falha catastrófica (CF)

Rápida deterioração que leva à falha total da ferramenta (Figura 42) [29].

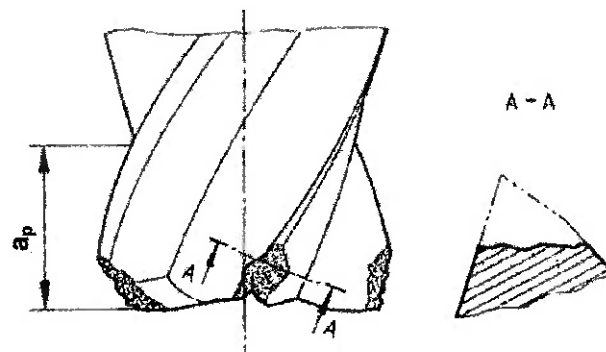


Figura 42. Falha catastrófica [29]

4.4 Vida da Ferramenta

Vida da ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingido este tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída.

Os fatores que determinam a fixação de um determinado valor-limite de desgaste para o fim da vida da ferramenta são vários. A ferramenta deve ser retirada de uso quando:

- os desgastes atingirem proporções tão elevadas que se receia a quebra da aresta de corte. Isto é crítico em operações de desbaste onde, por não ser necessária a obtenção de pequenos intervalos de tolerâncias e bons acabamentos superficiais, permite-se que os desgastes cheguem a valores altos;
- devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta, não é mais possível a obtenção de pequenos intervalos de tolerâncias e/ou bons acabamentos superficiais da peça. Isso é crítico em operações de acabamento;
- os desgastes crescem muito fazendo com que a temperatura da aresta cortante ultrapasse a temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte (a aresta de corte se decompõe). Isso é crítico em ferramentas de aço rápido, que suportam temperaturas menores que outros materiais para ferramentas;
- o aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no funcionamento da máquina.

Na usinagem com ferramenta de aço rápido, a destruição da aresta de corte é devida principalmente à diminuição da sua dureza, proveniente do aumento da temperatura de corte. Este fato se dá em temperaturas da ordem de 600°C [23].

4.5 Como os Parâmetros de Usinagem Influenciam no Desgaste e na Vida da Ferramenta

A progressão do desgaste é influenciada principalmente pela velocidade de corte, depois pelo avanço e por último pela profundidade de usinagem (Figura 43). Assim, por exemplo, a diminuição da vida da ferramenta causada por um aumento de 10% na velocidade de corte é muito maior do que aquela que ocorreria se o avanço fosse aumentado na mesma proporção.

A velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia no desgaste, pois com o aumento da mesma, aumenta a energia (calor) que é imputada ao processo, sem um aumento da área da ferramenta que recebe este calor.

Um aumento do avanço, por sua vez, também aumenta a quantidade de calor imputada ao processo, porém também aumenta a área da ferramenta que recebe este calor.

A influência da profundidade de usinagem é menor, já que ao ser aumentada, a profundidade de usinagem não mexe com a energia destinada ao corte por unidade de área, nem com a velocidade de retirada do cavaco, mas somente faz com que um maior volume de material seja retirado através da utilização de uma maior porção da aresta de corte [23].

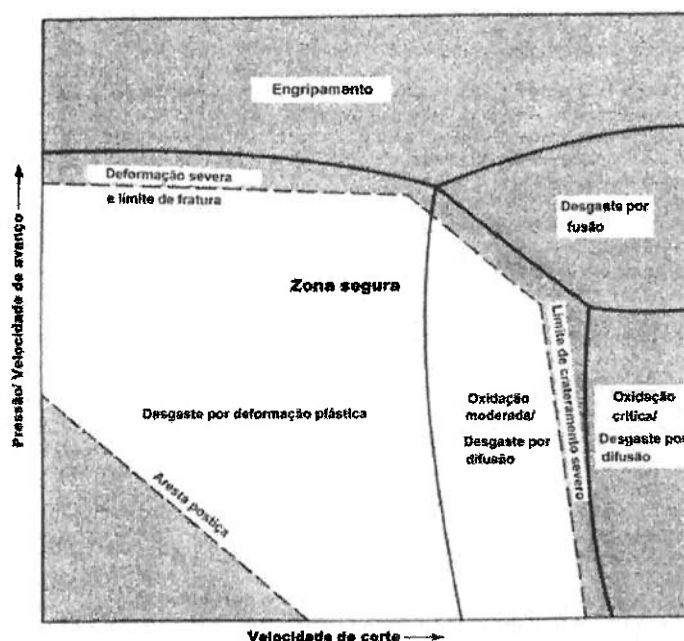


Figura 43. Mapa de desgaste [30]

4.6 Curva de Vida da Ferramenta

A curva de vida de uma ferramenta tem por objetivo fornecer vida da ferramenta em função, por exemplo, da velocidade de corte.

Muitas vezes a vida da ferramenta é determinada através do seu grau de desgaste, então as curvas de vida da ferramenta assumem a forma “Desgaste vs. Velocidade de Corte”, que é tecnicamente mais interessante que a forma “Vida da Ferramenta vs. Velocidade de corte”.

O gráfico apresentado na Figura 44 tem sua curva dividida em três regiões. O trecho *a* é aquele que corresponde à formação da aresta postiça de corte. No trecho *c* tem-se uma velocidade de corte maior, permitindo maior produtividade e uma maior vida da ferramenta, tornando este trecho o mais interessante economicamente, apesar do desgaste ser menor no trecho *b*.

A equação da curva de vida da ferramenta para o trecho *c* da curva é

$$T = K.v_c^{-x} \quad (3)$$

proposta por Taylor, onde *K* e *x* são constantes do material para determinadas condições de usinagem [23].

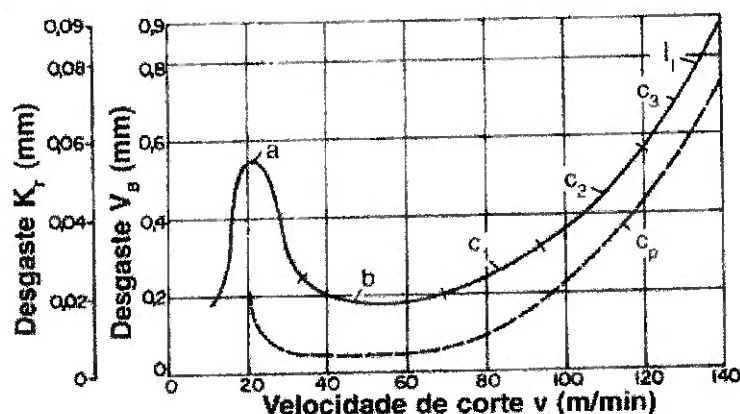


Figura 44. Desgaste da ferramenta em função da velocidade de corte para um determinado tempo de usinagem [23]

5 MEDIÇÃO DO DESGASTE

5.1 Medição dos Desgastes da Ferramenta

Na superfície de saída têm-se os desgastes: profundidade de cratera (KT), largura de cratera (KB) e distância do centro da cratera à aresta de corte (KM). Na superfície de folga mede-se a largura do desgaste de flanco (V_B), que é um valor médio do desgaste na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco (V_{Bmax}). Mede-se ainda o valor dos desgastes gerados na superfície de folga pelos entalhes (VB_N e VB_C). Os tipos de desgaste estão ilustrados na Figura 45.

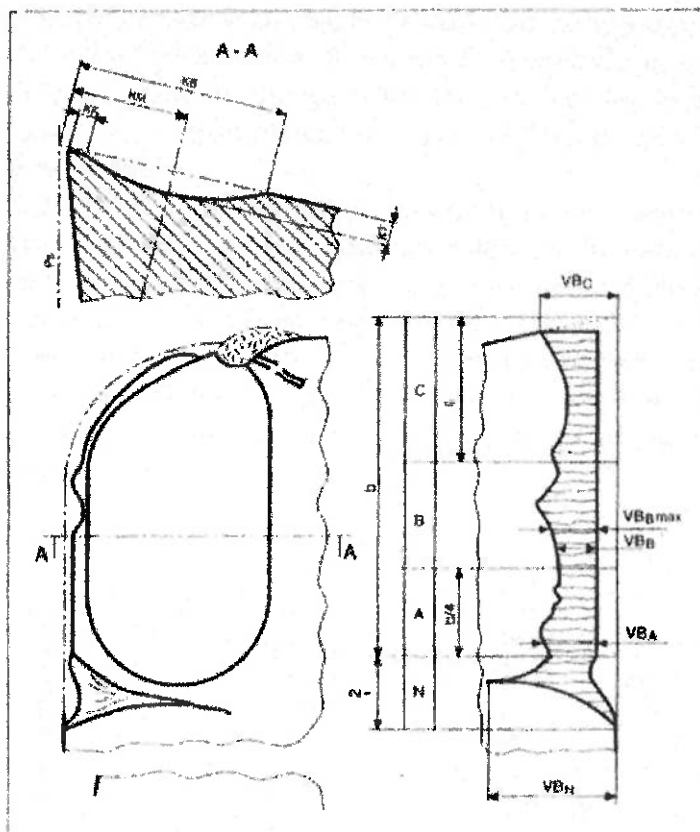


Figura 45. Desgastes da ferramenta [23]

O desgaste de flanco é causado principalmente por abrasão (em altas velocidades de corte) e pelo cisalhamento da aresta postíça de corte. O

desgaste de cratera é devido principalmente à difusão e o desgaste de entalhe à aderência e à oxidação.

Em velocidades de corte baixas, o desgaste é relativamente elevado por causa do cisalhamento da aresta postiça de corte. Em velocidades de corte maiores, o desgaste é causado principalmente pelos fatores cuja intensidade depende da temperatura de corte como a abrasão mecânica, a difusão e a oxidação. [23]

Segundo Byrne *apud* Santos [21] as características básicas que os sensores devem possuir para que possam ser utilizados no monitoramento da condição da ferramenta no ambiente de chão de fábrica são:

- Medição tão próxima quanto possível à usinagem;
- Nenhuma redução na rigidez estática e dinâmica da máquina;
- Nenhuma restrição do espaço de trabalho e dos parâmetros de corte;
- Livres de manutenção e desgaste, trocas fáceis e baixos custos;
- Resistência à sujeira, cavacos e a influências mecânicas, térmicas e eletromagnéticas;
- Funcionamento independente da ferramenta ou peça;
- Características de medição adequadas (linearidade, estabilidade, etc.);
- Quando aplicável, confiabilidade na transmissão de sinal de partes móveis para partes fixas.

Estas características limitam muito os sensores disponíveis para utilização em monitoramento da condição da ferramenta.

As seguintes distinções são válidas para classificar os sensores: por um lado podem ser de medição contínua ou intermitente, por outro lado podem ser de medição direta ou indireta. Medição contínua quer dizer que o sensor foi projetado para coleta de dados durante o processo de usinagem, ao contrário, o intermitente só é capaz de coletar dados em intervalos no processo de usinagem. Sistemas de medição direta são sistemas que medem a grandeza diretamente, no caso de desgaste da ferramenta podem ser apalpadores, sensores ópticos, etc. Sistemas de medição indireta medem alguma outra grandeza e dela se extrai a informação, através de relações analíticas ou empíricas.

Enquanto os métodos diretos são mais precisos, os métodos indiretos são mais favoráveis a aplicações práticas. Os métodos intermitentes só são capazes de detectar os problemas passado algum tempo da sua ocorrência, em geral tarde demais para evitar danos e prejuízos.

Medição direta contínua seria a melhor combinação. Alguns métodos já foram tentados com este propósito. Métodos ópticos e métodos que utilizaram o aumento da distância, provocado pelo desgaste, da aresta de corte ao referencial obtido com a ferramenta nova (*offset*). Só o *offset* não é suficiente para representar o desgaste de uma ferramenta de corte devido aos inúmeros mecanismos pelos quais esta pode se desgastar. Todos estes métodos, no entanto, ainda estão restritos aos laboratórios.

Sistemas que medem a temperatura da aresta de corte e a variação da resistência elétrica entre a peça e a ferramenta estão disponíveis como forma de medição indireta do desgaste da ferramenta. Entretanto estes sistemas são altamente restritos a condições laboratoriais e apenas para a operação de torneamento. Estes sistemas sofrem muita influência dos cavacos e do fluido refrigerante. Sistemas que utilizam microfones também ainda não conseguiram demonstrar aplicações industriais devido a ruídos externos que não são gerados pelo processo de usinagem monitorado.

Os tipos de sensores que são utilizados para fazer a aquisição de dados são apresentados a seguir.

5.2 Medição Indireta

5.2.1 Medição por Força

Dinamômetros comerciais representam a forma mais precisa de medição das forças de corte em todas as direções. Utilizam em geral transdutores piezelétricos, o que dificulta a medição de forças estáticas por um longo período sem "*drift*". Entretanto são caros e sensíveis a sobrecargas, o que limita seu uso industrial.

Discos e placas de medição consistem de finos elementos intermediários nos quais estão acoplados transdutores de medição de força.

Nestes tipos de sensores não existe problema de sobrecarga, pois os transdutores estão sujeitos apenas a uma pequena parcela da força aplicada ao sensor. Existem sensores deste tipo que utilizam extensômetros, porém apresentam uma rigidez muito inferior aos piezelétricos. Discos e placas são instalados entre partes estruturais convenientes das máquinas. Em tornos são instalados atrás do castelo de ferramentas, em centros de usinagem são instalados atrás do flange do eixo-árvore. Até agora não foram obtidos bons resultados com estes sensores em centros de usinagem devido a variações e dilatações térmicas.

Pinos e sensores de extensão são elementos que detectam as forças indiretamente. Para melhor compreender estes sensores basta interpretá-los como se fossem substitutos dos elementos de fixação normal existentes na máquina como pinos e parafusos. Para o funcionamento, estes elementos devem ser instalados entre partes da estrutura da máquina diretamente sujeitas aos esforços de corte. Em geral estes sensores possuem baixa sensibilidade, só são capazes de detectar quebra e desgaste da ferramenta em usinagem pesada.

Existem rolamentos para eixo-árvore adaptados para medição de forças através de extensômetros. Estes rolamentos possuem o inconveniente de diminuir a rigidez da máquina. Além disso, um filtro passa baixa deve ser utilizado para eliminar as freqüências originadas pela passagem das esferas. Assim perde-se a possibilidade de monitorar fenômenos que ocorrem em freqüências mais altas.

A força e o torque nos eixos-árvore também podem ser medidos como forma de monitoramento, entretanto, normalmente é necessário um sistema altamente complexo para que se possa medir os esforços por toda a faixa de potência das máquinas com uma resolução adequada. Outro problema é a transmissão do sinal da parte girante para a parte estacionária. Já existem porta-ferramentas para fresadoras capazes de medir o torque e as forças radiais e axiais. Este dispositivo é aplicável para uma boa gama de ferramentas, porém seu custo ainda é proibitivo, pois cada ferramenta deve possuir o seu sistema. Medição diretamente no eixo-árvore ainda está em

desenvolvimento. Complicações como perda de rigidez e falta de espaço são as principais limitações encontradas. [21]

5.2.2 Medição por Corrente e Potência

São os sensores mais simples e de menor custo. Também são as de mais fácil adaptação em máquinas existentes. Existe uma ampla gama de sensores disponíveis para as mais variadas aplicações. Quando estes sensores são utilizados para medição da corrente dos motores dos avanços possuem a desvantagem de, nestes motores, a maior parte da força ser devida à inércia e ao atrito das partes da máquina, e não da usinagem. Quando utilizados para medir o torque no eixo-árvore, possuem a desvantagem de estarem medindo a força na direção menos sensível ao desgaste, tornando difícil obter a sensibilidade necessária. Apesar destes problemas estes sensores podem ser utilizados para monitorar colisões, quebra de ferramenta e desgaste, desde que se esteja removendo uma quantidade razoável de material por passagem da ferramenta (seção de grande área). [21]

5.2.3 Medição por Vibração

As oscilações das forças de corte geram vibrações na estrutura da máquina. Estas vibrações são alteradas pelo desgaste da ferramenta. No caso de quebra da ferramenta ocorre um pico no sinal RMS de vibração. As vibrações podem ser medidas através de acelerômetros piezelétricos convencionais ou utilizando-se um tipo de sensor que foi criado originalmente para detectar detonação em motores de combustão interna alimentados por injeção eletrônica. Este tipo de sensor é de baixo custo e é adequado para o ambiente agressivo das operações de usinagem. Acelerômetros possuem uma grande versatilidade, sendo utilizados para medir vibrações de baixa frequência assim como sons propagados pela estrutura da máquina com frequências de até 150 kHz. [21]

5.2.4 Medição por Emissão Acústica

Emissão acústica são ondas de tensão elástica que se propagam através da estrutura da máquina com frequências acima de 150 kHz. Tendo em vista as fontes de emissão acústica analisadas por Kannatey-Asibu *apud* Santos [21] vistos acima, a quebra dos cavacos e o impacto dos cavacos contra a peça também são fontes de emissão acústica que devem ser levadas em conta nos casos reais de usinagem, segundo Byrne *apud* Santos [21].

Ainda segundo Byrne *apud* Santos [21], a emissão acústica é formada principalmente pela ruptura dos materiais, assim a quebra da ferramenta gera um sinal de grande amplitude. A emissão acústica é, portanto, bastante útil para detecção de quebra da ferramenta. A grande vantagem deste método é que a emissão acústica, ao contrário do que se poderia imaginar, não ocorre em grande intensidade nas entradas e saídas da ferramenta que ocorrem em operações com corte interrompido. Recentemente muitos sensores de emissão acústica, projetados especialmente para monitoramento de processos de usinagem, surgiram no mercado. Os sensores são geralmente fixados à estrutura da máquina, mas algumas formas alternativas têm sido tentadas com o objetivo de aumentar a proximidade com o processo, amenizando os efeitos de amortecimento do sinal: transmissão do sinal pelo fluido de corte ou por outro fluido, transmissão do sinal por indução eletromagnética sem contato.

6 MODELAGEM DAS FORÇAS DE CORTE

O desenvolvimento de um modelo matemático que forneça previsões precisas das forças de corte que atuam na ferramenta durante o processo de fresamento é essencial, pois estas forças têm influência direta na potência necessária para o corte, na capacidade de obter tolerâncias apertadas, na temperatura de corte e, o que será mais importante para nós, no desgaste da ferramenta, afetando a qualidade das peças usinadas. [31, 23].

6.1 Pressão Específica de Corte (K_s)

Será visto mais adiante que há vários modelos para o cálculo das forças de usinagem, porém, um parâmetro que é utilizado em muitos (inclusive no modelo apresentado nesse trabalho) para relacionar a força de corte com as condições de trabalho, e assim apresentar um equacionamento, é a pressão específica de corte que é representado pela simbologia K_s .

6.1.1 Fatores que Influenciam a Pressão Específica de Corte

- Material da peça: em geral, quando a dureza da peça cresce, K_s também cresce, mas isso não pode ser tomado como uma regra. Materiais com dureza semelhante podem ter valores de pressão específica de corte muito diferentes, devido a diversos fatores, dentre eles a presença de elementos de liga (um aumento da porcentagem de carbono causa aumento do valor de K_s enquanto que um aumento de fósforo, chumbo, boro, sulfeto de manganês, etc. causa uma diminuição). Dentre as propriedades de um material, a que mais pode ser correlacionada com a pressão específica de corte é a tensão de ruptura (ou de escoamento) ao cisalhamento do material, já que a formação do cavaco é um processo que envolve bastante cisalhamento. Mesmo assim, esta relação deve ser feita com cuidados, pois esta tensão de ruptura de um material é obtida em

ensaios estáticos e o processo de formação de cavaco acontece em uma frequência bastante alta.

- Material da ferramenta: com a variação do material da ferramenta ocorre uma pequena variação do coeficiente de atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, mas esta variação não chega a influir significativamente nos valores de K_s .
- Geometria da ferramenta: os ângulos de saída (γ) e de inclinação provocam uma diminuição de K_s à medida que seus valores aumentam, pois a deformação do cavaco diminui. Quando o ângulo de folga (α) diminui, aumenta o atrito entre a peça e a ferramenta e com isso cresce também o valor de K_s .
- Seção de corte: K_s diminui com a área da seção de corte. O aumento do avanço (f) ou da espessura de corte (h) fazem com que o valor de K_s diminua, principalmente quando se tem valores de f ou h pequenos. O aumento da profundidade de usinagem (a_p) praticamente não altera o valor de K_s , a não ser para valores pequenos de a_p .
- Velocidade de Corte: a presença da aresta postiça de corte tende a diminuir o valor de K_s , assim, no corte de materiais dúcteis com velocidades de corte baixas (onde há a ocorrência de APC), os valores de K_s variam dependendo do tamanho e geometria da APC. Em velocidades de corte usualmente utilizadas (sem APC), os valores de K_s tendem a diminuir levemente com o crescimento da velocidade de corte.
- Condições de lubrificação e refrigeração: quanto maior for a penetração do fluido de corte e quão maior for o efeito lubrificante deste fluido, maior será a diminuição de K_s . Em altas velocidades de corte, essa penetração é dificultada.
- Estado da afiação da ferramenta: na presença apenas do desgaste de flanco (VB), K_s aumenta à medida que o desgaste cresce. Quando o desgaste de cratera aparece (KT) aparece junto como o desgaste de flanco, o crescimento de K_s já não é tão proeminente [23].

6.2 Linhas de Pesquisa Atuais

O sistema de forças na operação de fresamento tem sido largamente estudado [11-16, 32-38], pois com base na análise de forças se desenvolve o *design* das ferramentas de corte e do maquinário, estuda-se atributos da performance do processo de usinagem, como a estabilidade dinâmica, a precisão do posicionamento da peça/ferramenta, a superfície usinada, obtém-se parâmetros do processo para planejar, otimizar e automatizar as operações de usinagem, além de permitir o monitoramento da condição da ferramenta [33].

Smith e Tlusty [37] fizeram uma revisão de vários tipos de modelos de processo de fresamento. A seguir, serão apresentados tais modelos os quais estão em ordem crescente de complexidade e precisão:

6.2.1 Modelo de Força Rígida Média e de Deflexão Estática

É o mais simples, porém ainda muito popular, modelo de processo de fresamento. O modelo se baseia na relação entre a taxa de remoção de material (Q) e a média da potência consumida durante o corte (Pot) através do parâmetro denominado potência específica (Pot_{sp}) segundo a equação abaixo:

$$Pot = Pot_{sp} \cdot Q \quad (4)$$

Sendo que para os materiais mais comuns, o valor de Pot_{sp} está disponível na literatura e a taxa de remoção de material é explicada na seção 1.2.4.

Sabendo que o torque médio pode ser calculado por:

$$T = Pot/\omega \quad (5)$$

Tem-se que o valor médio da força tangencial de corte (F_c) é dado por:

$$F_c = \frac{Pot_{sp} \cdot Q}{v_f} \quad (6)$$

sendo v_t o valor da velocidade tangencial de corte da ferramenta.

A força de deflexão (F_s) que age normal à ferramenta pode ser então utilizada para uma primeira aproximação como $\frac{1}{2}$ da força média de corte:

$$F_s = 0,5 \cdot F_c \quad (7)$$

Assim, "Força Rígida Média" indica que a força foi obtida a partir da potência média (o que leva ao cálculo de uma força média) e que a deflexão da ferramenta não participa do cálculo da força (a ferramenta é rígida no cálculo) e "Deflexão Estática" implica que a deflexão da ferramenta é tida como proporcional à força média e que a inércia do sistema (ferramenta, peça e a parte do cabeçote que se movimenta) não foi considerada.

6.2.2 Modelo da Força Rígida Instantânea

Este modelo considera a força instantânea em seções incrementais da aresta de corte helicoidal como mostrado na Figura 46 existente em uma fresa de topo e usa a somatória vetorial da força de corte. A deflexão da ferramenta não é considerada na fórmula, por isso a designação "Rígida". Assim, o modelo apenas é utilizado para ao cálculo de força e não para a deflexão e ou informação da superfície gerada.

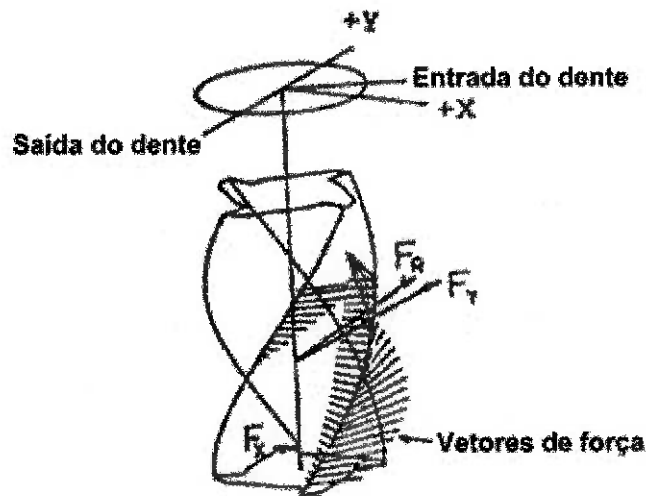


Figura 46. Modelo de força rígida instantânea na fresa de topo[37]

A força tangencial em cada incremento é tida como proporcional à área frontal do cavaco que está sendo removido naquele incremento.

$$F_{ci} = K_s \cdot b_{ci} \cdot f_{ci} \quad (8)$$

Onde K_s é numericamente equivalente à constante de proporcionalidade Pot_{sp} usado no "Modelo de Força Rígida Média e de Deflexão Estática" e b_{ci} e f_{ci} são respectivamente a largura e a espessura instantânea do cavaco para o incremento.

A força total de corte na fresa é obtida através da soma vetorial das forças tangenciais e das forças radiais (assumindo que proporcional às forças tangenciais) em todos os elementos cortantes.

6.2.3 Modelo de Força Rígida Instantânea e de Deflexão Estática

Essencialmente, este modelo é uma extensão do Modelo da Força Rígida Instantânea. Este modelo calcula a força da mesma maneira, mas também dá uma indicação da deflexão e da superfície gerada. O modelo é "Deflexão Estática" porque a deflexão da ferramenta é obtida simplesmente

como proporcional à força e o sistema de inércia não é considerado. Novamente a deflexão da ferramenta não afeta o cálculo da força.

Este será o tipo de modelo que será proposto e visto mais adiante nesse trabalho.

6.2.4 Força Instantânea com Deflexão Estática Realimentado

Neste modelo a deflexão da ferramenta não é somente calculada com base na força, mas também é realimentado para ter influência na própria força.

Se a ferramenta é considerada rígida, a força tangencial em um dos dentes é dada por:

$$F_c = K_s \cdot b_c \cdot h_c \quad (9)$$

onde b_c e h_c são respectivamente a largura e a espessura instantânea do cavaco para esse dente, e K_s é a pressão específica de corte.

Se for considera a deflexão da ferramenta, ela irá afetar o parâmetro f , assim, a equação da força é dada por:

$$F_c = K_s \cdot b_c \cdot (h_c - F_c/k) \quad (10)$$

onde k é a coeficiente de rigidez da ferramenta, e F_c/k é a deflexão da ferramenta. É assumido que a deflexão ao longo do eixo da ferramenta é constante, e é válido para pequenas profundidades de corte axiais. Então, $(f - F_c/k)$ é a espessura para este primeiro passo.

Para o segundo dente, a espessura do cavaco a ser removido é o avanço por dente mais o material deixado na superfície por causa da deflexão durante a usinagem do dente anterior. A espessura do cavaco para o segundo dente (h_{c2}) é dado por:

$$h_{c2} = h_c - F_{c2}/k + F_{c1}/k \quad (11)$$

onde F_{c1}/k representa o material deixado pela passagem do primeiro dente e F_{c2}/k é a deflexão do dente ocorrendo nesse passo. Então, a força no segundo dente é:

$$F_{c2} = K_s \cdot b_c \cdot h_{c2} \quad (12)$$

e assim, analogamente, caso haja, é para todos os dentes seguintes.

6.2.5 Modelo de Força Regenerativa e de Deflexão Dinâmica

Força Regenerativa significa que a força em cada dente da ferramenta depende não só do avanço por dente e da deflexão da ferramenta, mas também da superfície que foi deixada pelo passo do dente anterior, assim, a força em qualquer dente será:

$$F_{ci+1} = K_s \cdot b_c \cdot (h_c + z_i - z_o) \quad (13)$$

onde i é o índice de cada passo, z_i é a deflexão normal à superfície de corte da ferramenta e z_o é a deflexão do dente que gerou anteriormente a superfície (pode ser qualquer passo anterior).

"Deflexão Dinâmica" significa que a inércia do sistema foi considerada na determinação da deflexão da ferramenta e das forças.

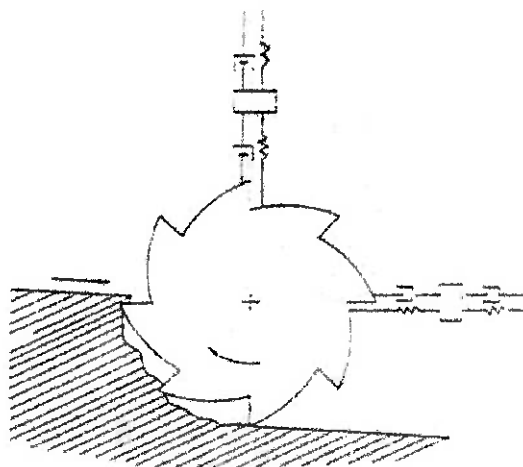


Figura 47. Modelo de força regenerativa e de deflexão dinâmica [37]

O modelo é ilustrado na Figura 47. A informação dinâmica sobre a ferramenta é expressa em múltiplos graus de liberdade (expresso em coordenadas modais) em que a cada dois eles são mutuamente perpendiculares. A cada instante, a força em cada dente que está usinando naquele momento, é calcula e somada vetorialmente. As acelerações são calculadas em todos os graus de liberdade baseada na força e então são integradas duas vezes para indicar o deslocamento da ferramenta. Isto é, para cada coordenada:

$$F_{c_i} = m.\ddot{x}_i + c.\dot{x}_i + k.x_i \quad (14)$$

Assim, para uma aproximação:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i &= (F_{c_i} - c.\dot{x}_i - k.x_i)/m \\ \dot{x}_{i+1} &= \dot{x}_i + \ddot{x}_i.\Delta t \\ x_{i+1} &= x_i + \dot{x}_i.\Delta t \end{aligned} \quad (15)$$

sendo que c é o coeficiente de amortecimento e m a massa da ferramenta.

A razão de isso ser uma aproximação vem do fato de que a força na ferramenta depende da deflexão e da superfície deixada pelo dente anterior no mesmo instante e na equação (Eq. 14) e integrações (Eq. 15) acima, foi consideradas somente a influência da deflexão , velocidade e superfície do

passo anterior. Esta aproximação pode ser aceita se o tempo de cada passo for pequeno o suficiente e isso permitir uma simulação no computador.

6.3 Modelo Proposto

Foi elaborado um modelo das forças agindo na peça a ser usinada. Tal modelagem foi baseada no Modelo de Força Rígida Instantânea de Deflexão Estática [37] apresentado anteriormente e teve como objetivo apresentar a força resultante de corte decomposta em três direções, segundo os eixos cartesianos fixos x , y e z . O eixo x tem a mesma direção e sentido do avanço, o eixo z é paralelo ao eixo da fresa e com sentido para cima e o eixo y tem a direção horizontal, perpendicular aos outros dois eixos e sentido à esquerda do avanço, conforme ilustrado na Figura 48.

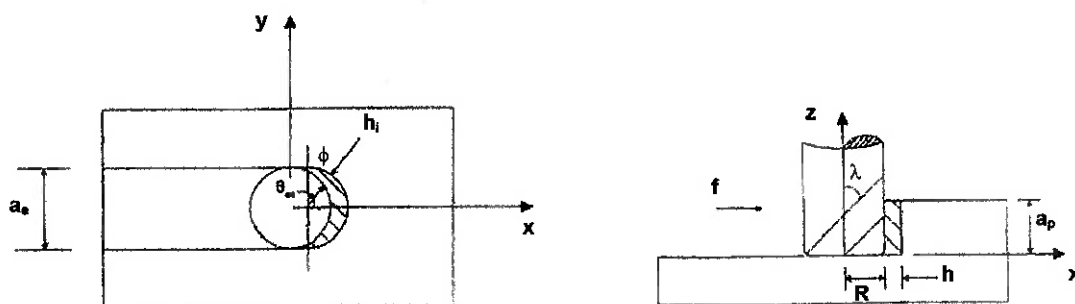


Figura 48. Identificação dos eixos x , y e z [31]

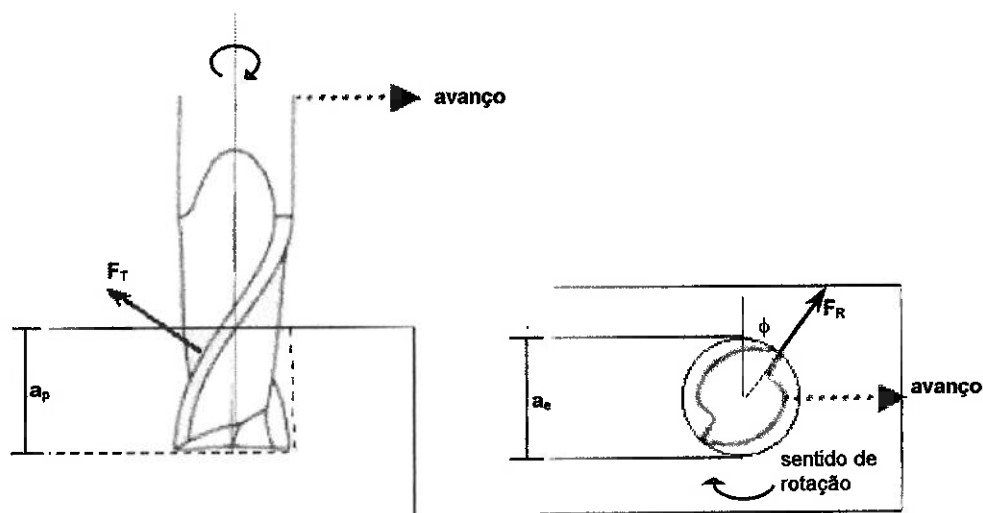


Figura 49. Forças de corte: tangencial e radial

As direções e os sentidos das forças de corte foi modelado conforme ilustrado na Figura 49 na qual há duas componentes: uma componente tangencial F_T devido à fricção e uma componente radial F_R devido à pressão normal.

Smith e Tlusty [37] equacionam as forças como:

$$F_T = K_s \cdot a(\phi) \cdot h_i(\phi) \quad (16)$$

e

$$F_R = C \cdot F_T = C \cdot K_s \cdot a_p(\phi) \cdot h_i(\phi) \quad (17)$$

onde K_s é pressão específica de corte, ϕ é a posição angular, $a_p(\phi)$ é a profundidade de corte (Figura 50) e $h_i(\phi)$ é a espessura instantânea do cavaco (Figura 48). C é uma constante, que segundo Smith e Tlusty [37] é um valor próximo de 0,5.

As equações de $a_p(\phi)$ (Figura 50) e de $h_i(\phi)$ para a usinagem de canal com fresa helicoidal foram calculadas por Lee e Lin [31] e são:

$$a_p(\phi) = R \cdot \phi \cdot \cot(\lambda) \quad (18)$$

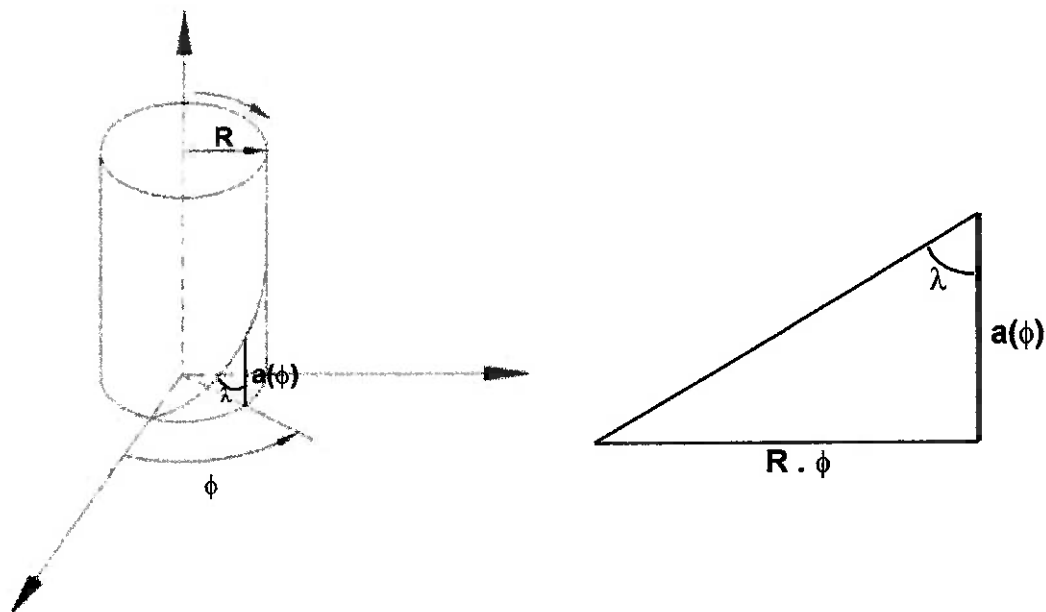


Figura 50. Profundidade de corte $a(\phi)$

onde R é o raio da ferramenta e:

$$h_i(\phi) = f_z \cdot \text{sen}(\phi) \quad (19)$$

onde f_z é o avanço por dente.

Decompondo F_T nas direções x , y e z (Figura 51), tem-se:

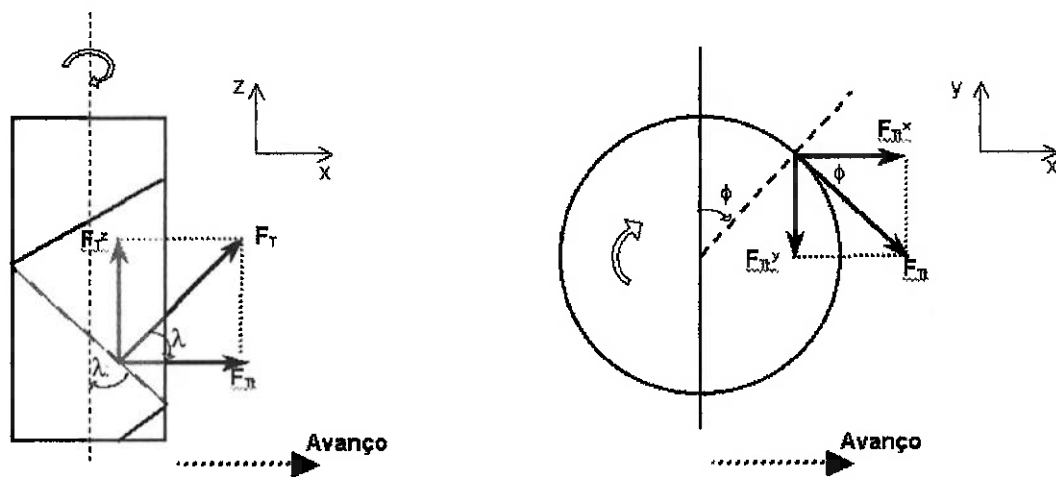


Figura 51. Decomposição da força tangencial

$$F_{Tz} = F_T \cdot \cos(\lambda) \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_T^z = F_T \cdot \text{sen}(\lambda) \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{Tx} = F_T \cdot \cos(\lambda) \cdot \cos(\phi) \end{array} \right. \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{Ty} = -F_T \cdot \cos(\lambda) \cdot \text{sen}(\phi) \end{array} \right. \quad (23)$$

Decompondo a força radial (F_R) nas direções x, y e z (Figura 52), tem-se:

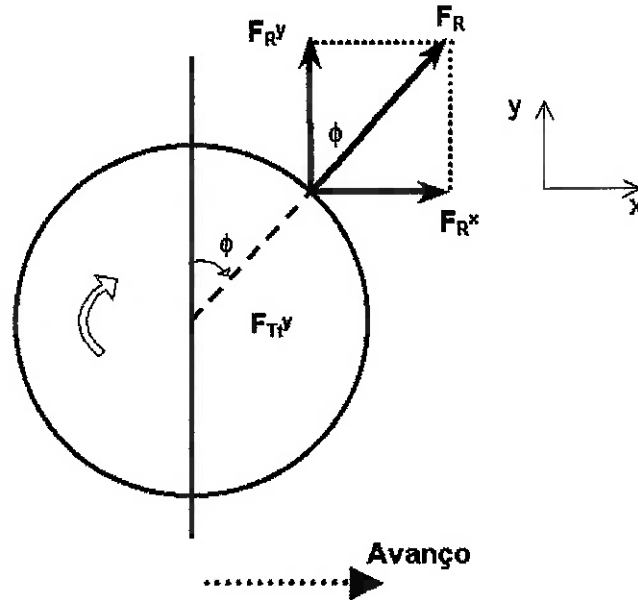


Figura 52. Decomposição da força radial

$$\begin{cases} F_R^x = F_R \cdot \text{sen}(\phi) & (24) \\ F_R^y = F_R \cdot \text{cos}(\phi) & (25) \end{cases}$$

Assim, tem-se no total:

$$F^x = F_T \cdot \text{cos}(\lambda) \cdot \text{cos}(\phi) + F_R \cdot \text{sen}(\phi) \quad (26)$$

$$F^y = -F_T \cdot \text{cos}(\lambda) \cdot \text{sen}(\phi) + F_R \cdot \text{cos}(\phi) \quad (27)$$

$$F^z = F_T \cdot \text{sen}(\lambda) \quad (28)$$

Substituindo todas as variáveis, tem-se finalmente que:

$$\begin{cases} F^x = K_s \cdot a(\phi) \cdot h_i(\phi) \cdot \text{cos}(\lambda) \cdot \text{cos}(\phi) + C \cdot K_s \cdot a_p(\phi) \cdot h_i(\phi) \cdot \text{sen}(\phi) & (29) \\ F^y = -K_s \cdot a(\phi) \cdot h_i(\phi) \cdot \text{cos}(\lambda) \cdot \text{sen}(\phi) + C \cdot K_s \cdot a_p(\phi) \cdot h_i(\phi) \cdot \text{cos}(\phi) & (30) \\ F^z = K_s \cdot a(\phi) \cdot h_i(\phi) \cdot \text{sen}(\lambda) & (31) \end{cases}$$

6.4 Simulação

A simulação foi realizada utilizando-se uma rotina programada com o software *Matlab v6.0.0.88 Release12* da *The MathWorks, Inc.*

Os dados necessários para a simulação são apresentados abaixo:

- Ferramenta:
 - a. $R = 12,5 \text{ mm}$;
 - b. $z = 2$;
 - c. $\lambda = 30^\circ = \pi/6$;
- Condições de usinagem:
 - a. $a_e = 25 \text{ mm}$;
 - b. $a_p = 5 \text{ mm}$;
 - c. $n = 400 \text{ rpm}$;
 - d. $v_f = 30 \text{ mm/min}$;
 - e. $f = 0,075 \text{ mm/rotação}$.
- Parâmetros da usinagem:
 - a. $K_s = 2000 \text{ N/mm}^2$;
 - b. $C = 0,5$.

A fresa em estudo nesse trabalho possui dois dentes e estes são simétricos. Na Figura 49, verifica-se que durante o processo de usinagem, apenas um dos dentes estará retirando material da peça de cada vez, o outro estará rotacionando no vazio. Assim, pode-se, no cálculo das forças que agem na peça durante o processo de usinagem, calcular a força agindo em um dos dentes por vez, para um ângulo de entrada igual a 0 radianos e o ângulo de saída igual a π radianos ($0 \leq \phi \leq \pi$).

Deve-se observar também que em uma fresa helicoidal, devido ao ângulo de hélice, o comprimento efetivo da aresta do dente varia durante o intervalo de usinagem ($0 \leq \phi \leq \pi$). Há três estágios durante a usinagem:

1. O comprimento efetivo da aresta de corte aumenta do momento em que a ponta do dente começa a usinar a peça, até quando $a(\phi)$ é igual a a_p .
2. O comprimento efetivo da aresta de corte fica constante até o momento em que a ponta do dente começa a deixar de usinar.
3. O comprimento efetivo da aresta de corte diminui do momento em que a ponta do dente começa a deixar de usinar a peça, até que não há mais nenhum contato entre a aresta de corte e a peça.

7 RESULTADOS

Os resultados da simulação no Matlab são os gráficos de Força (F) vs. Posição angular (ϕ) nos três eixos (x,y e z).

Gráficos de Força (F) vs. Tempo (t) também foram feitos para ilustrar a sua utilização no monitoramento da condição da ferramenta.

7.1 Gráficos de Força vs. Posição Angular

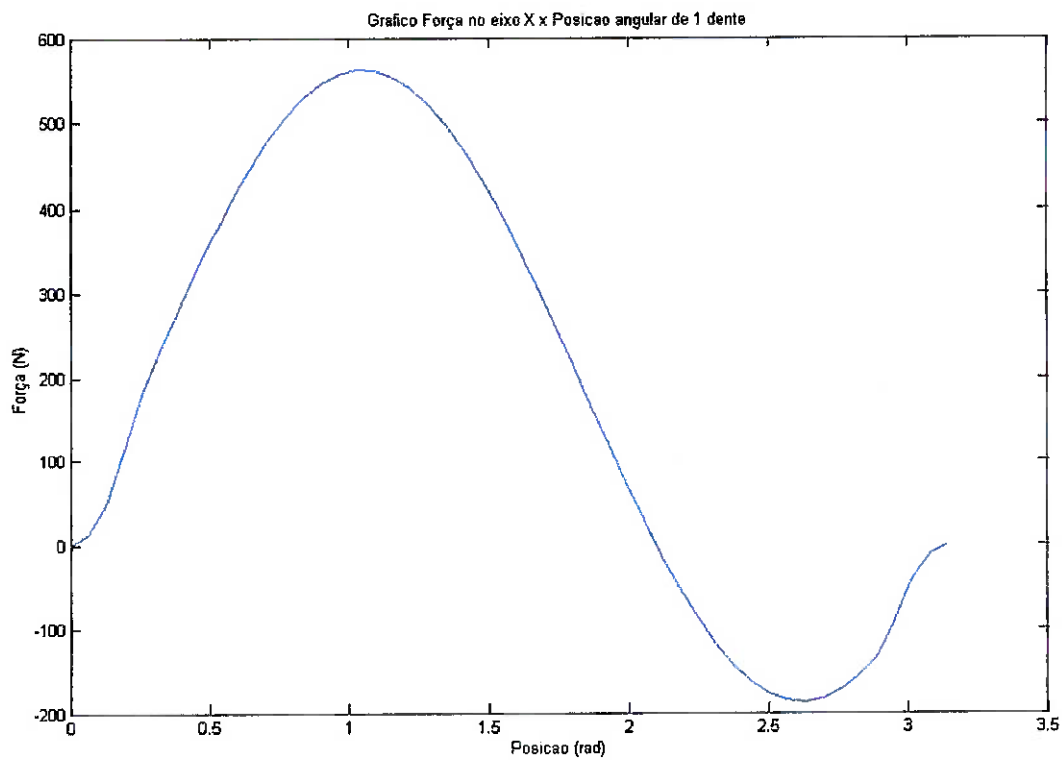


Figura 53. Gráfico da força no eixo x

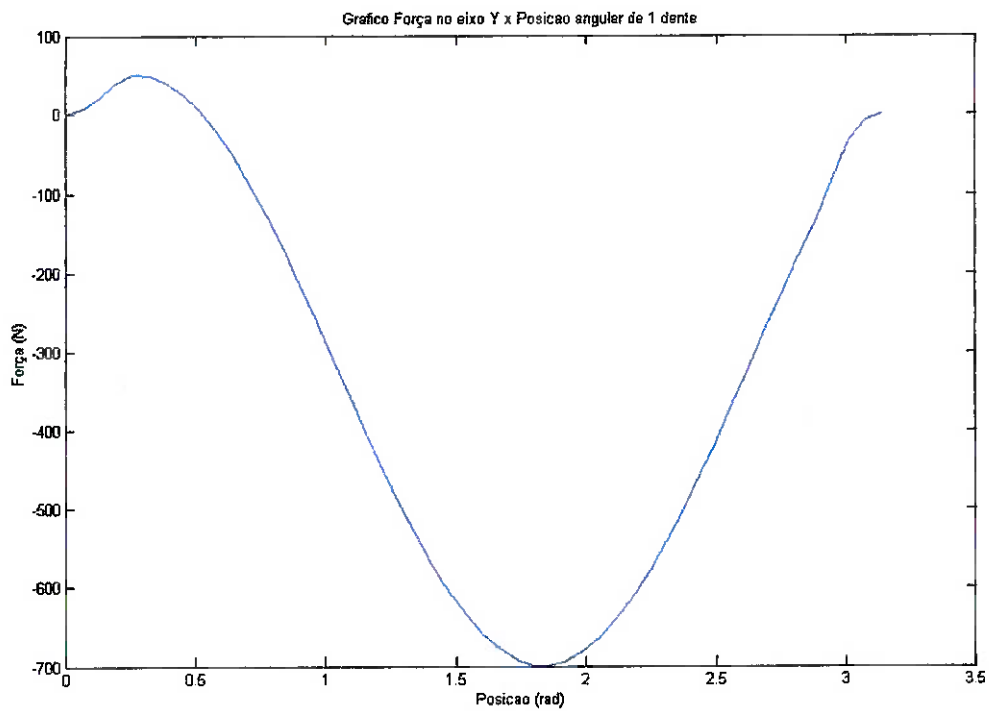


Figura 54. Gráfico da força no eixo y

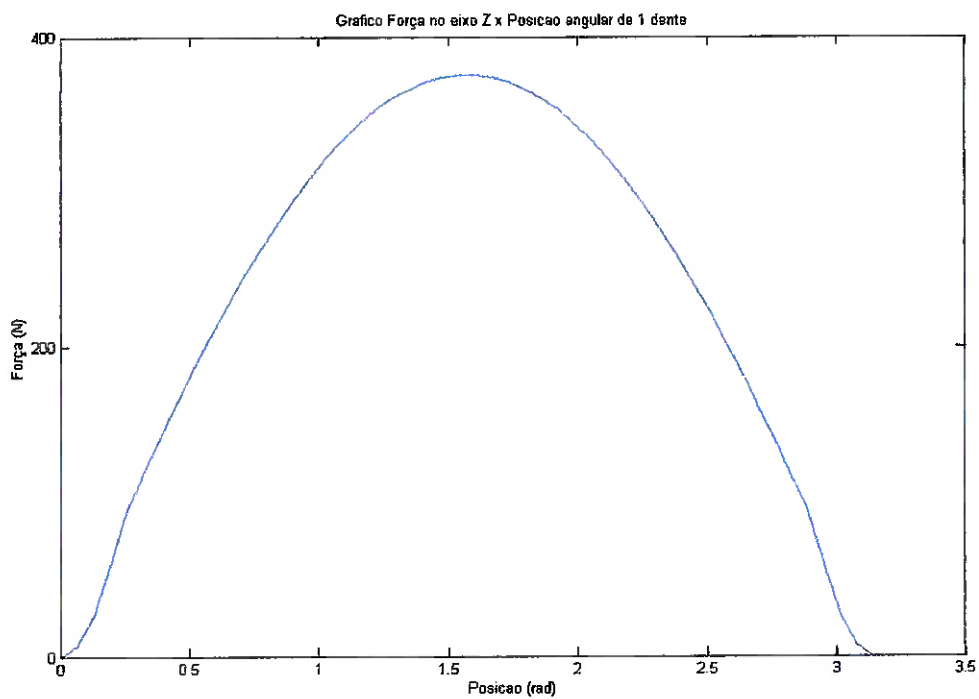


Figura 55. Gráfico da força no eixo z

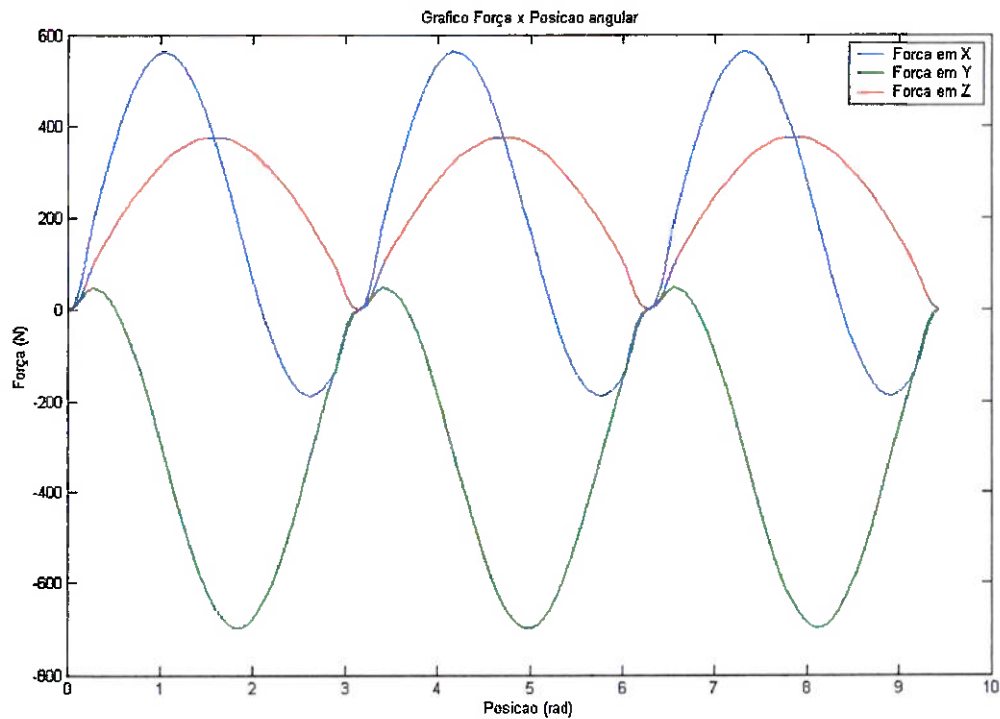


Figura 56. Gráficos de Força vs. Posição Angular nas direções dos eixos cartesianos

7.2 Gráficos de Força vs. Tempo

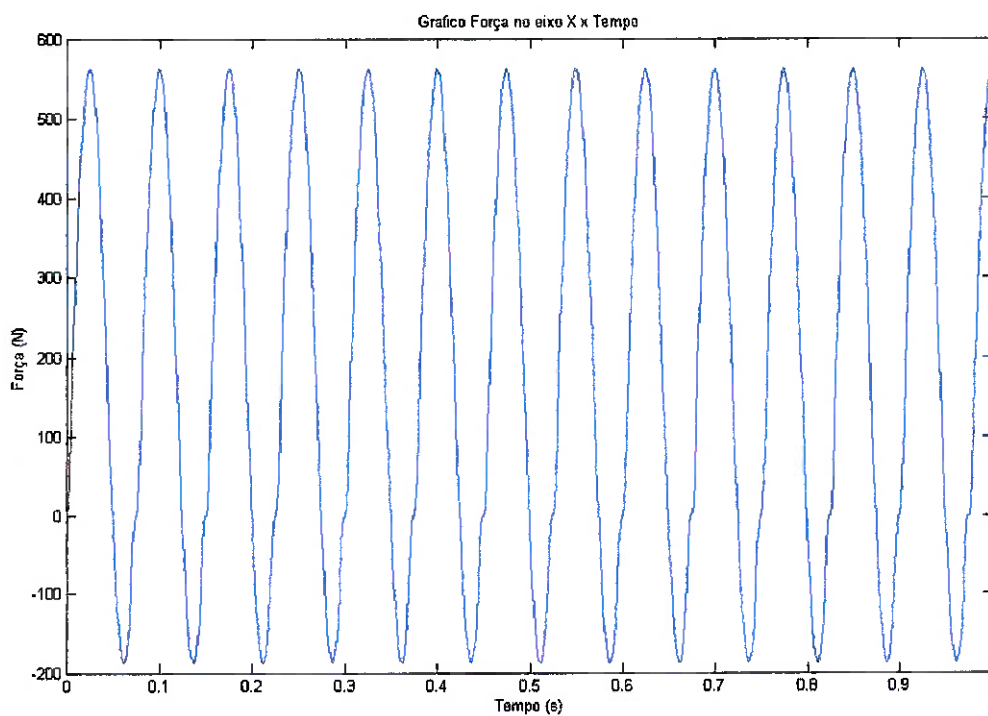


Figura 57. Gráfico de Força no Eixo x vs. Tempo

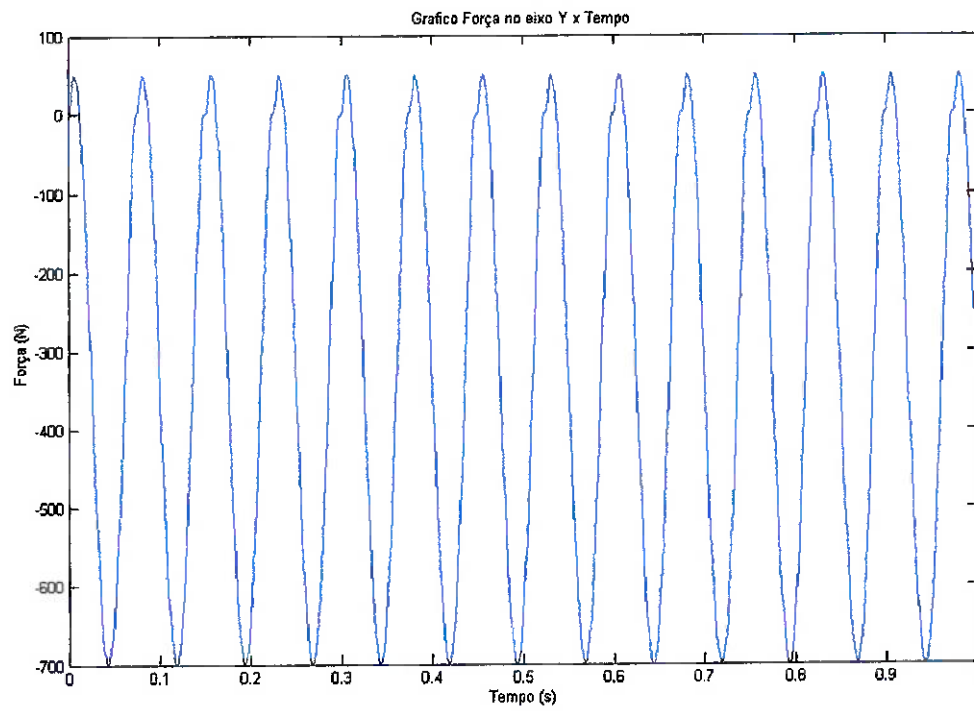


Figura 58. Gráfico da Força no Eixo y vs. Tempo

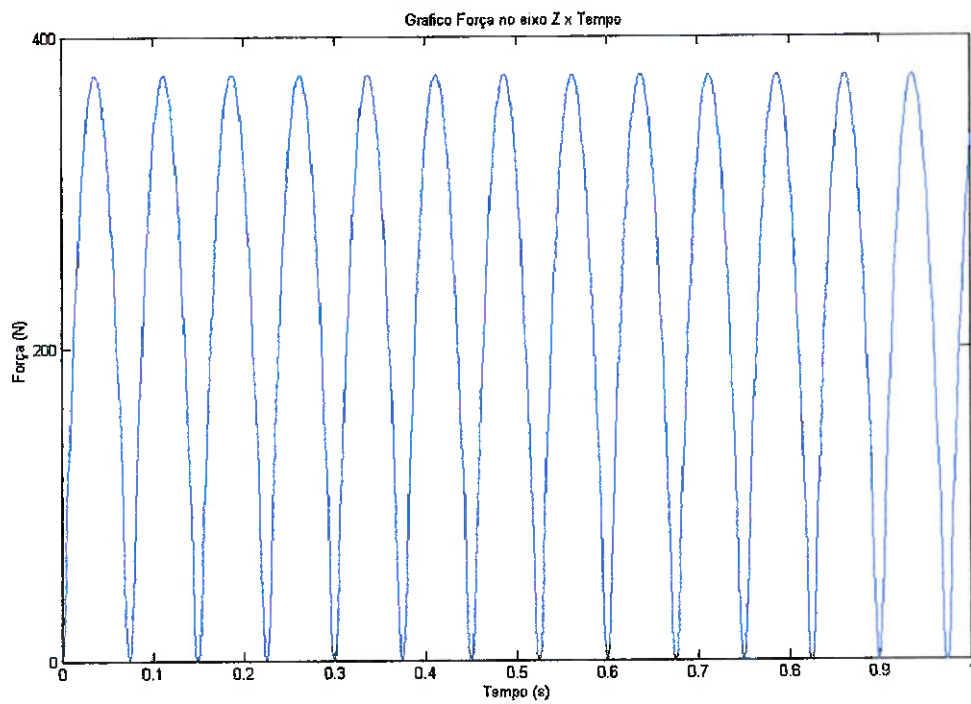


Figura 59. Gráfico da Força no Eixo z vs. Tempo

8 DISCUSSÃO

Fazendo uma análise qualitativa dos gráficos obtidos da simulação³, verifica-se que o resultado do modelo desenvolvido (Figura 60) condizem com resultados práticos (medido) apresentados em outro trabalho [38]. O trabalho apresenta resultados (Figura 61, Figura 62 e Figura 63) de fresas de topo helicoidais de diversas geometrias: cônica de ponta esférica (Figura 64a), cilíndrica de ponta esférica (Figura 64b) e cilíndrica de ponta tipo "bull nose" (Figura 64c).

Pode-se, então, comparar os resultados (gráficos) de forma qualitativa e verifica-se que as "caras" das curvas são iguais.

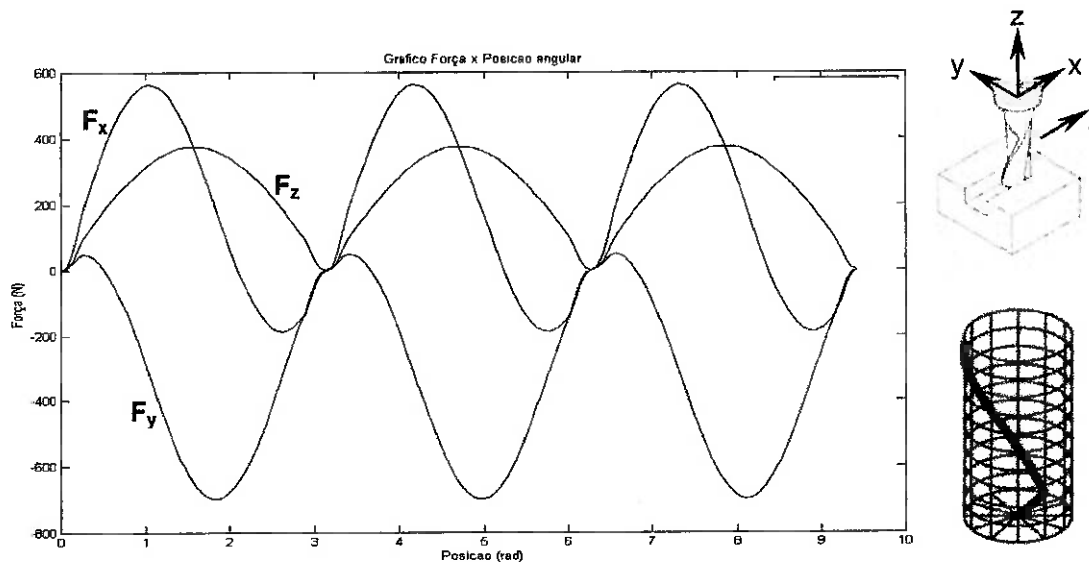


Figura 60. Gráfico de Força vs. Posição Angular do modelo para fresa de topo helicoidal

³ Deve-se observar que os gráficos indicados como "Simulado" na Figura 61, na Figura 62 e na Figura 63 se referem ao resultado do trabalho da referência [38] da qual foram retirados os gráficos e não o obtido pelo modelo desenvolvido nesse trabalho, que se encontra na Figura 60.

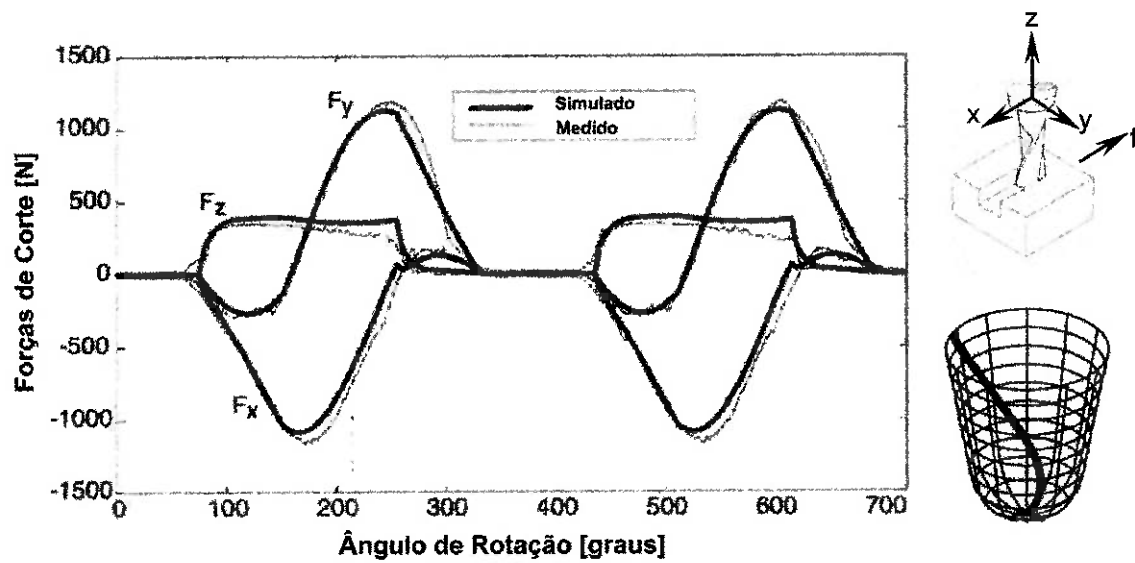


Figura 61. Gráfico de Força vs. Posição Angular para fresa de topo helicoidal cônica de ponta esférica [38]

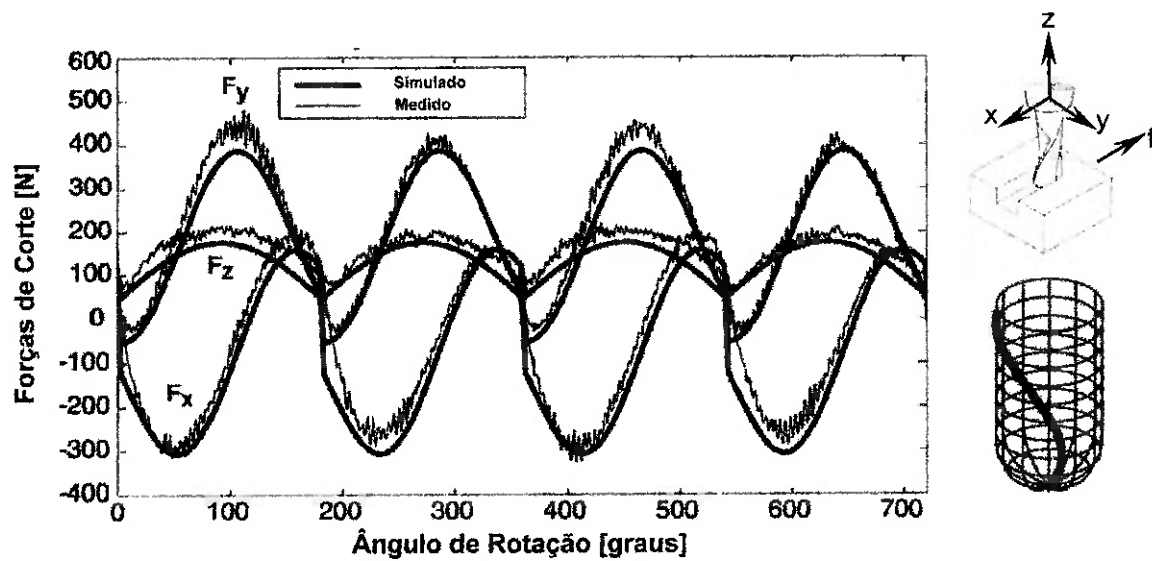


Figura 62. Gráfico de Força vs. Posição Angular para fresa de topo helicoidal cilíndrica de ponta esférica [38]

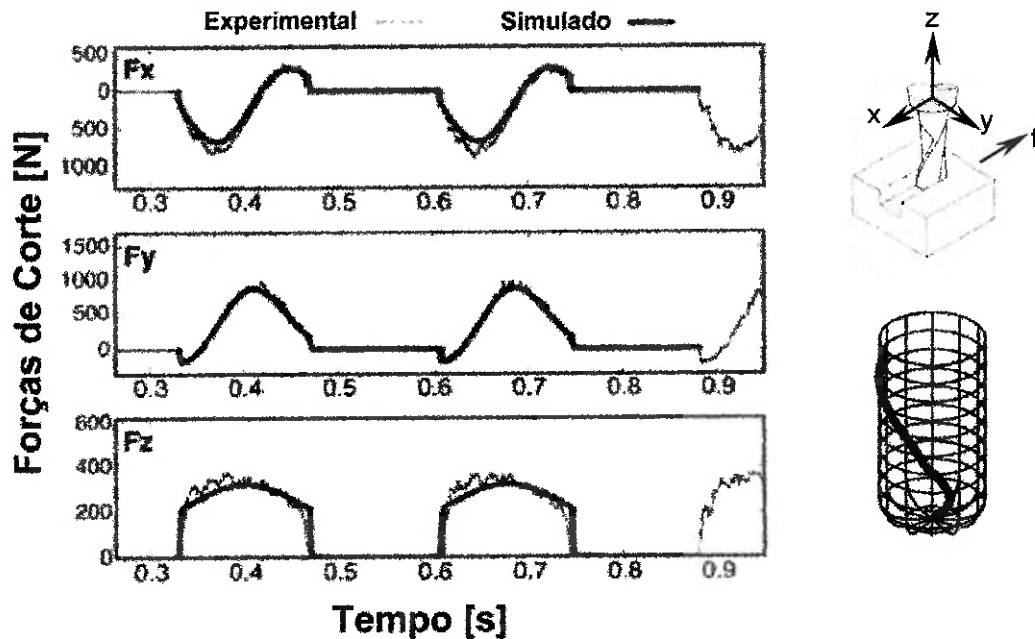


Figura 63. Gráfico de Força vs. Tempo para fresa de topo helicoidal cilíndrica de ponta tipo "bull nose" [38]

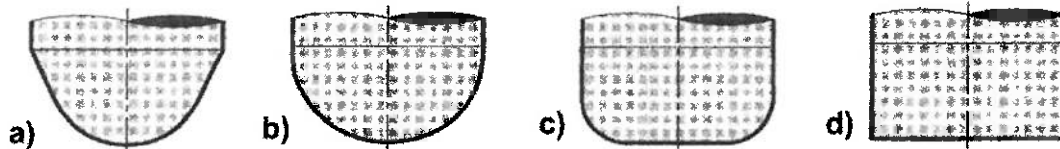


Figura 64. Perfis das fresas de topo helicoidais: a) Cônica de ponta esférica; b) Cilíndrica de ponta esférica; c) Cilíndrica de ponta tipo "bull nose"; d) Cilíndrica. [38]

A utilização prática do modelo apresentado que prediz as forças de corte durante a usinagem depende de uma determinação experimental da equação de K_s (determinada por meio dos valores de K_s obtidos em experimentos com parâmetros e tempo de usinagem determinados). Com a equação de K_s , pode-se, para os mesmos parâmetros de usinagem, determinar a amplitude das forças de corte que estará submetida a ferramenta em um determinado tempo.

Através das equações (29), (30) e (31), da determinação das forças de usinagem que agem nas direções de x , y e z através da mesa

dinamométrica instalada na fresadora e dos parâmetros de usinagem empregados no experimento consegue-se determinar K_s e C para um determinado tempo de usinagem. Ao repetir o experimento para vários tempos de usinagem diferentes pode-se obter as equações de K_s e C em função do tempo de usinagem para o par peça/ferramenta utilizado.

Os "mapas" de forças de corte em função do tempo de usinagem para ferramentas que sofrem desgaste natural obtidos através da aplicação do modelo poderão ser utilizados como padrão de forças de usinagem na comparação dos sinais captados por dinamômetros instalados na mesa da fresadora em paralelo com as leituras do instrumento em desenvolvimento, captando desta forma, possíveis anomalias nos sinais de força e a leitura correspondente do novo instrumento.

O modelo permite que os coeficientes K_s e C possam ser utilizados como parâmetros de monitoramento, já que apresentam variação no tempo conforme o estado da ferramenta. Desta forma, outra possibilidade para o monitoramento do estado da ferramenta é a obtenção de gráficos "Coeficiente vs. Tempo" para determinado conjunto ferramenta, material a ser usinado e fresadora. Os gráficos podem ser obtidos através de experimentos de usinagem em que os dinamômetros instalados na mesa da fresadora nos indicariam as forças de usinagem nos três eixos considerados (x, y e z) e do uso do modelo matemático apresentado para a obtenção dos coeficientes.

9 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser estabelecidas:

1. O modelo proposto modela as forças de corte que atuam na peça durante o fresamento de canal utilizando uma fresa helicoidal cilíndrica de dois dentes;
2. Os resultados apresentados pelo modelo desenvolvido são compatíveis com resultados apresentados anteriormente pela literatura, como por exemplo os resultados apresentados na referência [38].
3. O modelo desenvolvido e apresentado cumpre o objetivo inicial deste trabalho, ajudando no estudo em andamento, pois permite a sua utilização no monitoramento da condição da ferramenta durante o processo de fresamento de topo.

Como sugestão para o prosseguimento desse trabalho estão previstos experimentos a serem realizados com dinamômetros junto com um trabalho de doutoramento em andamento citado no início do trabalho.

10 TRABALHOS FUTUROS

1. Determinação dos coeficientes K_s e C do modelo desenvolvido neste trabalho através da realização de experimentos com dinamômetros;
2. Comparação dos sinais obtidos pelo sistema de monitoramento da condição da ferramenta por força e outros sistemas como, por exemplo, o sistema de monitoramento por emissão acústica.

-ANEXO-

ROTINA PARA PREDIÇÃO DAS FORÇAS DE FRESAMENTO

```

rotacao=400;%rotacao em RPM%
feedrate=30;%velocidade de avanco em mm/min%
helice=pi/6;%angulo de helice da ferramenta%
feed=feedrate/rotacao;
R=12.5;%raio da frerramenta%
profaxial=5;%profundidade axial de corte%
C=0.5;
K=2000;
posm=profaxial*tan(helice)/R;
freq=rotacao/60;
for i=1:50
    pos=(i-1)*pi/49;
    posic(i)=pos;
    h=feed*sin(pos);
    if (pos<=posm)
        a=R*pos*cot(helice);
        Fx(i)=K*a*h*cos(helice)*cos(pos)+C*K*a*h*sin(pos);
        Fy(i)=-K*a*h*cos(helice)*sin(pos)+C*K*a*h*cos(pos);
        Fz(i)=K*a*h*sin(helice);
    elseif ((pos>=posm)&(pos<=(pi-posm)))
        Fx(i)=K*profaxial*h*cos(helice)*cos(pos)+C*K*profaxial*h*sin(pos);
        Fy(i)=-K*profaxial*h*cos(helice)*sin(pos)+C*K*profaxial*h*cos(pos);
        Fz(i)=K*profaxial*h*sin(helice);
    elseif (pos>=(pi-posm))
        a=profaxial-(R*(pos-(pi-posm))*cot(helice));
        Fx(i)=K*a*h*cos(helice)*cos(pos)+C*K*a*h*sin(pos);
        Fy(i)=-K*a*h*cos(helice)*sin(pos)+C*K*a*h*cos(pos);
        Fz(i)=K*a*h*sin(helice);
    end
end
posicao=0:pi/49:pi;
figure
plot(posicao,Fx), xlabel('Posicao (rad)'), ylabel('Força (N)'),
title('Grafico Força no eixo X x Posicao angular de 1 dente');
figure
plot(posicao,Fy), xlabel('Posicao (rad)'), ylabel('Força (N)'),
title('Grafico Força no eixo Y x Posicao angular de 1 dente');
figure
plot(posicao,Fz), xlabel('Posicao (rad)'), ylabel('Força (N)'),
title('Grafico Força no eixo Z x Posicao angular de 1 dente');
posicao2=0:pi/49:2*pi;
Fx2=Fx;
Fy2=Fy;
Fz2=Fz;

```

```

for i=1:49
    Fx2(50+i)=Fx(i+1);
    Fy2(50+i)=Fy(i+1);
    Fz2(50+i)=Fz(i+1);
end
figure
plot(posicao2,Fx2), xlabel('Posicao (rad)'), ylabel('Força (N)'),
title('Grafico Força no eixo X x Posicao angular para rotação completa da
ferramenta');
figure
plot(posicao2,Fy2), xlabel('Posicao (rad)'), ylabel('Força (N)'),
title('Grafico Força no eixo Y x Posicao angular para rotação completa da
ferramenta');
figure
plot(posicao2,Fz2), xlabel('Posicao (rad)'), ylabel('Força (N)'),
title('Grafico Força no eixo Z x Posicao angular para rotação completa da
ferramenta');
Fx3=Fx2;
Fy3=Fy2;
Fz3=Fz2;
for i=1:49
    Fx3(99+i)=Fx2(i+1);
    Fy3(99+i)=Fy2(i+1);
    Fz3(99+i)=Fz2(i+1);
end
posicao3=0:pi/49:3*pi;
figure
plot(posicao3,Fx3,posicao3,Fy3,posicao3,Fz3), xlabel('Posicao (rad)'),
ylabel('Força (N)'), title('Grafico Força x Posicao angular'), legend('Força
em X','Força em Y','Força em Z');
for i=1:100
    for j=1:50
        Fx4(((i-1)*50)+j)=Fx(j);
        Fy4(((i-1)*50)+j)=Fy(j);
        Fz4(((i-1)*50)+j)=Fz(j);
    end
end
tempo=0:(1/(2*freq*50)):((4999/50)/(2*freq));
figure
plot(tempo,Fx4), xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Força (N)'), title('Grafico
Força no eixo X x Tempo');
figure
plot(tempo,Fy4), xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Força (N)'), title('Grafico
Força no eixo Y x Tempo');

```

```
figure
plot(tempo,Fz4), xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Força (N)'), title('Grafico
Força no eixo Z x Tempo');
```

LISTA DE REFERÊNCIAS

- [1] ROSA, A. B.; DINIZ, A. E. Desgaste de flanco e da vida da ferramenta no fresamento de topo. **Revista Máquinas e Metais**, n.414, p.105-115, julho 2000.
- [2] LEOPOLD, J. Process monitoring of 3D - Cutting inserts using optical methods. **Journal of Materials Processing Technology**, v.61, p.34-38, 1996.
- [3] YANG, M.; KWON, O. Crater wear measurement using computer vision and automatic focusing. **Journal of Materials Processing Technology**, v.58, p.362-367, 1996.
- [4] KURADA, S.; BRADLEY, C. A machine vision system for tool wear assessment. **Tribology International**, v. 30, n.4, p.295-304, 1997.
- [5] YANG, M.; KWON, O. A tool condition system using image processing. **Control Engineering Practice**, v.6, p.1389-1395, 1998.
- [6] PFEIFER, T.; WIEGERS, L. Reliable tool wear monitoring by optimized image and illumination control in machine vision. **Measurement**, v.28, p.209-218, 2000.
- [7] CAROLAN, T. A. et al. Acoustic emission monitoring of tool wear during the face milling of steels and aluminium alloys using a fibre optic sensor - Part 1: energy analysis. **Journal of Engineering Manufacture**, v.211, n.B4, p. 299-309, 1997.
- [8] CAROLAN, T. A. et al. Acoustic emission monitoring of tool wear during the face milling of steels and aluminium alloys using a fibre optic sensor - Part 2: frequency analysis. **Journal of Engineering Manufacture**, v.211, n.B4, p. 311-319, 1997.
- [9] XIAOLI, L.; ZHEJUN, Y. Tool wear monitoring with wavelet packet transform-fuzzy clustering method. **Wear**, v.219, p.145-154, 1998.

- [10] MATHEWS, P. G.; SHUNMUGAM, M. S. Condition in reaming through acoustic emission signals. **Journal of Materials Processing Technology**, v.86, p.81-86, 1999.
- [11] ALTINTAS, Y.; YELLOWLEY, I. In-process detection of tool failure in milling using cutting forces models. **Journal of Engeneering for Industry**, v.111, p.149-157, 1989.
- [12] LIN, S. C.; LIN, R. J. Tool wear monitoring in face milling using force signals. **Wear**, v.198, p.136-142, 1996.
- [13] BAEK, D. K.; KO, T. J.; KIM, H. S. Real time monitoring of tool breakage in a milling operation using a digital signal processor. **Journal of Materials Processing Technology**, v.100, p.266-272, 2000.
- [14] SARHAN, A. et al. Interrelationships between cutting force variation and tool wear in end-milling. **Journal of Materials Processing Technology**, v.109, p.229-235, 2001.
- [15] CHOUDHURY, S. K.; RATH, S. In-process tool wear estimation in milling using cutting force model. **Journal of Materials Processing Technology**, v.99, p.113-119, 2000.
- [16] 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.
- [17] CHO, D.; LEE, S. J.; CHU, C. N. The state of machining process monitoring research in Korea. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.39, p.1697-1715, 1999.
- [18] PROMESS. Michigan, EUA . **Sistemas de sensoriamento para manufatura**. Disponível em: <<http://www.promessinc.com>>. Acesso em: 12 de jul. 2002.
- [19] PROMETEC. Aachen, Alemanha. **Sistemas de monitoramento de máquinas, ferramentas e análise do processo**. Disponível em: <<http://www.prometec.com>>. Acesso em: 12 de jul. 2002.

- [20] SENSIS. São Carlos. **Sistemas de automação para indústrias, sistemas de controle de iluminação e ensino CNC**. Disponível em: <<http://www.sensis.com.br>>. Acesso em: 12 de jul. 2002.
- [21] SANTOS, M. T. **Estudo do monitoramento do desgaste de fresas de topo baseado no emprego de sensores**. 184p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- [22] GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing: material, process and systems**. 1.ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.
- [23] DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 3.ed. São Paulo: Artliber, 2001.
- [24] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1978. v.1.
- [25] MACHINING DATA CENTER. **Machining data handbook**. 3.ed. Cincinnati, Ohio: MDC, 1980. v.2.
- [26] STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II – Brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1992.
- [27] SKF Ferramentas S. A. **Manual Técnico SKF**. São Paulo, 1967.
- [28] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1987.
- [29] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Tool life testing in milling – part 2: End milling – ISO 8688-2**. Genève, 1989.
- [30] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook**. 10.ed. Cincinnati, Ohio: ASM, 1990.
- [31] LEE, T. S.; LIN Y. J. A 3D Predictive Cutting-Force Model for End Milling of Parts Having Sculptured Surfaces. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.16, p.773–783, 2000.

- [32] SHIN, Y. C.; WATERS, A. J. A new procedure to determine instantaneous cutting force coefficients for machining force prediction. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.37, n.9, p.1337-1351, 1997.
- [33] ZHENG, L.; CHIOU, Y. S.; LIANG, S. Y. Three dimensional cutting forces analysis in end milling. **International Journal of Mechanical Engineering Science**, v.38. p.259-269, 1996.
- [34] MONTGOMERY, D.; ALTINTAS, Y. Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling. **Journal of Engineering for Industry**, v.113, p.160-168, 1991.
- [35] LI, H. Z.; ZHANG, W. B.; LI, X. P. Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory. **International Journal of Mechanical Science**, v.43, p.1711-1730, 2001.
- [36] FUH, K.; HWANG, R. A predicted milling force model for high-speed end milling operation. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, C.37, n.7, p.969-979, 1997.
- [37] SMITH, S.; TLUSTY, J. An overview of modelling and simulation of the milling process. **Journal of Engineering for Industry**, v. 113, p.169-175, 1991.
- [38] ENGIN, S.; ALTINTAS, Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical and mills. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.41, p.2195-2212, 2001.