

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Fabio Ricardo
da Silva E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 15/05/98.
O. Novaski
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

O Processo de Fresamento na Zona de Transição entre as Velocidades Convencionais e a Alta Velocidade

Autor : Fabio Ricardo da Silva

Orientador: Prof. Dr. Eng. Olívio Novaski

05/98

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

**O Processo de Fresamento na Zona de Transição
entre as Velocidades Convencionais e a Alta
Velocidade**

Autor : Fabio Ricardo da Silva

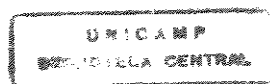
Orientador: Prof. Dr. Eng. Olívio Novaski

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 15 de maio de 1998
S.P. - Brasil



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
T/UNICAMP	
Si38p	
V.	Ex.
TOMO: BC/35404	
PROC. 395/98	
C ☐	D ☒
PREÇO: R\$ 11,00	
DATA: 09/10/98	
N.º CPD	

CM-00117873-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38p Silva, Fabio Ricardo da
O processo de fresamento na zona de transição entre as velocidades convencionais e a alta velocidade. / Fabio Ricardo da Silva.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Olívio Novaski
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Fresagem (Trabalhos em metal). 2. Usinagem. 3. Processos de fabricação. 4. Metais – Corte. I. Novaski, Olívio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

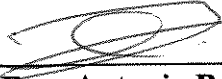
**O Processo de Fresamento na Zona de Transição
entre as Velocidades Convencionais e a Alta
Velocidade**

Autor: **Fabio Ricardo da Silva**

Orientador: **Prof. Dr. Eng. Olívio Novaski**



Prof. Dr. Eng. Olívio Novaski, Presidente
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Eng. Antonio Batocchio
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Eng. Roberval Rymer S. de Carvalho
Escola Federal de Engenharia de Itajubá

Campinas, 15 de maio de 1998

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Eng. Olívio Novaski pelo apoio constante, pela preciosa orientação e auxílio para o desenvolvimento científico desse trabalho.

Ao amigo Sr. Júlio da Cruz Roque pela credibilidade e pelo apoio.

Aos amigos Maurício Ferraz e Eduardo Polesi Almirall da Seco Tools Indústria e Comércio Ltda. pelo auxílio e apoio nos trabalhos experimentais e na condução das análises metalográficas.

Ao amigo Mauro Roberto Chaves pelo apoio e pela força nos momentos críticos de desabafo.

À Seco Tools Indústria e Comércio Ltda., representada pelo Sr. Júlio da Cruz Roque, por ter permitido que fosse utilizado parte do horário de expediente para o desenvolvimento científico do trabalho e pela utilização de suas instalações, equipamentos e ferramentas.

Aos meus pais, ao meu irmão e sua família e a minha noiva pela compreensão, apoio e dedicação constantes.

Mais vale a lágrima derramada por não ter vencido
do que a vergonha por não ter lutado

(Antonio Ermírio de Moraes)

Resumo

SILVA, Fabio Ricardo, O Processo de Fresamento na Zona de Transição entre as Velocidades Convencionais e a Alta Velocidade, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 110p. Dissertação (Mestrado)

Atualmente a tecnologia de usinagem à alta velocidade tem ganho cada vez mais evidência no contexto industrial. Isso se deve principalmente à necessidade de ciclos de trabalho cada vez mais curtos, elevada precisão e baixos custos. Inicialmente o processo de desenvolvimento da tecnologia HSC (High Speed Cutting) verificou o comportamento dos processos de corte à alta velocidade em ligas de titânio e aço, sem contudo, alcançar grandes resultados. Em uma segunda etapa, as pesquisas se voltaram para a melhoria da precisão dimensional e da qualidade da superfície gerada, conseguindo alguns resultados significativos, principalmente na usinagem do alumínio e suas ligas. No terceiro estágio do desenvolvimento, foram fixados objetivos mais práticos como a melhoria da produtividade na usinagem da maioria dos materiais. Nessa etapa de desenvolvimento, a aplicação da tecnologia de corte à alta velocidade se voltou principalmente nas aplicações de fresamento de perfis complexos, mais especificamente nos setores de ferramentaria e matrizaria. Esse trabalho, procurou verificar, justamente, a região compreendida entre os processos de fresamento que utilizam velocidades de corte consideradas convencionais e as altas velocidades de corte. Para tanto, foi proposto um estudo do comportamento das classes de metal duro e cermet em um material de grande aplicação na indústria de ferramentaria e matrizaria, utilizando um equipamento de alta velocidade (HVM - High Velocity Machine). Os resultados obtidos, foram plotados e analisados, indicando uma tendência diferente dos resultados obtidos na região considerada de altíssima velocidade de corte. Os resultados desse trabalho mostram que a região intermediária entre as altíssimas velocidades e as velocidades convencionais, deve ser melhor estudada, principalmente por ser atualmente a região mais utilizada dentro da indústria metal mecânica.

Palavras Chave

1. Fresagem (trabalhos em metal). 2. Usinagem. 3. Processos de fabricação. 4. Metais - Corte. I. Novaski, Olívio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Abstract

SILVA, Fabio Ricardo, The Milling Process in the Transition Zone between Conventional Speed and High Speed Cutting, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 110p. Dissertação (Mestrado)

Actually the high speed cutting technology has gotten more evidence in the industrial context, due to the necessity of the short work cycle times, high dimension accuracy and short costs. Initially, the development process of the HSC technology (High Speed Cutting), found to verify the behavior of the high speed cutting process of the titanium and steel alloys, without however, achieving good results. In the second step, the researches concentrated the efforts in the machining accuracy and the surface quality improvements, achieving some significant results in the aluminium machining. In the third stage of development, were fixed more practical objectives as the improvement of the productivity in the more common materials. In this stage, the high speed cutting technology is achieving evidence, mainly in the milling application of the complex shapes, specifically in the mould and die industries. This work found to verify, properly, the region between the milling processes that uses conventional cutting speeds and high cutting speeds. Therefore, it was proposed a hardmetal and cermet grade behavior survey in a wide application material for mould and die suppliers and it was used a HVM (High Velocity Machine) equipment. The achieved results, were plotted and analysed, showing a different tendency from the results achieved in the high speed cutting considered region. The results of this work showed that the intermediate region between the high speed cutting and the conventional speed cutting, must be better studied, mainly because actually it is the more important region for the metal-mechanics industry.

Key Words

1. Milling (Metal working). 2. Machining. 3. Manufacturing process. 4. Metals - Cut. I. Olívio, Novaski. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Title.

Abstract

SILVA, Fabio Ricardo, The Milling Process in the Transition Zone between Conventional Speed and High Speed Cutting, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 110p. Dissertação (Mestrado)

Actually the high speed cutting technology has gotten more evidence in the industrial context, due to the necessity of the short work cycle times, high dimension accuracy and short costs. Initially, the development process of the HSC technology (**High Speed Cutting**), found to verify the behavior of the high speed cutting process of the titanium and steel alloys, without however, achieving good results. In the second step, the researches concentrated the efforts in the machining accuracy and the surface quality improvements, achieving some significant results in the aluminium machining. In the third stage of development, were fixed more practical objectives as the improvement of the productivity in the more common materials. In this stage, the high speed cutting technology is achieving evidence, mainly in the milling application of the complex shapes, specifically in the mould and die industries. This work found to verify, properly, the region between the milling processes that uses conventional cutting speeds and high cutting speeds. Therefore, it was proposed a hardmetal and cermet grade behavior survey in a wide application material for mould and die suppliers and it was used a HVM (**High Velocity Machine**) equipment. The achieved results, were plotted and analysed, showing a different tendency from the results achieved in the high speed cutting considered region. The results of this work showed that the intermediate region between the high speed cutting and the conventional speed cutting, must be better studied, mainly because actually it is the more important region for the metal-mechanics industry.

Key Words

- Milling, High Speed

Índice

Capítulo 1

Introdução	1
------------	---

Capítulo 2 - Revisão da literatura

2.1 Introdução	3
2.2 Vantagens do processo de usinagem a alta velocidade	5
2.3 Limitações do processo de usinagem a alta velocidade	5
2.4 Efeito da velocidade do eixo árvore sobre a estabilidade	6
2.4.1 O processo de amortecimento	7
2.5 Exigências do processo HSC quanto à ferramentas	8
2.5.1 Tipo de material cortante utilizado	9
2.5.2 A geometria da aresta de corte	13
2.5.3 O projeto da ferramenta	14
2.5.4 A interface ferramenta/eixo árvore	16
2.6 Máquinas operatrizes para usinagem HSC	17
2.6.1 A base	18
2.6.2 Eixos árvore de alta frequência	18
2.6.3 Carros de translação auxiliares	19
2.6.4 Guias	20
2.6.5 Fusos de avanço	20
2.6.6 Sistemas de controle - CNC	21
2.6.7 O sistema de extração de cavacos e o sistema de refrigeração	21
2.6.8 Dispositivos de segurança	22
2.7 Eficiência	22
2.8 Aplicação das máquinas HSC	22
2.9 Tecnologia de corte à alta velocidade	24
2.9.1 Tecnologia de corte de ligas leves e materiais não-ferrosos endurecidos	25

2.9.2	Qualidade das superfícies	25
2.9.3	Materiais de corte	26
2.9.4	Aplicações HSM nas ligas de alumínio	27
2.9.5	Tecnologia de corte dos aços e ferros fundidos	28
2.9.6	Aplicações HSC na indústria de matrizaria	30
2.10	Classificação das máquinas HSC	31
2.11	Considerações sobre avarias desgastes e curvas de vida	32
2.11.1	Avarias	33
2.11.1.1	Quebras	33
2.11.1.2	Trincas	34
2.11.1.3	Fadiga térmica	35
2.11.1.4	Deformações plásticas	36
2.11.2	Desgastes	37
2.11.2.1	Abrasão mecânica	39
2.11.2.2	Adesão e aresta postiça de corte	41
2.11.2.3	Difusão	43
2.11.2.4	Oxidação (Ação química e eletrolítica)	43
2.11.3	Características do desgaste das pastilhas de fresamento	44
2.11.4	Considerações sobre a vida da ferramenta	
2.11.4.1	Curvas de vida	46
2.11.4.2	Critérios de vida	49
2.11.4.3	Considerações sobre os modelos matemáticos	50
2.11.4.4	Variabilidade da vida de uma ferramenta de corte	51
2.12	Influência dos elementos de liga sobre a usinabilidade dos aços	52
Capítulo 3 - Ensaios de laboratório		
3.1	Introdução	57
3.2	Informações gerais do experimento	57
3.2.1	Máquina-ferramenta	57
3.2.2	Dispositivo de locação/fixação	58
3.2.3	Ferramenta	59
3.2.4	Montagem do adaptador porta-ferramentas	59
3.2.5	Adaptador porta-ferramentas	60
3.2.6	Equipamento de medição	60

3.2.7 material do corpo de prova	61
3.2.8 Análise química, física e metalográfica	
3.2.8.1 Teste de dureza	61
3.2.8.2 Composição química	62
3.2.8.3 Análise metalográfica	62
3.3 Delimitações gerais	
3.3.1 Universo em estudo	62
3.3.1.1 Aço ferramenta endurecível VP40 ISOMAX	63
3.3.1.2 Centro de usinagem horizontal MCA-H150	64
3.3.1.3 Ferramenta	64
3.3.1.4 Classes de metal duro e cermet	65
3.3.1.5 Dados de corte	69
3.3.2 Metodologia do experimento	71
Capítulo 4 - Resultados	
4.1 Curvas de desgaste	72
4.1.1 Ensaio 1	73
4.1.2 Ensaio 2	74
4.1.3 Ensaio 3	75
4.1.4 Ensaio 4	76
4.1.5 Ensaio 5	77
4.1.6 Ensaio 6	78
4.2 Considerações sobre os ensaio de laboratório	
4.2.1 Classe T15M (ISO K01-K25)	79
4.2.2 Classe T20M (ISO P10-P30, M15-M25, K20-K35)	82
4.2.3 Classe S60M (ISO P30-P45, M30-M35)	84
4.2.4 Classe C15M (ISO P05-P25, M10-M25)	87
Capítulo 5 - Conclusões	
5.1 Conclusões	90
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	91
Referências bibliográficas	92

Lista de figuras

Figura	Descrição	Página
1	Variáveis de processo relacionadas à tecnologia de corte	4
2	Faixas de velocidade limite para operações HSM	6
3	Fenômeno de amortecimento nos processos HSM	7
4	Profundidade de corte limite na zona de amortecimento	8
5	Evolução dos desgastes para diferentes materiais de corte durante operações HSC dos aços	9
6	Evolução dos desgastes de uma fresa esférica de PCBN durante a usinagem HSC de um aço ferramenta com 57 HRC	10
7	Evolução dos desgastes para diferentes materiais de corte durante operações HSC em plásticos de engenharia	12
8	Influência da geometria da aresta de corte sobre a força de corte	13
9	Influência da geometria da aresta de corte sobre a vida da ferramenta	14
10	Deformações do adaptador ocasionadas pela força centrífuga	16
11	Acoplamento modular balanceado para elevadas velocidades de corte com sistema de fixação HSK DIN 69893 forma A	17
12	Projeto típico de unidade motora para máquinas HSC	19
13	Desempenho de unidades motoras HSC	20
14	Eficiência do fresamento à alta velocidade em componentes aeronáuticos	23
15	Qualidade da superfície na usinagem HSM de latão isento de chumbo	26
16	Evolução da temperatura de corte em operações de fresamento à alta velocidade	29
17	Variação da altura do perfil gerado em função da espessura de penetração	30

Figura	Descrição	Página
18	Classificação das máquinas de fresamento segundo critérios HSC	32
19	Exemplo de quebra em pastilha de metal duro P20, devido à sobrecarga ocasionada por sobre-material excessivo	33
20	Lascamento severo causado por fluxo de cavacos defeituosos	34
21	Trincas térmicas em pastilha de fresamento ISO P25, classe Seco T25M	35
22	Exemplo de deformação plástica em pastilha de torneamento ISO-P20	36
23	Desgastes convencionais em ferramentas de torneamento	38
24	Desgaste por abrasão causado por inclusões duras na peça	39
25	Desgaste de entalhe causado por superfícies duras	40
26	Aresta postiça de corte em pastilha sem cobertura	42
27	Exemplo de craterização severa por difusão intermetálica em pastilha ISO-P20	43
28	Exemplo de craterização por efeito eletrolítico em pastilha ISO-P20	44
29	Curva de desgaste em função da vida T (min)	47
30	Curva de vida para diferentes velocidades de corte	48
31	Intervalos linearizados da equação de Taylor	51
32	Centro de usinagem horizontal HELLER MCA-H150 usado nos ensaios de laboratório	58
33	Croquis do corpo de prova	71
34	Sistema de fixação do corpo de prova	71
35	Curva de desgaste para a 1ª condição de ensaio	73
36	Curva de desgaste para a 2ª condição de ensaio	74
37	Curva de desgaste para a 3ª condição de ensaio	75
38	Curva de desgaste para a 4ª condição de ensaio	76
39	Curva de desgaste para a 5ª condição de ensaio	77
40	Curva de desgaste para a 6ª condição de ensaio	78

Lista de tabelas

Tabela	Descrição	Página
1	Características das coberturas das pastilhas de metal duro	10
2	Recomendações básicas de geometria para diferentes materiais	13
3	Vantagens tecnológicas e exemplos de aplicação HSC	23
4	Guia de soluções (Seco - 1994)	45
5	Resumo da influência dos elementos de liga sobre a usinabilidade dos aços	54
6	Resultados do desgaste VB máximo para a classe T15M	79
7	Resultados do desgaste VB máximo para a classe T20M	82
8	Resultados do desgaste VB máximo para a classe S60M	85
9	Resultados do desgaste VB máximo para a classe C15M	87

Nomenclatura

Letras latinas

Símbolo	Descrição	Unidade
D	Diâmetro de trabalho ou diâmetro da fresa	mm
f	Avanço	mm/rotação
ΔF	Força de compressão	N
H	Altura do perfil (matrizaria)	mm
K	Constante da equação de vida de Taylor	
L	Comprimento de corte	mm
n	Rotação	rpm
Q	Volume de material removido	cm ³ /min
Ra	Rugosidade média	μm
T	Vida da ferramenta	min ou m
x	Coeficiente da equação de vida de Taylor	
y	Coeficiente da equação de vida expandida de Taylor	
z	Coeficiente da equação de vida expandida de Taylor	

Letras gregas

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Ângulo de folga	° (graus)
α_o	Ângulo de folga medido no plano ortogonal	° (graus)
α_e	Ângulo de folga efetivo	° (graus)
γ	Ângulo de saída	° (graus)
γ_e	Ângulo de saída efetivo	° (graus)
γ_o	Ângulo de saída medido no plano ortogonal	° (graus)
λ	Ângulo de inclinação	° (graus)
λ_s	Ângulo de inclinação medido no plano de corte	° (graus)
κ_r	Ângulo de posição medido no plano de referência	° (graus)

Subescritos

Símbolo	Descrição	Unidade
a_e	Pentração de trabalho	mm
a_p	Profundidade de corte	mm
f_n	Frequência natural	Hz
f_z	Avanço por dente	mm/dente
h_m	Espessura média do cavaco	mm
L_C	Linha de calibragem	
t_e	Tempo efetivo	min
v_C	Velocidade de corte	m/min
v_f	Velocidade de avanço	mm/min

Abreviações

Símbolo	Descrição	Unidade
HSM*	High Speed Milling	
VB	Marca de desgaste ou desgaste de flanco	mm
HSM	High Speed Machine	
HSC	High Speed Cutting	
HSG	High Speed Grinding	
CBN	Cubic Boron Nitride	
PCBN	Polycrystaline Cubic Boron Nitride	
ALON	Alumínio, Oxigênio, Nitrogênio	
SIALON	Silício, Alumínio, Oxigênio, Nitrogênio	
M.D.	Metal Duro	
TiC	Carbeto de titânio	
TiN	Nitreto de titânio	
Ti(C,N)	Carbonitreto de titânio	
(Ti,Al)N	Nitreto de titânio e alumínio	
Al_2O_3	Óxido de alumínio	
HSK	Kegel-Hohlschäfte	
CNC	Computer Numeric Control	
PCD	Polycrystaline diamond	
3D	Tridimensional	
HVM	High Velocity machine	
C.A.	Corrente alternada	
TaC	Carbeto de tântalo	

Abreviações (continuação)

Símbolo	Descrição	Unidade
NbC	Carbeto de nióbio	
WC	Carbeto de tungstênio	
SMG	Seco Material Groups (Grupos de materiais Seco)	
Ti(C,O,N)	Carbóxinitreto de titânio	
CVD	Chemical Vapour Deposition	

Siglas

PTW	Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschine Instituto de Engenharia de Produção e Máquinas Ferramentas da Universidade Técnica de Darmstad
-----	--

Capítulo 1

Introdução

Hoje a otimização das condições de produção se apresenta como um dos objetivos principais da indústria de bens de consumo. No caso particular da indústria mecânica de ferramentaria, otimizar significa reduzir os tempos de fabricação dos diferentes produtos, envolvendo desde os tempos de processamento até tempos relativos a espera, preparação de máquinas e dispositivos, etc... Nas ferramentarias e matrizerias o lote de fabricação é geralmente unitário, fato que implica na alocação de todos os custos de produção diretamente sobre um único produto. Nesse caso fica evidente a necessidade da determinação de condições operacionais ideais.

Observando atentamente esse tipo de atividade, verifica-se que grande parte do tempo disponível na máquina é gasto em operações e movimentos que não agregam valor ao produto e consomem muito tempo, tanto de operadores quanto de mão-de-obra especializada de alto custo. Além disso, o tempo restante em que a máquina efetivamente remove material é bastante elevado, podendo ser subdividido basicamente em quatro etapas distintas: desbaste, semi-desbaste, semi-acabamento e acabamento. Dentre essas quatro etapas, o acabamento consome praticamente metade de todo o tempo gasto na fabricação do produto, tornando essa operação altamente improdutiva. A esse fato, soma-se ainda que a maior parte dos perfis complexos gerados em moldes e matrizes sofrem operações manuais de acabamento que aumentam consideravelmente o tempo final.

Quando as operações de acabamento são efetuadas mecânica ou automaticamente, necessitam de ferramentas esféricas de pequeno diâmetro e elevado comprimento, fato que diminui consideravelmente a estabilidade do sistema, induzindo a vibrações.

Com o objetivo de minimizar o efeito nocivo da vibração sobre a vida da ferramenta, normalmente utiliza-se o artifício prático da redução da espessura do cavaco (carga sobre a aresta de corte) mediante à diminuição do avanço. A menor taxa de avanço combinada com a pequena largura de penetração tornarão a operação ainda mais improdutiva. Sob esse enfoque, a utilização da tecnologia de usinagem a alta velocidade representa um grande salto na solução definitiva de um dos principais problemas encontrados na indústria de moldes e matrizes, ou seja, a redução significativa nos tempos de corte. O presente trabalho tem por objetivo principal, investigar a região intermediária compreendida entre o fresamento convencional e o fresamento considerado de alta velocidade. Para tanto, foi proposto um estudo comparativo de classes de metal duro e cermet com a finalidade de identificar o comportamento dos desgastes, das condições de usinagem e do desempenho final das ferramentas, em condições de remoção moderadamente severa. Para tanto, foram utilizados máquinas e equipamentos disponíveis no mercado e tecnologias de ferramentas largamente difundidas. Ao longo de todo o trabalho a região intermediária será chamada de região de transição.

Basicamente o trabalho está dividido em cinco capítulos: introdução, revisão da literatura, ensaios de laboratório, resultados e conclusões. O capítulo de revisão da literatura aborda os principais assuntos relacionados a tecnologia de fresamento a alta velocidade, comentando definições, características, equipamentos e tecnologia de corte. No capítulo 2 também foram incluídas considerações sobre avarias desgastes e curvas de vida e informações pertinentes à influência dos elementos de liga sobre a usinabilidade dos aços.

No capítulo 3 são apresentados os recursos utilizados nos ensaios de laboratório e as justificativas principais referentes à seleção dos diferentes parâmetro utilizados no trabalho. No capítulo 4 são apresentados os resultados finais do trabalho com comentários relacionados ao comportamento metalúrgico das ferramentas e do material usinado. O capítulo 5 comenta as principais conclusões e sugere temas para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

2.1 Introdução

Definir o processo de usinagem à alta velocidade não é um problema simples de ser resolvido. Certamente o processo de corte a alta velocidade é um tema extremamente abrangente, cujas informações são bastante limitadas, principalmente as informações relacionadas ao fresamento e/ou retificação em altas velocidades (HSM* e HSG). As taxas de velocidade utilizadas atualmente nos processos de corte em geral, dependem de algumas variáveis como: o tipo de material, o tipo de operação de corte, o tipo de ferramenta, o material cortante, etc... Mas todavia, tais processos não sofrem uma influência significativa da tecnologia empregada. A ação de corte do processo de usinagem à alta velocidade, além de ser influenciado por todos os fatores citados, também depende de modo sensível do tipo de tecnologia disponível; ou seja, a tecnologia de corte será responsável pelo desenvolvimento de todos os outros componentes que fazem parte do processo (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996). Isso significa, que não só as ferramentas devem acompanhar a nova tecnologia, mas também outros elementos importantes do sistema, como partes específicas da máquina ferramenta e elementos de fixação (figura 1).

A usinagem em alta velocidade ou mais especificamente o corte de metais com altas velocidades (High Speed Cutting) tem atraído o interesse de vários pesquisadores e engenheiros. As aplicações iniciais voltaram-se principalmente para a usinagem de materiais homogêneos como o alumínio e o cobre.

Atualmente, os interesses pelo uso desse método de usinagem tem aumentado não só na indústria aeronáutica, mas também na indústria eletro-eletrônica.

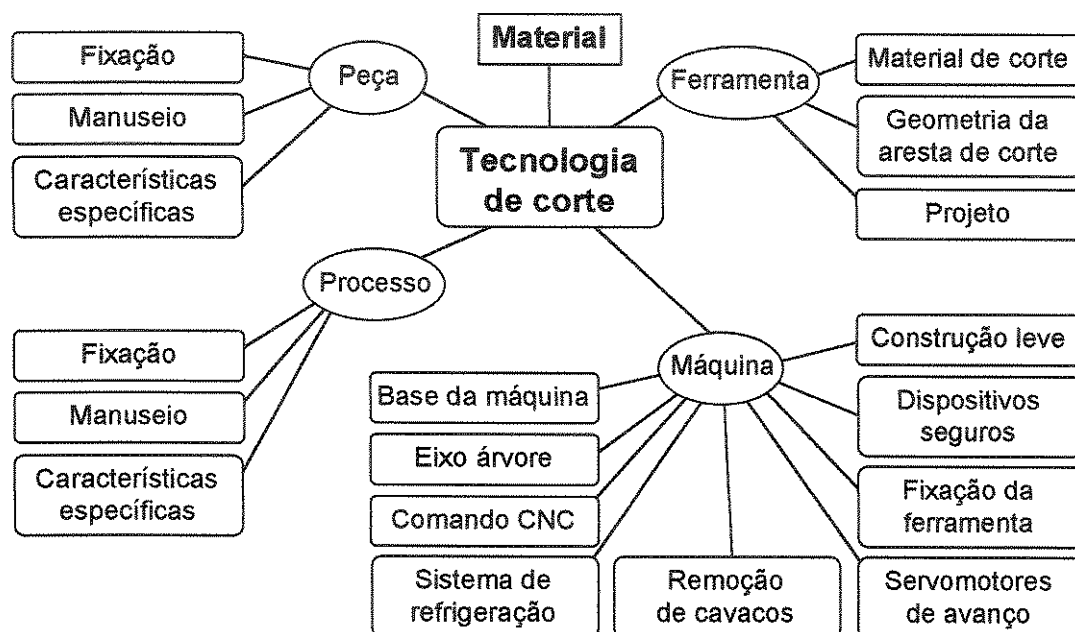


Figura 1 - Variáveis de processo relacionadas à tecnologia de corte (Schulz & Moriwaki - 1992, Finzer - 1997)

A ampliação do campo de aplicação desses novos métodos tornou-se possível, graças ao desenvolvimento de novos materiais cortantes, como, Si_3N_4 utilizado principalmente em ferros fundidos e o CBN utilizado em ferros fundidos e aços endurecidos. Atualmente as pesquisas e desenvolvimentos estão sendo dirigidos principalmente para a aplicação da tecnologia e para o aumento da produtividade operacional, no corte de materiais de usinagem extremamente difícil, como as ligas à base de níquel e aços ferramenta com alto teor em liga (fabricação de matrizes). Desde o período inicial de desenvolvimento, até o presente momento, o instituto PTW da Universidade Técnica de Darmstadt, fixou diversos objetivos de pesquisa, sendo que os principais podem ser classificados em três estágios distintos como segue:

1. O primeiro estágio, que não resultou em um grande sucesso, procurou verificar a penetração tecnológica do corte em altas velocidades em materiais como o titânio e algumas ligas de aço.
2. O segundo estágio visou o estudo de melhorias em aspectos como a precisão dimensional e o acabamento superficial nas operações de usinagem. Nessa linha, algumas aplicações resultaram em um sucesso relativo, principalmente nas operações de acabamento em ligas de alumínio.

3. O terceiro estágio procurou estabelecer um objetivo muito prático, que é a pesquisa do aumento da produtividade operacional em diversos tipos de materiais. Essa meta tem proporcionado o aumento do interesse geral na aplicação dessa tecnologia.

2.2 Vantagens do processo de usinagem a alta velocidade

Além do aumento da produtividade operacional, o processo de usinagem a alta velocidade apresenta as seguintes vantagens (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996):

- Melhoria do nível de precisão, especialmente durante a usinagem de componentes delgados, devido a redução da carga ocasionada pelos cavacos;
- Melhoria do acabamento superficial e redução dos danos causados à camada superficial do material;
- Redução na formação de rebarbas;
- Melhoria do fluxo de cavacos;
- Melhoria da estabilidade de corte, devido a menor vibração;
- Possibilidade de simplificação do ferramental, etc...

2.3 Limitações do processo de usinagem a alta velocidade

Na usinagem de alumínio e ligas de alumínio a velocidade de corte máxima não é mais limitada por fatores como: a vida da ferramenta, o hardware e software disponíveis ou a tecnologia das máquinas-operatrizes. No entanto, em outros tipos de materiais, de corte extremamente difícil (ligas à base de níquel, ligas de titânio, aços ferramenta, etc...) a limitação da velocidade de corte fica estabelecida principalmente pelo desgaste da ferramenta (Schulz & Sahm - 1996) (figura 2).

Um dos possíveis fatores limitantes para os processos de usinagem a alta velocidade é energia necessária para gerar o processo de corte (momento de energia).

Quando uma peça é cortada e o cavaco é gerado, o processo de corte exige uma energia adicional, afim de acelerar a passagem do cavaco pela zona de cisalhamento. A energia associada com esse momento de força é proporcional à potência de 3 vezes a velocidade de corte, enquanto que a energia de corte é basicamente proporcional à velocidade de corte (Schulz & Moriwaki - 1992).

2.4.1 O processo de amortecimento

O princípio básico do processo de amortecimento nas operações de usinagem pode ser resumido conforme segue (Tlusty - 1993) (figura 3).

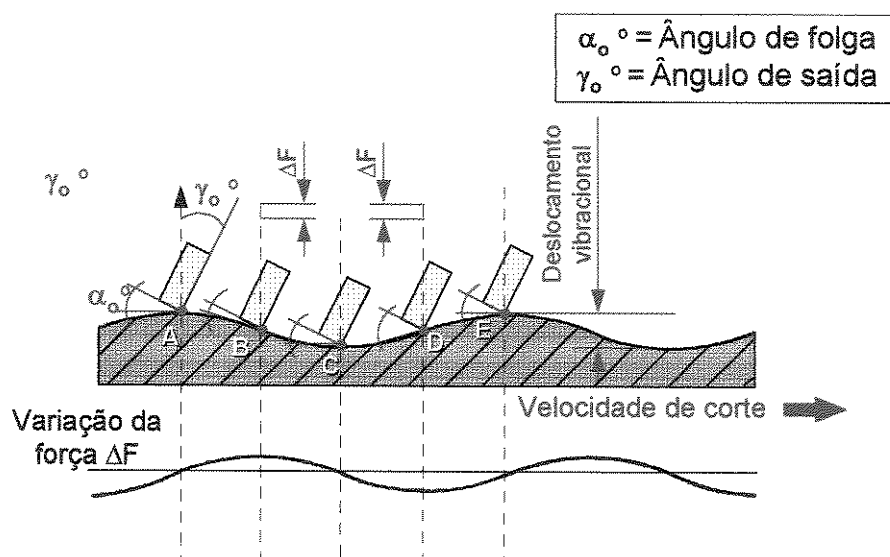


Figura 3 - Fenômeno de amortecimento nos processos HSM
(Tlusty - 1993)

A ferramenta se movimenta da esquerda para a direita com uma determinada velocidade de corte, vibrando para cima e para baixo. À medida em que a ferramenta desce a rampa compreendida entre os pontos A e C, o ângulo de folga efetivo diminui, voltando a aumentar durante a trajetória entre C e E. A componente ΔF da força de compressão depende do ângulo de folga. A diminuição desse ângulo até zero, ou a valores muito próximos a zero, causará uma interferência e um aumento do atrito no flanco da ferramenta. A componente ΔF da força de compressão varia proporcionalmente com a velocidade de vibração, atingindo seu valor máximo no ponto B e seu valor mínimo no ponto D.

Estando a ferramenta defasada em 90° com o deslocamento de vibração, que será máximo no ponto A, implicará, que a componente ΔF será em consequência a força de amortecimento. Para uma dada amplitude de vibração, a rampa da onda diminuirá com o aumento da velocidade de corte (Tlusty - 1993).

Com a redução da variação de α e ΔF , o efeito do processo de amortecimento também diminui. Em altas velocidades esse efeito torna-se praticamente desprezível (figura 4).

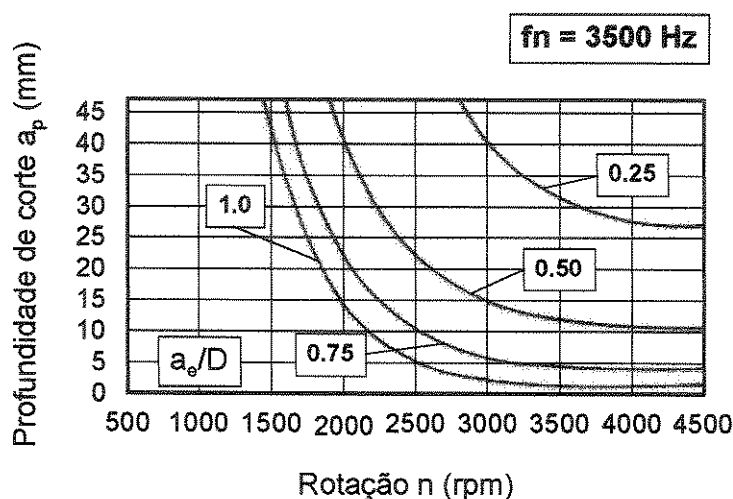


Figura 4 - Profundidade de corte limite na zona de amortecimento
(Thusty - 1993)

2.5 Exigências do processo HSC quanto à ferramentas

O projeto das ferramentas de corte para processos de usinagem que utilizam altas velocidades, deve considerar basicamente quatro critérios como segue (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996, Beck - 1996):

- 2.5.1 Tipo de material cortante
- 2.5.2 A geometria da aresta de corte
- 2.5.3 O projeto da ferramenta
- 2.5.4 A interface ferramenta/eixo árvore

2.5.1 Tipo de material cortante utilizado

O principal fator para a seleção do material cortante é o conhecimento básico dos fenômenos de desgaste. O desgaste por abrasão, normalmente, se apresenta como fenômeno predominante nos processos de usinagem convencionais.

Em processos de corte HSC o desgaste por abrasão se apresenta somente como mais um dos fatores a serem considerados (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996). Nos processos HSC, o aumento da temperatura causada pelo aumento da velocidade de corte, tende a acelerar a ocorrência de outros fenômenos de desgaste, entre a peça e a ferramenta, tais como a difusão e a oxidação (Piippo - 1989). A usinagem de materiais ferrosos como os aços liga, requer materiais cortantes como: o metal duro com e sem cobertura, cermets, cerâmicas e o nitreto cúbico de boro policristalino. A figura 5 apresenta os resultados de ensaios conduzidos pela Universidade Técnica de Darmstadt na usinagem do aço Ck45 (similar ao aço ABNT 1045) com diferentes materiais de corte em diferentes avanços por dente. A figura 6 mostra os resultados de uma fresa com ponta esférica de PCBN, usinando um aço liga com uma dureza de 57 HRC em três diferentes condições de corte. As pastilhas de metal duro sem cobertura, do tipo ISO-P, são recomendadas devido às maiores concentrações de carbeto de tântalo e titânio, que conferem ao material maior dureza a quente, ao mesmo tempo em que apresentam uma baixa afinidade química com o aço. As ferramentas de metal duro recobertas possibilitam um bom equilíbrio entre as propriedades físicas do material cortante e as características de resistência ao desgaste das coberturas (Marcondes - 1990). Através de testes de torneamento constatou-se, que as coberturas apresentam em âmbito geral características particulares conforme a tabela 1 (Seco Tools AB - 1996).

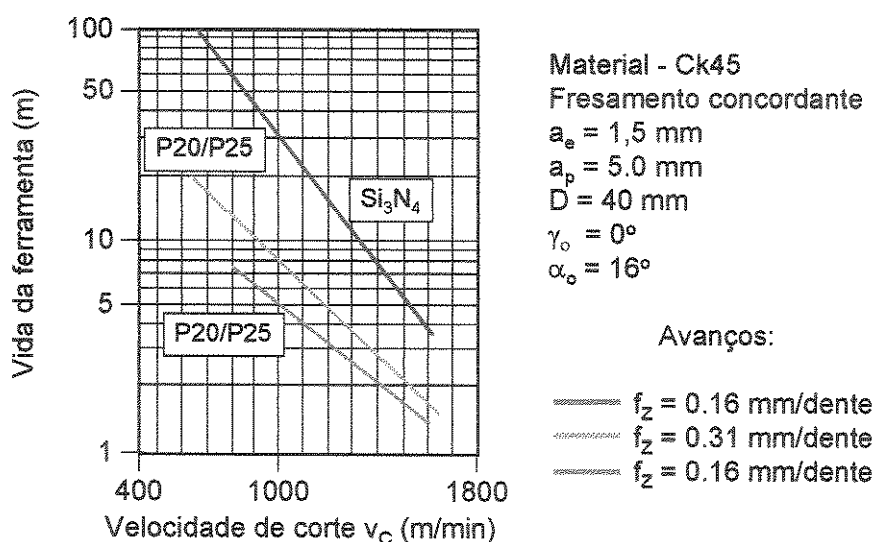


Figura 5 - Evolução dos desgastes para diferentes materiais de corte durante operações HSC de aços (Schulz & Moriwaki - 1992)

As ferramentas, que apresentam coberturas múltiplas, irão possibilitar características diferenciadas com relação aos fenômenos de desgaste, devido ao comportamento particular de cada camada, em diferentes faixas de temperatura.

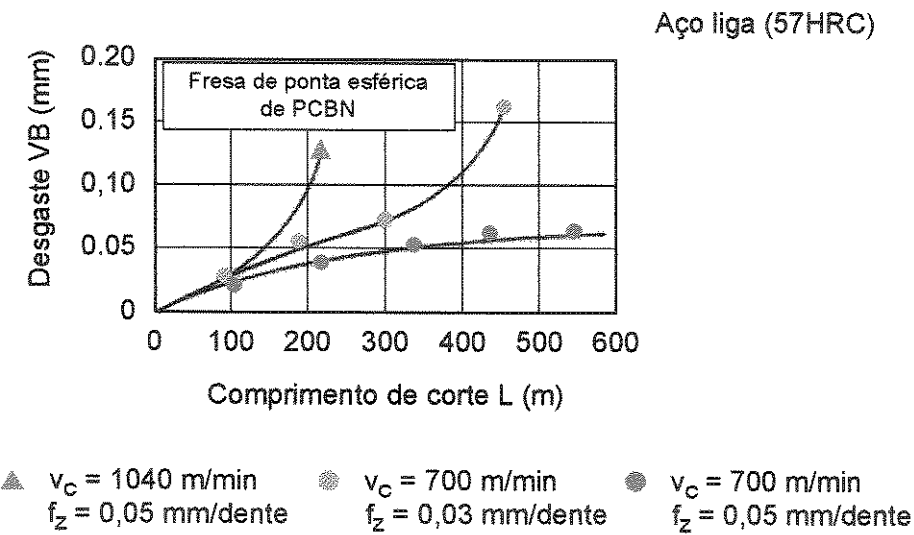


Figura 6 - Evolução dos desgastes de uma fresa esférica de PCBN durante a usinagem HSC de um aço ferramenta com 57 HRC (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996)

Tabela 1 - Características das coberturas das pastilhas de metal duro (Seco Tools AB - 1996)

Tipo de cobertura	Designação	Característica
Carboneto de titânio	TiC	Alta resistência ao desgaste de flanco Alta resistência à craterização
Nitreto de titânio	TiN	Alta resistência ao desgaste Alta resistência à craterização Baixa aderência (aresta postiça de corte)
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	Boa estabilidade química a altas temperaturas Alta resistência à craterização Alta resistência ao desgaste Baixa condutividade térmica

Tabela 1 - Características das coberturas das pastilhas de metal duro (continuação)
(Seco Tools AB - 1996)

Tipo de cobertura	Designação	Característica
Carbonitreto de titânio	Ti(C,N)	Combinação das características do TiN e TiC
Nitreto titânio/alumínio	(Ti,Al)N	Propriedades semelhantes ao Al ₂ O ₃
	ALON	Boa estabilidade química a altas temperaturas

Os cermets apresentam uma baixa afinidade química com o ferro, devido à baixa solubilidade do carboneto de tungstênio. Os cermets são materiais constituídos basicamente por partículas duras de TiN e TiC, que em altas temperaturas irão proporcionar elevada resistência química, diminuindo a ação dos fenômenos de difusão e oxidação. Os cermets comparativamente ao metal duro, atingem valores de vida mais elevados, devido à maior resistência da aresta de corte, a menor tendência à aderência e a maior estabilidade química. Os cermets e o metal duro são materiais indicados para operações onde a velocidade de corte é inferior à 1250 m/min (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996).

Os materiais cerâmicos, também apresentam uma ótima estabilidade química, mas em muitos casos recomenda-se o uso do metal duro, devido à baixa tenacidade e a pequena resistência a choques térmicos. A figura 7 apresenta os resultados da utilização de ferramentas cerâmicas, ferramentas de CBN e PCD na usinagem de um plástico de engenharia. Nessa figura observa-se que os materiais que apresentam em sua constituição básica a cerâmica apresentam valores de desgaste muito mais acentuados, devido principalmente à baixa resistência à choques térmicos. A utilização dos materiais cerâmicos na usinagem à alta velocidade dos ferros fundidos se deve principalmente à propriedade de estabilidade química. As cerâmicas óxidas, embora apresentem uma melhora na tenacidade com a adição de ZrO₂, ainda são muito frágeis (quebradiças) e resultam em elevados índices de quebras. As cerâmicas óxidas reforçadas com whisklers apresentam uma melhora considerável na resistência à fratura, mas ainda não possibilitam bom desempenho na usinagem à alta velocidade. A utilização das cerâmicas mistas (Al₂O₃ - TiN) nos processos HSC, permite a visualização de um pequeno aumento nos valores de desgaste de flanco. Os lascamentos e quebras das arestas de corte, em muitos casos, ocorrem prematuramente.

As cerâmicas à base de nitreto de silício apresentam boa resistência térmica e excelente tenacidade, alcançando bons valores de vida, mesmo em aplicações que apresentam cortes interrompidos (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996, SPK Feldmühle - 1990, Hertel GmbH). Testes de torneamento, com três tipos diferentes de cerâmica, em material do tipo EN9 (0.6% C) mostraram, que o desgaste por difusão é predominante nas operações de corte à alta velocidade, levando à elevadas reduções nos valores de vida da ferramenta (Schulz & Moriwaki - 1992).

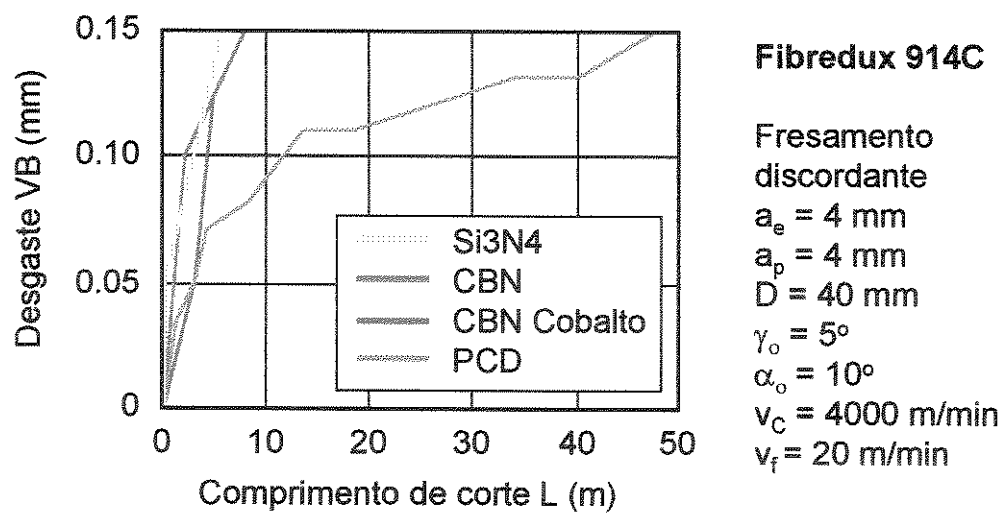


Figura 7 - Evolução dos desgastes para diferentes materiais de corte durante operações HSC em plásticos de engenharia (Schulz & Moriwaki - 1992)

Na usinagem de ferros fundidos de estrutura predominantemente perlítica (ferrita livre abaixo de 10%) recomenda-se a utilização do nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) ao invés das cerâmicas denominadas SIALON, devido à maior resistência ao desgaste. O uso do nitreto cúbico de boro policristalino em materiais de elevada dureza ($\geq 57 \text{ HRC}$) permite alcançar valores de vida aceitáveis. As ligas de titânio reagem com praticamente todos os materiais de corte, justificando o uso do metal duro e do aço rápido pelo menor custo (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996, Sahm - 1996).

2.5.2 A geometria da aresta de corte

Na usinagem HSC o projeto da ferramenta de corte é fator de grande importância para o bom funcionamento do processo. A geometria da aresta de corte está intimamente relacionada com a magnitude dos esforços durante a usinagem, influenciando os valores de desempenho da ferramenta (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996, Kress & Beck - 1996). A figura 8 mostra a influência do ângulo de saída efetivo da ferramenta sobre a força de corte na usinagem de uma liga de alumínio à 4712 m/min com diferentes avanços por dente. A figura 9 mostra a influência do ângulo de inclinação e do ângulo de cunha sobre a vida da ferramenta na usinagem de uma liga de titânio à 1000 m/min de velocidade de corte.

Sob esse enfoque, a otimização da geometria assume caráter de relevante importância. A tabela 2 (Schulz & Moriwaki - 1992) cita algumas recomendações quanto à geometria básica da aresta de corte, para ferramentas, que irão operar em condições de corte HSC para diferentes tipos de materiais.

Tabela 2 - Recomendações básicas de geometria para diferentes materiais
(Schulz & Moriwaki - 1992)

Material	γ_e	α_e
Ligas de alumínio forjadas	12° à 15°	20° à 25°
Ligas de alumínio fundidas	15°	20° a 25°
Aços liga de alto teor	0°	16°
Aços liga de usinagem difícil	0°	20°
Ferros fundidos	0°	12°
* Cobre e suas ligas	8°	16°
Plásticos reforçados e materiais fibrosos	>20°	15° à 20°

** Os ângulos discriminados referem-se à operações de fresamento*

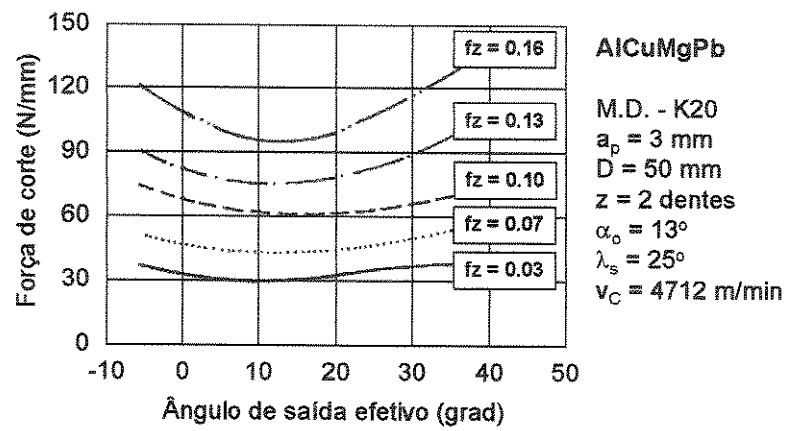


Figura 8 - Influência da geometria da aresta de corte sobre a força de corte (Schulz & Moriwaki - 1992)

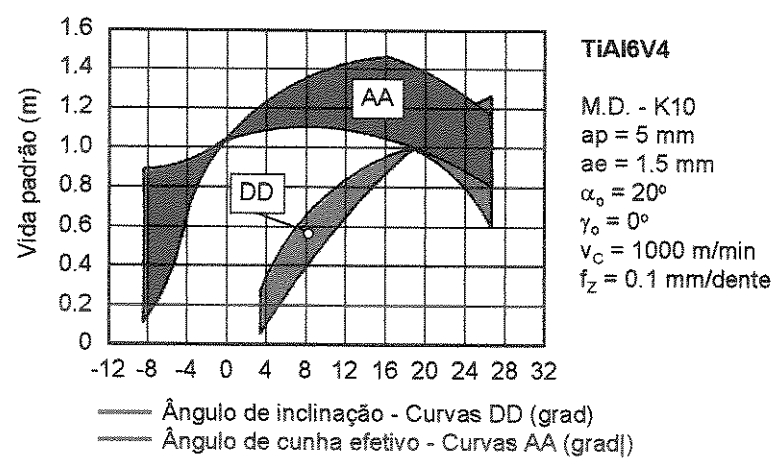


Figura 9 - Influência da geometria da aresta de corte sobre a vida da ferramenta (Schulz & Moriwaki - 1992)

2.5.3 O projeto da ferramenta

As velocidades de corte utilizadas atualmente como padrão para otimização e equilíbrio de efeitos tais como o desgaste, a qualidade da superfície, a temperatura e os esforços de corte, estão limitadas em um máximo de 6000 m/min (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996).

Essa limitação se deve especialmente à força centrífuga, que tende a deformar componentes básicos da ferramenta como os elementos de fixação e o material da aresta de corte. Caso ferramentas rotativas sujeitas à elevadas velocidades de trabalho venham a se quebrar, a enorme energia mecânica acumulada é liberada instantaneamente e os componentes são lançados com extrema violência, podendo danificar partes da máquina ou mesmo acidentar gravemente o operador. Infelizmente, ainda não existem normas, que tratam dos procedimentos de teste e a construção desses tipos de ferramentas. A Universidade de Darmstadt através do Instituto de Engenharia de Produção e Máquinas Ferramentas (PTW), tem pesquisado diretrizes para o projeto e teste de ferramentas para operações HSC (Kress & Beck - 1996, Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996, DIN 69893 teil 1-5 - 1994). As simulações de casos através do método de cálculo por elementos finitos tem mostrado, que o formato e a profundidade dos bolsões de armazenamento de cavacos tem uma profunda influência sobre a tensão acumulada nos entalhes.

Esses pontos de extrema fadiga estão localizados especialmente nos bolsões de armazenamento e na região de fixação das pastilhas (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996). Em muitos casos as ferramentas disponíveis no mercado não proporcionam a segurança necessária para trabalhos em elevadas velocidades. De acordo com a experiência acumulada no desenvolvimento e pesquisa de ferramentas para aplicações em elevadas rotações, a Universidade de Darmstadt apresenta as seguintes diretrizes para projeto e construção desses tipos de ferramentas (Kress & Beck - 1996, Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996):

- Utilizar sempre materiais dúcteis
- Minimizar o efeito de tensão causado por entalhes (dependente do espaço dos bolsões de armazenamento)
- Minimizar o efeito de tensão causado por entalhes (dependente do desenho da aresta de corte)
- Minimizar a massa de todos os componentes da ferramenta
- Ajustar o centro de massa sobre o menor raio possível
- Proporcionar o formato conveniente para todas as fixações

2.5.4 A interface ferramenta/eixo árvore

Os resultados obtidos pela usinagem com elevada velocidade dependem decisivamente da interface ferramenta/eixo árvore e do sistema de fixação utilizado, os quais devem operar em condições de extrema severidade. Essa interface está situada exatamente no ponto onde existe a maior concentração de esforços entre a peça e a máquina. A utilização de um projeto apropriado irá garantir uma troca de ferramentas rápida e um bom desempenho de todas as funções, melhorando a precisão e repetitividade. Além dos requisitos gerais de corte (por exemplo a transmissão do torque e dos esforços), o processo de corte à alta velocidade HSC apresenta exigências adicionais como (Voll - 1996, Walz - 1996, Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996):

- Pequeno erro de batimento;
- Ótima concentricidade;
- Ótima precisão de posicionamento;
- Redução da força centrífuga através da redução das dimensões radiais e das massas.

Devido às elevadas velocidades, tanto o eixo árvore como o cone da ferramenta sofrem efeitos da força centrífuga (figura 10). Nesse caso, o eixo irá se dilatar mais que a ferramenta, e a mesma se deslocará axialmente pela ação da força de fixação.

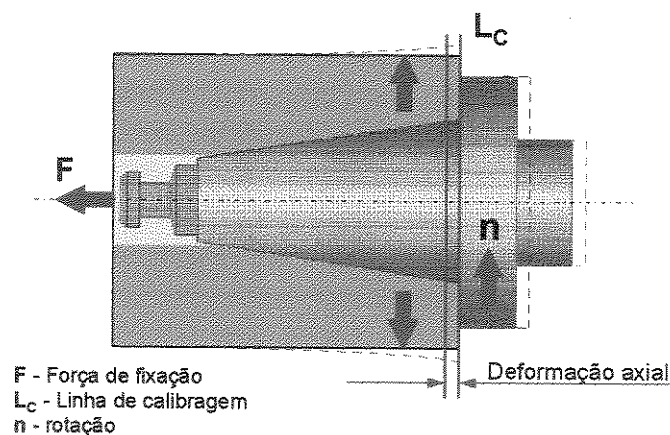


Figura 10 - Deformações do adaptador ocasionadas pela força centrífuga
 (Schulz - 1996, Schulz & Moriwaki - 1992)

As deformações das superfícies são diminuídas e a transmissão do torque pelo atrito de contato é aumentado. Contudo, a posição do centro da ferramenta não será garantida. Logo após a parada do eixo árvore, as deformações elásticas são reduzidas, aumentando a pressão sobre o cone da ferramenta, dificultando a extração do eixo árvore. Esse efeito de travamento pode ser evitado através da introdução de superfícies limitantes como flanges.

A utilização dos novos adaptadores vazados com trocadores automáticos de ferramentas padronizados pela norma DIN 69893, forma A, implicará na divisão dos esforços de fixação radiais e axiais entre os vários componentes do sistema, enquanto a força centrífuga age sobre a parte interna da ferramenta (figura 11) (Finzer - 1997, Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996). A montagem de mecanismos de sujeição similares aos rolamentos para velocidades infinitamente variáveis, resultarão em um sistema de fixação seguro, que suporta até quatro vezes o esforço gerado.

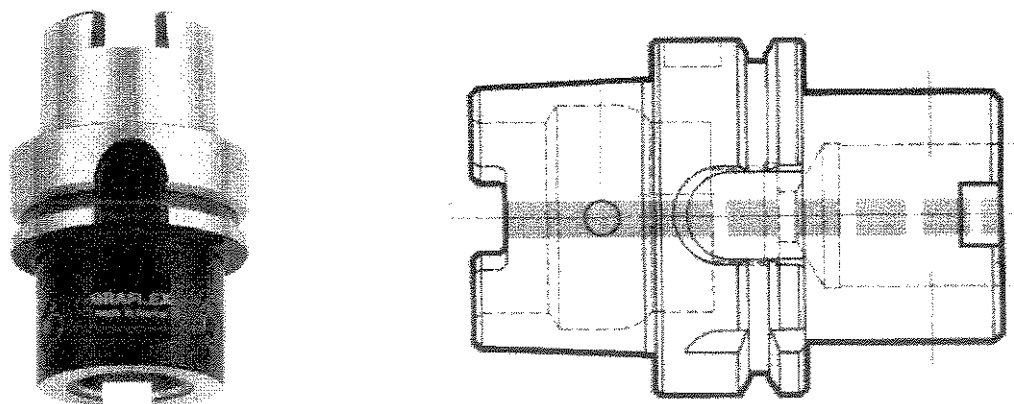


Figura 11 - Acoplamento modular balanceado para elevadas velocidades de corte com sistema de fixação HSK DIN 69893 Forma A Marca Graflex® (EPB® Emile PFALZGRAF S.A. - 1997)

2.6 Máquinas operatrizes para operações de usinagem HSC

A aplicação da tecnologia HSC somente será possível caso haja a introdução de novas soluções não convencionais quanto à concepção básica das máquinas ferramenta e seus diversos componentes vitais.

No que se refere à otimização dos avanços e velocidades, pode ser dito, que não existe máquina HSC para aplicações universais, ou seja, para cada caso particular de usinagem deverá existir modificações nos componentes da máquina afim de adequar o equipamento às novas exigências (Voll - 1996, Walz - 1996, Tlustý).

2.6.1 A base

Afim de obter um bom desempenho dinâmico, a base da máquina, em geral, deverá ser fabricada em concreto polimérico. As vantagens específicas no que concerne à capacidade de modelação com outros tipos de materiais permitirá uma grande redução dos níveis de custo (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996, Tlustý - 1993).

2.6.2 Eixos árvore de alta frequência

O componente mais importante das máquinas HSC é o eixo árvore (figura 12). Como regra geral o projeto do eixo árvore deve considerar um motor integrado porque a frequência do motor é sempre dividida entre os rolamentos. Desse modo, o uso de construções compactas e rígidas permitirá atingir frequências críticas muito maiores.

Inicialmente, a utilização de rolamento com rolos especiais (cerâmica) é a prática mais comum. Os rolamentos magnéticos e os rolamentos a ar também poderão ser utilizados em favor da obtenção do melhor desempenho do motor quanto ao máximo momento alcançado. O diâmetro da montagem será limitado principalmente pela velocidade periférica (força centrífuga) e pelas características do material utilizado (Voll - 1996, Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996, Tlustý - 1993). Operações contínuas e de grande duração poderão atingir velocidades da ordem de 7500 m/min, já operações, que apresentam ciclos curtos poderão utilizar velocidades de 9000 m/min (figura 13).

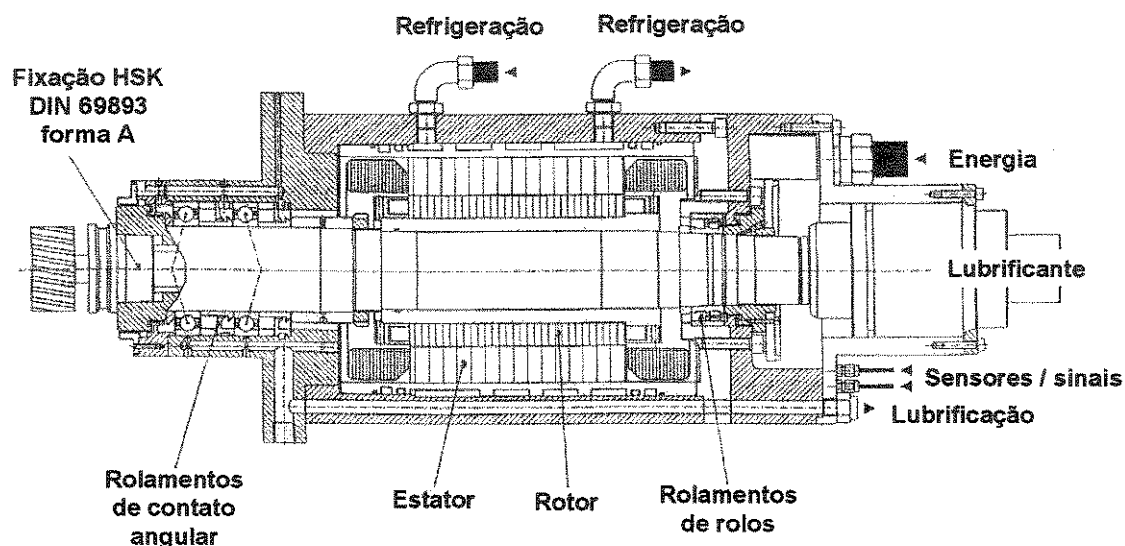


Figura 12 - Projeto típico de unidade motora para máquinas HSC
(Schulz - 1996, Schulz & Moriwaki - 1992, Finzer - 1997)

2.6.3 Carros de translação auxiliares

Exige-se de toda máquina HSC altas acelerações para manter as taxas de avanço constantes e a precisão dinâmica do conjunto. No entanto, uma das maneiras mais eficientes em alcançar esses dois requisitos principais é a redução da massa dos componentes móveis. A utilização de construções leves permite aumentos significativos da aceleração, especialmente com a utilização da tecnologia de motores lineares. Todos os componentes móveis da máquina deverão ser produzidos com uma relação de peso bastante reduzida, usando novos materiais como o alumínio, o titânio, plásticos reforçados, etc... Esses novos materiais irão proporcionar uma redução da massa de inércia por volta de 40% (Walz - 1996). A redução da massa também poderá ser conseguida através da (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996):

- Seleção do material construtivo mais apropriado;
- Aplicação de construções específicas;
- Otimização da geometria dimensional pelo uso de programas de cálculo por elementos finitos;
- Investigação dos efeitos sobre os componentes de fixação.

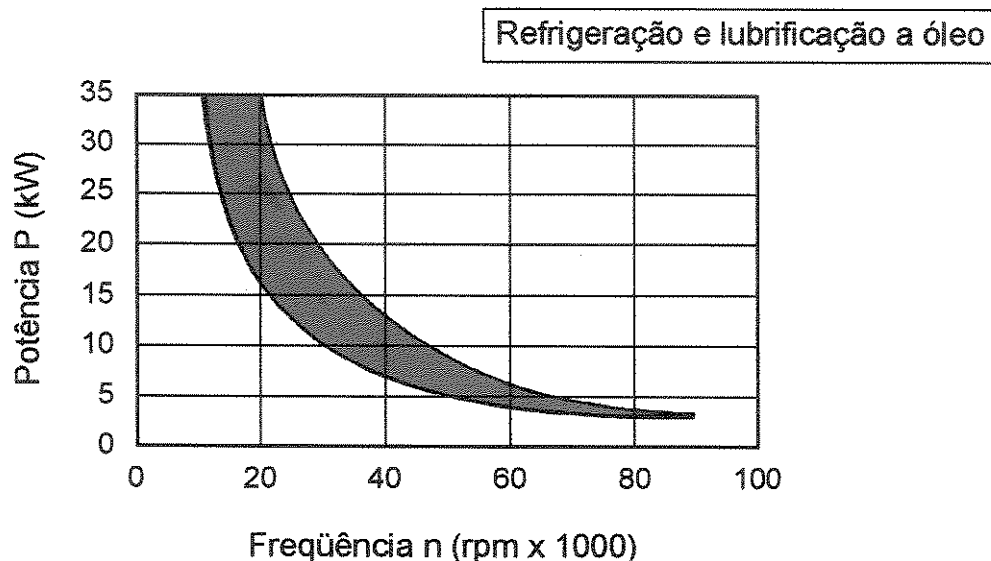


Figura 13 - Desempenho de unidades motoras HSC
(Schulz & Moriwaki - 1992, Voll - 1996)

2.6.4 Guias

Atualmente as modernas máquinas CNC já apresentam a incorporação da tecnologia de guias lineares para os componentes moveis. Como as condições de trabalho das operações de usinagem à alta velocidade são mais severas e as exigências quanto à precisão de posicionamento são muito maiores, as máquinas HSC também devem utilizar a tecnologia das guias lineares devido às características anti-atrito e a boa precisão oferecida, pelo uso de rolos e esferas (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996).

2.6.5 Fusos de avanço

A utilização dos fusos de esferas recirculantes permite a redução das folgas e do próprio momento de inércia, aumentando o avanço por rotação em até três vezes. As taxas de avanço, nesses casos, poderão atingir até 100 m/min.

A tecnologia dos servo-motores de acionamento conjugado aos fusos de esferas recirculantes, apresenta ótimas características dinâmicas, proporcionando controles de reversão, com baixas constantes de tempo e momentos de torque elevados, também em pequenos espaços de tempo (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996).

2.6.6 Sistemas de controle - CNC

Devido às elevadas taxas de avanço envolvidas, existem exigências muito severas quanto à velocidade de processamento do comando. Os atuais sistemas CNC são muito lentos para as taxas de avanço requeridas, visto que, o tempo de processamento da sentença é mais alto do que o tempo de acesso aos pontos programados para a trajetória de corte. Além disso, os atuais programas CNC utilizam uma quantidade de sentenças extremamente altas, com muitos pontos de trajetória programados. Se o tempo de processamento é maior do que o tempo de deslocamento, a máquina ficará alguns segundos parada, esperando o processamento da sentença. Como consequência as exigências quanto à capacidade de processamento são muito maiores do que as oferecidas pela maioria dos comandos CNC disponíveis no mercado (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996, Distler - 1996).

A solução para esse problema é a utilização de sistemas mais rápidos, que utilizam o processamento de muitas sentenças à frente e o recurso da interpolação flexível. O recurso da interpolação flexível agrupa diversas sentenças de interpolação linear em uma única sentença, reduzindo dessa forma, as acelerações e desacelerações, decorrentes da modificação da trajetória e da alteração das taxas de avanço. Esse é o principal motivo pelo qual se necessita sistemas de controle muito mais rápidos (Distler - 1996).

2.6.7 O sistema de extração de cavacos e o sistema de refrigeração

Devido às elevadas taxas de remoção de cavacos, as exigências quanto à extração dos mesmos torna-se muito mais severa. Afim de facilitar a remoção dos cavacos, recomenda-se a fixação da peça verticalmente (máquinas horizontais), facilitando a retirada dos cavacos da região de corte pela ação da gravidade.

Em todos os casos de usinagem HSC, recomenda-se a utilização de sistemas de refrigeração de elevada pressão (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996).

2.6.8 Dispositivos de segurança

A grande quantidade de cavacos produzidos, aliado a elevada velocidade de formação com a alta pressão de refrigeração, exige um encapsulamento do espaço de trabalho. Precauções de segurança, relativas à quebra da ferramenta são de extrema prioridade. As paredes da cabine de encapsulamento deverão ser resistentes o suficiente para absorver a energia de impacto, caso haja quebras ou o lançamento de componentes à alta velocidade. Paralelamente à essas providências, necessita-se de controles de monitoramento de processo on-line, porque muitas vezes, quando ocorrem acidentes durante a usinagem, o operador não consegue interferir a tempo no processo, podendo comprometer componentes importantes (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996).

2.7 Eficiência

Comparado às máquinas operatrizes convencionais, a utilização econômica das máquinas HSC é profundamente influenciada pela escolha correta da tecnologia de corte, pelas velocidades de corte ótimas, pelos avanços e pela ferramenta otimizada. Isso significa que, todo material a ser usinado dependerá de uma pequena gama de operações, que será influenciada pelos parâmetros de entrada da máquina operatriz, pela geometria da ferramenta e pelo material. Atualmente é possível alcançar reduções da ordem de 50% nos tempos de produção (figura 14) (Schulz - 1996, Finzer - 1997).

2.8 Aplicação das máquinas HSC

Atualmente muitas máquinas padrão já estão sendo equipadas com fusos, que apresentam capacidade de rotação entre 8000 e 12000 rpm e servo-motores de acionamento, que trabalham com velocidades de 20 a 25 m/min.

Usinagem de componentes aeronáuticos

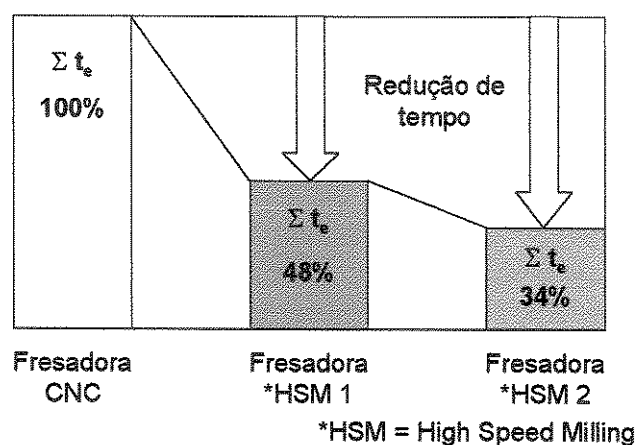


Figura 14 - Eficiência do fresamento à alta velocidade em componentes aeronáuticos
(Schulz - 1996, Schulz & Moriwaki - 1992, Finzer - 1997)

Em muitos casos, essas máquinas podem ser utilizadas para aplicações de corte à alta velocidade de aços, ferros fundidos ou ligas especiais, desde que, equipadas com os dispositivos de segurança apropriados (Tabela 3). Máquinas para usinagem de ligas não ferrosas, normalmente são equipadas com eixos árvore, que atingem rotações da ordem de 25000 a 50000 rpm (em alguns casos especiais 100000 rpm).

Tabela 3 - Vantagens tecnológicas e exemplos de aplicação HSC

(Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996)

Vantagens tecnológicas	Campo de aplicação	Exemplos de aplicação
Baixos esforços de corte	Produção de componentes extremamente delgados	Indústria aeroespacial Indústria automobilística Indústria de equipamentos domésticos
Altas frequências de excitação	Usinagem em frequências não críticas	Ind. de componentes de precisão Indústria de componentes óticos

Tabela 3 - Vantagens tecnológicas e exemplos de aplicação HSC (continuação)
(Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996)

Vantagens tecnológicas	Campo de aplicação	Exemplos de aplicação
Elevada taxa de remoção por unidade de tempo	Ligas metálicas não-ferrosas aços e ferros fundidos	Indústria aeroespacial matrizarias
Excelente qualidade superficial	Usinagem de precisão Peças especiais	Indústria de componentes óticos Ind.de componentes de precisão Ind.de compressores espirais
Transferência de calor pelos cavacos	Usinagem de componentes sensíveis à temperaturas críticas	Ind.de componentes de precisão Usinagem de ligas de magnésio

2.9 Tecnologia do corte à alta velocidade

O fresamento em alta velocidade significa operações de fresamento com velocidades 5 a 10 vezes maiores que o fresamento convencional. Referindo-se a problemas específicos do corte à alta velocidade, os diferentes materiais podem ser classificados em 4 classes distintas (Sahm - 1996):

- 1. Plasticos reforçados com fibras;
- 2. Ligas leves e materiais não-ferrosos;
- 3. Aços liga e ferros fundidos;
- 4. Materiais de baixa usinabilidade (por exemplo titânio, Inconel, etc...).

As altas taxas de avanço podem ser alcançadas mesmo com velocidades de corte convencionais, através do uso de altas rotações, em combinação com ferramentas de pequeno diâmetro.

O resultado dessa combinação também implicará em um processo de corte de alta velocidade. Em seguida será discutida a tecnologia de corte dos materiais ferrosos e não ferrosos.

2.9.1 Tecnologia de corte de ligas leves e materiais não-ferrosos endurecidos

A gama de operações HSC em ligas leves ou metais não-ferrosos de baixa usinabilidade atinge até o extremo das velocidades de corte e taxas de avanço. Em baixos avanços por dente, a gama HSC está limitada pela formação dos cavacos. Os cavacos tem volume muito pequeno e o calor gerado pelo atrito, durante o processo de corte, é extremamente alto. Especialmente na combinação baixos avanços e altas velocidades de corte, o calor acumulado no cavaco gera a aderência do cavaco com a superfície usinada. A utilização de fluidos de corte pode evitar esse efeito na maioria dos casos. A gama HSC apresenta um limite superior que é dado pela rugosidade teórica de 10 μm no fresamento de perfis (Sahm - 1996, Finzer - 1997).

Contudo esse limite tecnológico não ocorre em muitos processos de corte real, porque as taxas de avanço extremamente altas (20 a 30 m/min) que induzem a esse limite, não são alcançadas normalmente pelas máquinas-ferramenta (Sahm - 1996).

2.9.2 Qualidade das superfícies

O corte de ligas de alumínio e latão com elevadas velocidades (até 5500 m/min) permite alcançar excelente qualidade de superfície. A figura 15 mostra a rugosidade R_a média do latão isento de chumbo em função da velocidade de corte e da velocidade de avanço (Sahm -1996).

Com uma velocidade de avanço constante, a rugosidade diminui com o aumento da velocidade de corte. Isso significa uma melhor qualidade de superfície com um volume de remoção constante. Também utilizando avanços por dente constantes, o aumento da velocidade de corte pode levar à uma melhoria da qualidade de superfície (Sahm - 1996, Finzer - 1997).

As ligas de alumínio foram pesquisadas, pela Universidade Técnica de Darmstadt, com velocidades de corte até 9600 m/min. Entretanto em velocidades muito elevadas poderá haver o aumento da rugosidade, causado principalmente pelas elevadas temperaturas na região de contato entre o flanco da ferramenta e a peça. Nesses casos, o material é comprimido para fora da área de contato e adere ao flanco da ferramenta, levando a decréscimos na qualidade da superfície, especialmente com o uso de ferramentas com pequenos ângulos de folga.

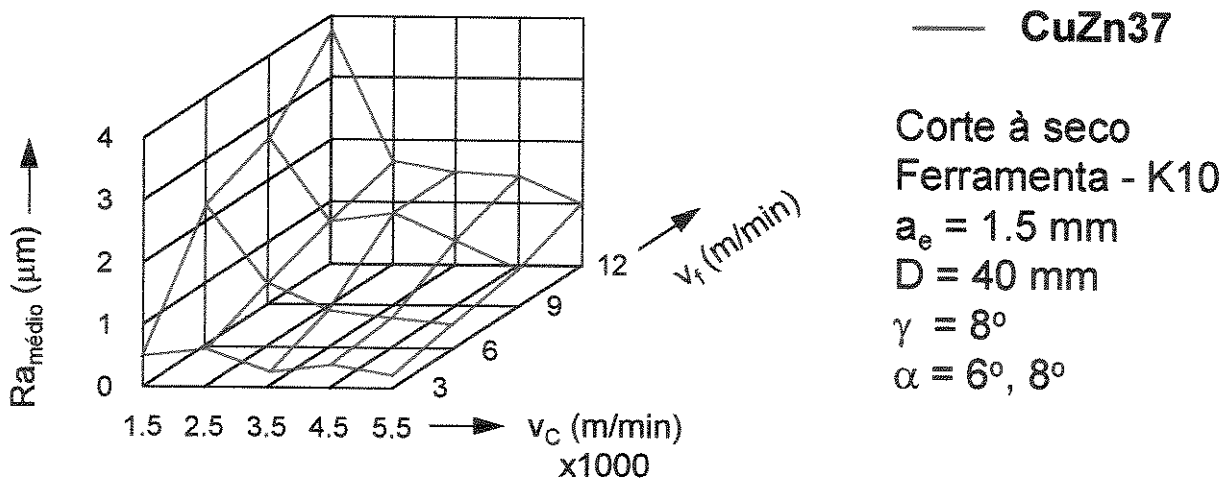


Figura 15 - Qualidade da superfície na usinagem HSM
de latão isento de chumbo (Sahm - 1996)

Na usinagem de ligas de alumínio forjado o ângulo de folga deve ser maior que 12° . Pequenos avanços por dente (abaixo de 0.03 mm) também deterioram a qualidade da superfície em velocidades de corte acima de 6000 m/min. Esse efeito (soldagem de cavacos) também ocorre em uma ampla faixa de velocidades de corte e taxas de avanço na usinagem de cobre, certas ligas de cobre, bronze estanho e prata. Os resultados mostrados foram realizados sem refrigeração. Através da utilização de refrigeração a soldagem de cavacos poderá ser parcialmente evitada e os valores de rugosidade podem ser reduzidos de 10 a 20% (Sahm - 1996).

2.9.3 Materiais de corte

O material de corte padrão para a usinagem em alta velocidade de ligas de alumínio e cobre é o metal duro K10 (Sahm - 1996). No entanto, a vida da ferramenta diminui com o aumento da velocidade de corte. Mesmo assim a vida proporcionada pelo metal duro K10 é suficiente (relação custo / benefício favorável) mesmo com velocidades de corte superiores a 5000 m/min. Somente ligas com elementos abrasivos, especialmente ligas AL-Si contendo mais de 12% de silício, irão proporcionar uma vida muito curta. Através de testes práticos verificou-se que o aumento do teor de silício de 12% para 21% diminuiu a vida da ferramenta de 160 m para 25 m (Sahm - 1996).

O corte desses materiais abrasivos exige a utilização do PCD. Em ligas de cobre, elementos como o níquel, alumínio e estanho aumentam o desgaste da ferramenta. Para ambos os grupos a utilização de aços super-rápidos não proporciona uma resistência ao desgaste suficiente. Os cerâmicos facilitam a soldagem dos cavacos no flanco da ferramenta. Conforme já foi mencionado, o metal duro K10 e o PCD são os materiais de corte mais recomendados para a usinagem de cobre a alumínio.

2.9.4 Aplicações HSM nas ligas de alumínio

É possível a usinagem em desbaste de ligas de alumínio e cobre no que se relaciona à tecnologia de corte, porque a limitação para esse tipo de operação está relacionada ao eixo árvore. A velocidade de corte ótima para usinagem de ligas de alumínio situa-se ao redor de 4000 m/min (Sahm - 1996). Para alcançar essa faixa de velocidade é necessário que o eixo árvore atinja rotações entre 30000 e 40000 rpm, tendo como base fresas de diâmetro 30 e 40 mm. Para conseguir altas rotações do eixo árvore, o diâmetro dos rolamentos do eixo deve estar abaixo de um determinado valor limite. Outra limitação relaciona-se ao maior diâmetro do rotor do eixo árvore, imposto pela força centrífuga. Por esses motivos, a potência disponível tende a decrescer com o aumento da velocidade do eixo. O corte a altas velocidades oferece excelente qualidade de superfície com taxas de remoção de material extremamente elevadas, principalmente nas operações de acabamento.

Utilizando altas velocidades de corte, em operações de fresamento de discos é possível reduzir a profundidade de corte e dividir a usinagem em dois ou mais passes sem qualquer desvantagem com relação ao tempo de ciclo, se comparado com o fresamento convencional (Sahm - 1996). Através da redução da profundidade de corte, as forças de corte são diminuídas e uma melhor precisão dimensional é alcançada. Fresar em dois passes ao invés de um único passe, na média, apresenta uma precisão dimensional consideravelmente maior.

No entanto, dividir a usinagem em uma quantidade de passes muito maior do que dois não trará, por consequência, uma melhora diretamente proporcional da precisão. Na indústria aero-espacial é possível usinar componentes com até 90% mais do volume removido com diversas cavidades e discos (Sahm - 1996).

2.9.5 Tecnologia de corte dos aços e ferros fundidos

O fresamento de alta velocidade dos aços e ferros fundidos apresenta as mesmas vantagens apresentadas nas operações HSM dos materiais não ferrosos. A limitação do uso de elevadas velocidades de corte na usinagem, desses materiais, é consequência direta do desgaste da ferramenta. Portanto é muito importante a otimização dos parâmetros de corte. A otimização do avanço por dente (f_z), dependendo da velocidade de corte utilizada, irá influenciar diretamente o valor de vida da ferramenta. O corte à alta velocidade de aços e ferros fundidos atinge temperaturas de corte extremamente elevadas e a fadiga térmica da ferramenta é decisiva para o processo. A figura 16 mostra o aumento da temperatura com o aumento da velocidade de corte até 4000 m/min (Sahm - 1996, Finzer - 1997). As temperaturas foram medidas através de um termopar introduzido a 1.3 mm de distância da ponta da ferramenta. As temperaturas medidas foram utilizadas para calcular a distribuição da temperatura pela ferramenta. As temperaturas máximas medidas no ponto de contato se situaram ao redor de 750°C com uma velocidade de 800 m/min e 1100°C a 1600 m/min (Sahm - 1996, Finzer - 1997).

Os carbeto mostraram uma grande redução de dureza em temperaturas ao redor de 800°C. Portanto, velocidades de corte de 800 m/min ou maiores causam desgastes severos nas ferramentas de metal duro.

A influência da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta foi confirmada através de testes práticos, mostrando que, em uma faixa de velocidades situada entre 400 e 800 m/min, houve uma redução na vida da ferramenta em aproximadamente 25% (Sahm - 1996). Mesmo velocidades de corte que excedam a temperatura crítica de 800°C, causam desgastes extremos ($v_c = 1600$ m/min). Como consequência da elevada fadiga térmica, causada pelo aumento da velocidade de corte, a carga mecânica em forma de avanço por dente deve ser reduzida (Sahm - 1996). Em altas velocidades de corte, a vida da ferramenta nos aços e ferros fundidos também é profundamente influenciada pela espessura de penetração.

Operações de fresamento de contornos com larguras de corte pequenas reduzem a fadiga térmica da ferramenta, porque o período de contato é muito pequeno e a ferramenta não se aquece muito. Além disso, o período de não-contato é longo e a ferramenta tem tempo para se resfriar. No caso de espessuras de penetração grandes, o calor gerado aumenta bastante a temperatura da ferramenta e o tempo de não-contato é muito curto (Sahm - 1996).

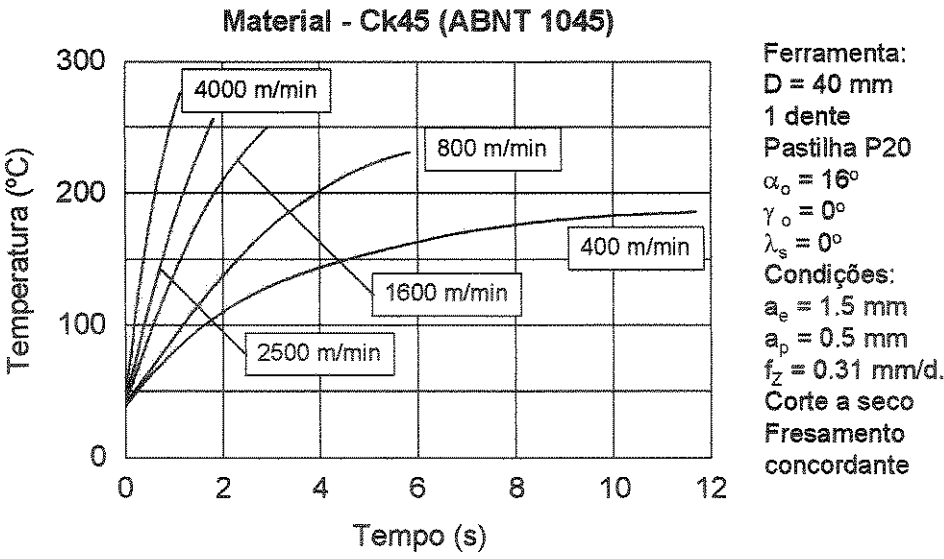


Figura 16 - Evolução da temperatura de corte em operações de fresamento a alta velocidade (Finzer - 1997)

Portanto, ao contrário do corte em altas velocidades, de materiais não-ferrosos e ligas leves, a usinagem em alta velocidade de aços e ferros fundidos deve ser limitada ao acabamento.

Para a usinagem de ferros fundidos, são recomendadas as cerâmicas à base de nitreto de silício. Com esse tipo de material de corte, os ferros fundidos não ligados podem ser usinados à velocidades de até 2000 m/min. Para a usinagem de ferros fundidos ligados ou ferros fundidos com elevada resistência à tração, a velocidade de corte deverá ser reduzida. A utilização de PCBN permite a utilização de altas velocidades de corte mesmo em ferros fundidos ligados. O PCBN apresenta melhor resistência a elevadas temperaturas dentre todos os materiais de corte, e, pode apresentar uma vida da ferramenta extremamente elevada em operações de usinagem a altas velocidades em ferros fundidos e nos aços. Mas a utilização do PCBN é limitada principalmente pela micro-estrutura do material a ser cortado. Uma micro-estrutura ferrítica causa desgastes severos no PCBN (Sahm - 1996, Seco Tools AB - 1996, Bossom). O decréscimo de elementos estruturais ferríticos permite o aumento da vida da ferramenta de PCBN, enquanto a vida das ferramentas de metal duro decresce com o aumento da resistência à tração.

A gama de operações de usinagem de aços e ferros fundidos em altas velocidades pode ser aumentada com o uso de materiais de corte de alta estabilidade térmica: cermets, cerâmicas e PCBN. Verificou-se experimentalmente que à 800 m/min, os cermets apresentaram uma vida 4 vezes maior que um metal duro P25 (Sahm - 1996).

2.9.6 Aplicações HSC na indústria de matrizaria

A indústria de matrizaria é o campo de aplicação ideal para a usinagem em alta velocidade de aços, ferros fundidos, ligas leves e cobre. Por razões geométricas, o acabamento das superfícies, de forma livre necessita uma usinagem com espessura de penetração pequena.

O perfil nominal só apresentará uma boa aproximação se forem utilizadas fresas com pontas esféricas. A combinação de fresas de pontas esféricas com espessuras de penetração pequenas trará uma melhor aproximação ao perfil final (figura 17), minimizando também o desgaste da ferramenta (Sahm - 1996, Finzer - 1997).

A utilização de uma fresa de topo esférico em uma operação de acabamento, de uma superfície de forma livre 3D, acelera os problemas causados pela variação da velocidade de corte ao longo da aresta (Sahm - 1996, Finzer - 1997)

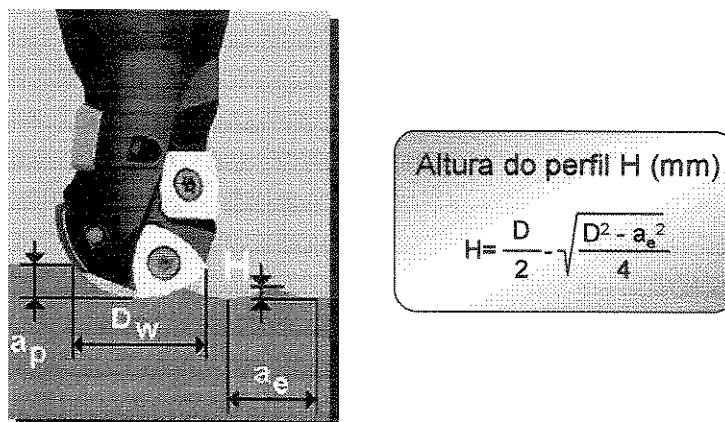


Figura 17 - Variação da altura do perfil gerado em função da espessura de penetração a_e (Seco Tools AB - Copy Milling - 1996)

No centro da ferramenta a velocidade de corte é praticamente zero e o espaço disponível no bolsão de cavacos é muito pequeno. Esses fatores trazem como consequência o lascamento da aresta e baixa qualidade da superfície, especialmente quando se usinam materiais de difícil usinabilidade. Essas condições de corte desfavoráveis poderão ser melhoradas através da inclinação do eixo da ferramenta para uma superfície normal. Outro problema, que não ocorre somente em matrizes profundas, é causado pelo balanço da ferramenta. De acordo com o comprimento em balanço da ferramenta, o avanço por dente deve ser reduzido para evitar desgastes prematuros devido às vibrações. O acabamento convencional de uma matriz profunda pode demorar por volta de 4 semanas, outras 4 semanas serão necessárias para o acabamento manual do perfil fresado (Sahm - 1996). Através da utilização do corte a elevadas velocidades, o processo poderá ser extremamente racionalizado.

As altas taxas de avanço permitirão a diminuição do tempo de fresamento. Além disso, a diminuição da espessura de penetração reduzirá o tempo necessário para o acabamento manual e melhorará a precisão da superfície. O efeito de racionalização pode ser mostrado através do exemplo dos moldes de alumínio para injeção de garrafas plásticas. O tempo total de usinagem foi reduzido de 150 minutos, no método convencional, para 35 minutos com o fresamento em alta velocidade. Câmaras de combustão foram desbastadas e acabadas com fresas de cermet de 6 e 4 mm de diâmetro, com um tempo total de usinagem de 59 minutos. A taxa de avanço máxima foi 6 m/min (Sahm - 1996).

2.10 Classificação das máquinas HSC

De acordo com aspectos tecnológicos, as máquinas de fresamento de alta velocidade, disponíveis no mercado ou em desenvolvimento em laboratórios, podem ser classificadas de uma maneira simples através das características de velocidade do eixo-árvore e das taxas de avanço alcançadas. Através dessa classificação, são observadas três áreas distintas: máquinas convencionais, máquinas de alta velocidade (HVM - High Velocity Machine) e máquinas de altíssima velocidade de corte (HSM - High Speed Machine) (figura 18) (Schmitt - 1996).

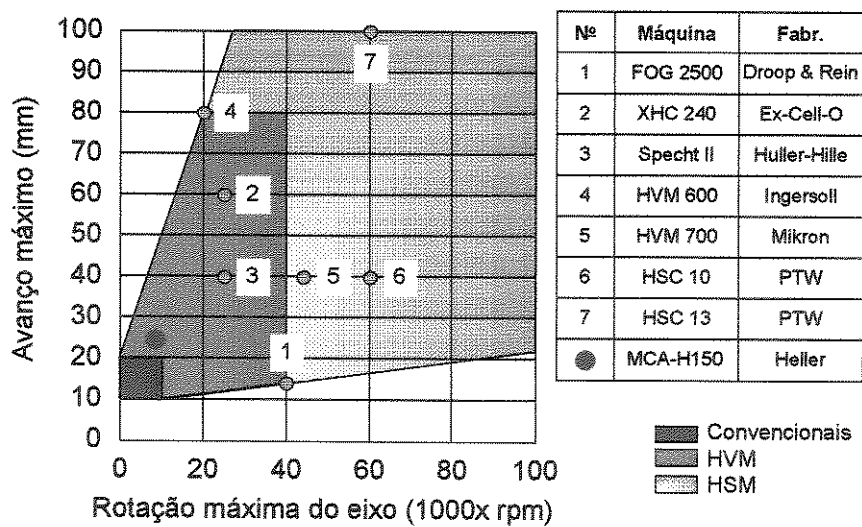


Figura 18 - Classificação das máquinas de fresamento segundo critérios HSC (Schmitt - 1996, Finzer - 1997)

- Na área das máquinas convencionais, a velocidade de corte e as taxas de avanço utilizadas não alcançam o critério de HSC (High Speed Cutting);
- No segmento de máquinas de alta velocidade (HVM), as velocidades de corte atingem a faixa mais baixa do critério HSC, enquanto as taxas de avanço são elevadas. A combinação desses dois fatores permite alcançar taxas de remoção de material de moderadas a altas. A maioria das máquinas disponíveis no mercado encontram-se nesse segmento.

- Máquinas de altíssima velocidade genuínas (HSC) operam com velocidades de corte extremamente altas e taxas de avanço que atingem taxas de remoção de baixas a moderadas. As máquinas classificadas nesse grupo são protótipos de laboratório, máquinas de matrizaria com novos conceitos e máquinas com eixos-árvore de altíssima frequência.

Em todas as áreas, a capacidade da máquina é basicamente determinada pela escolha apropriada de componentes e pela integração dos mesmos ao conceito do projeto.

2.11 Considerações sobre avarias, desgastes e curvas de vida

A definição e o estudo das falhas das ferramentas de corte é fator de grande importância para uma boa compreensão dos processos de usinagem. A correta identificação de cada fenômeno fornecerá ao analista indicações precisas quanto às possíveis causas da falha.

Observa-se, na prática, que existe uma grande dificuldade na identificação dos diversos tipos de falhas, fato, que torna as análises difíceis e complexas. Além disso, é muito comum utilizar como critério de fim de vida de uma ferramenta, determinados valores padrão. Para tanto, torna-se necessário a subdivisão dos diversos tipos de falha em grupos, a partir de critérios específicos pré-determinados. A subdivisão, que apresenta a maior aceitação, procura definir critérios que estejam relacionados com o domínio do tempo, ou seja, o espaço de tempo no qual o fenômeno se processa, dividindo os diversos tipos de falhas em avarias e desgastes.

2.11.1 Avarias

Denominam-se avarias, os fenômenos que ocorrem em um intervalo de tempo muito pequeno e levam à perda ou ruína completa da aresta de corte (Ferraresi - 1970). São consideradas avarias das arestas de corte as quebras, as trincas, a fadiga térmica e a deformação plástica.

2.11.1.1 Quebras

As quebras (figura 19) são ocasionadas, em geral, pelo aumento excessivo dos esforços de usinagem sobre a aresta de corte, normalmente ocasionados pelos seguintes fatores (Ferraresi - 1970, Seco Tools AB - 1983):

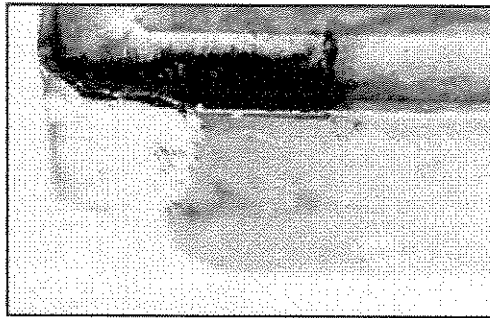


Figura 19 - Exemplo de quebra em pastilha de metal duro P20, devido à sobrecarga ocasionada por sobrematerial excessivo (Seco Tools AB - 1983/1985).

- Ângulo de ponta ou ângulo de cunha muito pequeno;
- Componente com formatos, que induzem à uma ação de corte interrompido;
- Parada instantânea do movimento de corte sem a retirada da ferramenta;
- Presença de inclusões duras no componente usinado.

2.11.1.2 Trincas

As trincas (figura 20) são avarias encontradas geralmente, em materiais cortantes pouco tenazes, devido à contribuição de dois fatores (Ferraresi - 1970, Piipo - 1989):

- Variações bruscas de temperatura
- Soldagem de pastilhas nos suportes de porta-ferramentas de aço

No segundo caso, a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica, existentes entre o material cortante e o suporte, induzem à tensões de flexão na pastilha. Tais tensões provocarão tensões de tração na superfície de saída da ferramenta, com amplitudes que poderão levar à formação de trincas.

Em casos práticos de usinagem de aços de baixa usinabilidade, o lascamento normalmente apresenta uma influência decisiva na vida da aresta de corte. Esse tipo de falha é causado principalmente por tensões mecânicas originadas pelo corte de materiais em bruto, que apresentam superfícies duras e/ou inclusões. Tais defeitos de superfície tendem a provocar problemas na entrada e saída da fresa, podendo gerar vibrações devido ao fluxo de cavacos (figura 20) (Seco Tools AB - 1983/1985).

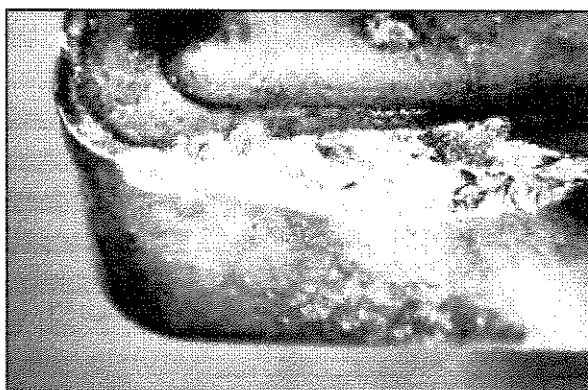


Figura 20 - Lascamento severo causado por fluxo de cavacos defeituoso (Seco Tools AB - 1983/1985).

Em operações pesadas, esse tipo de falha pode ser evitado através do uso de pastilhas com chanfros de proteção nas arestas. Para reduzir os efeitos do impacto sobre a aresta de corte, os parâmetros de trabalho devem ser ajustados visando minimizar o problema, mantendo a taxa de remoção de material.

2.11.1.3 Fadiga térmica

A fadiga térmica (figura 21) é um tipo de avaria provocada pela variação da temperatura de corte, que ocorre principalmente durante a usinagem com cortes interrompidos, em operações com avanço variável ou devido ao acesso irregular do fluido refrigerante (Ferraresi - 1970, Piipo - 1989).

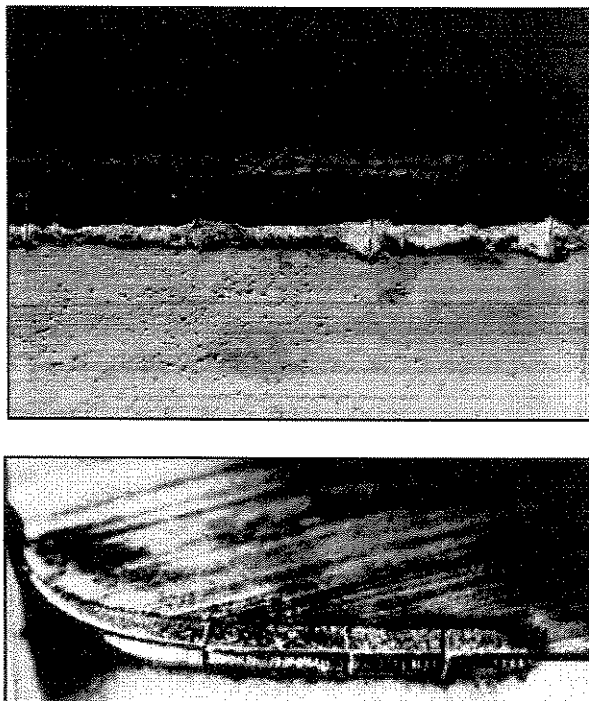


Figura 21 - Trincas térmicas em pastilha de fresamento
ISO-P25, classe Seco T25M (Piippo - 1989).

Durante o processo de formação do cavaco são geradas temperaturas bastante elevadas, que concentradas em um pequeno ponto de contato sobre a superfície de saída da ferramenta, provocarão a dilatação da camada superficial. As camadas inferiores, por apresentarem temperaturas mais baixas, não se dilatarão na mesma proporção que a camada superficial. Dessa forma, originam-se tensões de compressão e tração alternadas a cada instante, decorrentes da variação de temperatura. Depois de um determinado número de variações de solicitação, ocorre o aparecimento de trincas superficiais que estarão sujeitas à ação do cavaco em movimento, gerando pequenos sulcos. Esse problema, combinado à soldagem dos cavacos e/ou aresta postiça, tende a acelerar de forma drástica as taxas de desgaste, resultando em lascamento da aresta e, em alguns casos, na própria quebra da pastilha. O uso de fluido refrigerante, com elevadas temperaturas de corte, usualmente provoca a formação de trincas térmicas. As classes de metal duro usadas para o fresamento são projetadas para minimizar a ocorrência de trincas térmicas. O problema das trincas térmicas deve ser evitado, principalmente nas operações de desbaste pesado onde as arestas de corte são muito solicitadas (Piippo - 1989).

2.11.1.4 Deformações plásticas

As deformações plásticas (figura 22) são decorrentes principalmente pelo aumento excessivo da temperatura e pela ação de grandes esforços sobre a aresta de corte (Seco Tools AB - 1983/1985, Ferraresi - 1970).



Figura 22 - Exemplo de deformação plástica em pastilha de torneamento ISO-P20 (Seco Tools AB - 1983/1985).

A combinação desses dois efeitos provocará a diminuição da dureza, acarretando um deslocamento da aresta de corte (Ferraresi - 1970). Nesses casos, a aresta se deslocará perpendicularmente à direção de ação do esforço. Na prática, esse tipo de falha é muito pouco comum em ferramentas de torneamento (figura 22) e extremamente raro em operações de fresamento.

2.11.2 Desgastes

Denominam-se desgastes, os fenômenos que ocorrem durante determinado intervalo de tempo, levando à perda gradativa da ação de corte. Quando o fenômeno não é interrompido leva à ruína completa da aresta cortante. Durante as operações de usinagem, diversos fenômenos de desgaste se desenvolvem simultaneamente, contudo, dependendo das condições de trabalho, uma ou outra falha pode prevalecer. São considerados desgastes das arestas de corte a abrasão mecânica, a adesão, a difusão, a oxidação e a aresta postiça de corte (Ferraresi - 1970).

Durante a operação de usinagem processam-se desgastes tanto na superfície de folga como na superfície de saída da ferramenta. Esse fato dificulta a definição dos tipos de desgaste predominantes no processo. Para tanto, é prática comum efetuar a padronização dos tipos de desgaste, os quais são chamados desgastes convencionais ou padronizados (figura 23). Os desgastes padronizados, por convenção, são medidos no plano ortogonal da ferramenta, sendo, portanto, definidos desgastes na superfície de saída e na superfície de folga, além do deslocamento da aresta de corte.

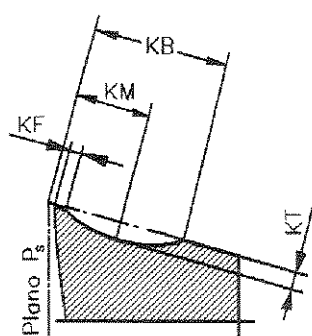
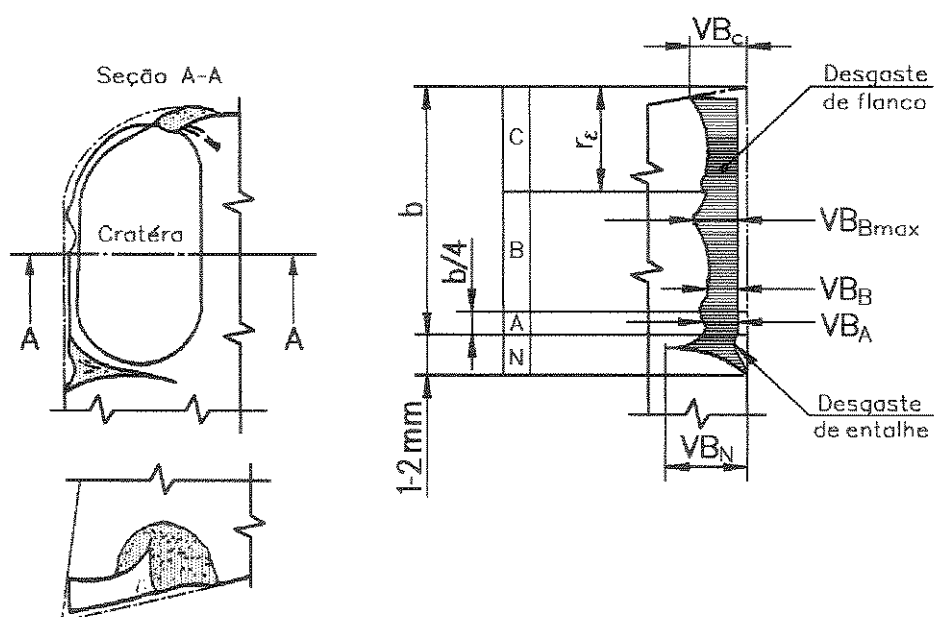


Figura 23 - Desgastes convencionais em ferramentas de torneamento (ISO 3685 - 1988).



Na superfície de saída da ferramenta são distinguidas as dimensões relacionadas com a craterização, padronizando-se: KF, KB, KM e KT (figura 23). O desgaste KF é a distância entre a aresta de corte e o ponto de início da cratera.

O desgaste KB é convencionado como largura da cratera. O desgaste KM compreende a distância entre a aresta de corte e o centro da cratera e finalmente o desgaste KT foi padronizado como profundidade de cratera (ISO 3685 - 1988). Na superfície de folga é distinguido somente o desgaste de flanco ou marca de desgaste, que foi padronizado como VB. Na prática da usinagem é comum partículas de material aderirem sobre a marca de desgaste, dando uma impressão falsa quanto à amplitude do desgaste de flanco. Do mesmo modo, a deposição de partículas no interior da cratera resulta em medições equivocadas quanto sua profundidade (ISO 3685 - 1988).

Portanto, para a análise criteriosa dos desgastes, recomenda-se a limpeza da região desgastada com a finalidade de facilitar a análise visual. No entanto, a norma que padroniza procedimentos para teste de vida de ferramentas, não recomenda o uso de ataques químicos durante os ensaios. Com o propósito de facilitar o procedimento de medição dos desgastes, a aresta de corte ativa foi dividida em quatro regiões distintas (figura 23):

- Zona C $\Rightarrow$ É a parte curva da aresta de corte encontrada na ponta da ferramenta
- Zona B $\Rightarrow$ É a parte reta da aresta de corte compreendida entre a região C e a região A
- Zona A $\Rightarrow$ É a região da aresta de corte de comprimento b , mais distante da ponta da ferramenta
- Zona N $\Rightarrow$ Estende-se de 1 a 2 mm depois da área de contato mútuo entre a ferramenta e a peça. O desgaste encontrado nessa região é o desgaste de entalhe (“notch wear”)

O desgaste de flanco VB deve ser preferencialmente medido na posição da aresta de corte, que apresenta o desgaste mais pronunciado (ISO 3685 - 1988).

2.11.2.1 Abrasão mecânica

A abrasão mecânica (figura 24) é um tipo de desgaste ocasionado principalmente pelo encruamento do material ou pelo esfregamento de partículas duras provenientes do material da peça ou da aresta postiça de corte.



É um desgaste característico da superfície de folga da ferramenta, devido ao forte atrito existente entre a peça e a ferramenta (Ferraresi - 1970, Piipo - 1989).



Figura 24 - Desgaste por abrasão causado por inclusões duras na peça (Piippo - 1989).

Os aços de baixa usinabilidade fundidos, são comparativamente os materiais mais difíceis de serem fresados devido às características seguintes:

- Estrutura Superficial dura;
- Inclusões duras.

Esses fatores tornam o material muito abrasivo, resultando em um rápido desgaste de flanco e um rápido desgaste de entalhe (groove wear) (figura 25). Os fatores seguintes deverão ser observados durante a seleção das pastilhas de fresamento (Piipo - 1989):

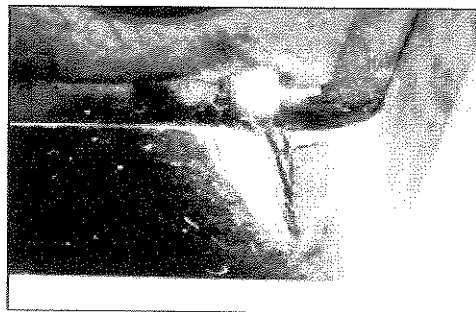


Figura 25 - Desgaste de entalhe causado por superfícies duras (Seco Tools AB - 1983/1985).

- A execução de operações de fresamento em materiais, que apresentam superfícies duras contendo inclusões, exige a utilização de arestas de corte robustas combinadas com classes de metal duro de elevada resistência ao desgaste. Nesses casos, como regra geral, recomenda-se o uso de pastilhas com chanfros de proteção bastante amplos ($\cong 0.18-0.20$ mm x 30° ou 40°);
- Geometrias positivas tendem a reduzir o efeito de encruamento do material. Contudo, o uso de arestas positivas tende a fragilizar a pastilha. Esse inconveniente, em casos de operação mais difíceis, pode ser contornado através da devida seleção dos chanfros de proteção;
- Em materiais de difícil usinabilidade, a utilização de pastilhas de fresar com arestas demasiadamente gastas, tende a aumentar o efeito de encruamento do material. O uso de geometrias positivas com chanfros de proteção pode possibilitar aumentos nos índices de vida da ferramenta, mesmo se essas pastilhas forem comparadas com geometrias iguais, sem chanfros.

2.11.2.2 Adesão e aresta postiça de corte

Quando se usina em velocidades relativamente baixas, onde a temperatura não é elevada o suficiente para ocorrer desgastes, baseados na difusão, a adesão passará a ser o fator predominante. A condição para isso, é a perda do fluxo laminar, aparecendo um fluxo mais intermitente, do qual, a indicação mais óbvia é a formação da aresta postiça. Durante a usinagem, apenas as camadas superiores da aresta postiça (figura 26) são cisalhadas, enquanto a parte inferior permanece aderente e imutável; então a ferramenta continua a usinar por longos períodos sem desgaste. Todavia, dependendo das condições de trabalho e da rigidez da máquina, por algum mecanismo ou processo vibratório o fluxo de material é interrompido e pequenos fragmentos são arrancados da aresta (Piippo - 1989, Seco Tools AB - 1983/1985).

Talvez esse seja um dos problemas mais comuns encontrados nas operações de fresamento de aços, que apresentam a forte tendência ao encruamento como é o caso dos aços inoxidáveis. A tendência de aparecimento de arestas postiças e adesão dos cavacos é muito acentuada, em diversas classes de aços inoxidáveis, principalmente em aços inoxidáveis de baixa usinabilidade.

A aresta postiça de corte está, portanto, associada à uma área de estagnação do fluxo dos cavacos. Como a aresta postiça é incrementada pela ocorrência de desgastes desiguais e, nas operações de fresamento de aços de baixa usinabilidade, o lascamento acontece nos primeiros minutos de usinagem, o risco do aparecimento desse tipo de fenômeno é muito acentuado. Além disso, a aresta postiça forma-se sobre a aresta e tende a quebrar-se quando atinge o limite de sua estabilidade, sendo carregada pelo cavaco e forçada contra a superfície da pastilha e da peça, provocando efeitos negativos sobre a vida da ferramenta e sobre o próprio acabamento superficial da peça.

Em casos mais severos, a aresta postiça tende a arrancar partículas do material da ferramenta, acelerando os fenômenos do desgaste (Piipo - 1989, Ferraresi -1970).

O estágio seguinte pode ser a soldagem dos cavacos sobre a aresta, levando à quebra repentina da pastilha. Os sinais mais evidentes da ocorrência da adesão e da aresta postiça de corte no fresamento são:

1. Acabamento Superficial ruim;
2. Fluxo de cavacos desigual, com cavacos rodando junto com a fresa;
3. Cavacos de coloração descontinuada.

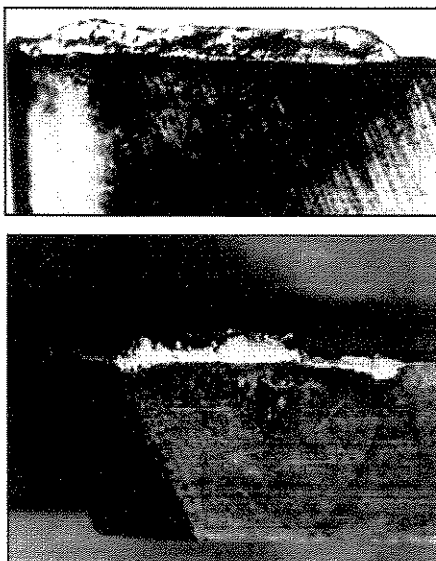


Figura 26 - Aresta postiça de corte em pastilha sem cobertura
(Piipo - 1989).

Um ângulo de saída positivo tende a minimizar esses tipos de problemas. O trabalho com a temperatura de corte adequada é fator de grande importância para uma utilização otimizada das ferramentas de fresar, principalmente durante a usinagem dos aços, com baixo índice de usinabilidade (Piipo - 1989).

A temperatura de corte pode ser aumentada ou reduzida através da simples alteração da velocidade de corte e pelo uso correto dos fluidos refrigerantes. Classes de metal duro recobertas, possuem uma tendência menor à adesão que as classes sem cobertura (Piipo - 1989).

2.11.2.3 Difusão

O fenômeno da difusão (figura 27), que ocorre entre o cavaco e a ferramenta, é ativado principalmente pelo aumento da temperatura na região de corte. A difusão consiste na transferência de átomos de um material para outro, dependendo da temperatura, da afinidade química entre os materiais, da duração do contato e do nível de agitação atômica (Ferraresi - 1970).

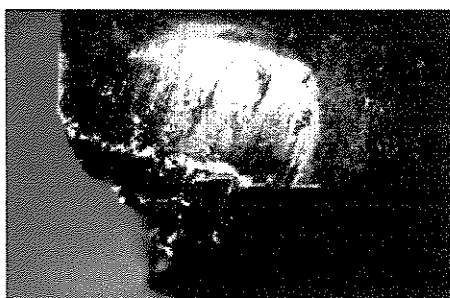


Figura 27 - Exemplo de craterização severa por difusão intermetálica em pastilha ISO-P20 (Seco Tools AB - 1983/1985).

2.11.2.4 Oxidação (Ação química ou eletrolítica)

Esse tipo de desgaste é causado principalmente pela reação química entre o material da ferramenta e o material da peça, auxiliado pela ação do fluido refrigerante.

Já o desgaste eletrolítico é causado principalmente pela corrosão galvânica ocasionada na interface peça/ferramenta.

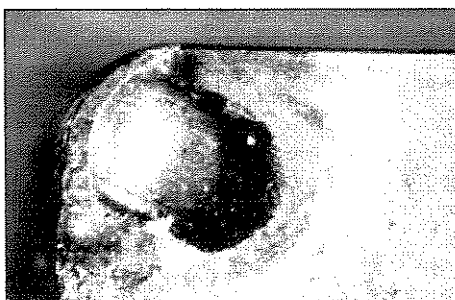


Figura 28 - Exemplo de craterização por efeito eletrolítico em pastilha ISO-P20 (Seco Tools AB - 1983/1985).

2.11.3 Características do desgaste das pastilhas de fresamento

A progressão dos fenômenos do desgaste é influenciada por diversos fatores, mas principalmente pelos dados de trabalho (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte) e pelas características do material a ser usinado. A velocidade de corte apresenta uma influência marcante sobre os fenômenos do desgaste, porque está diretamente relacionada com a temperatura gerada na operação. O avanço e a profundidade de penetração também apresentam influências sobre esses fenômenos, porém em proporções muito menores que a velocidade de corte. Por exemplo, o aumento nos valores do desgaste com o acréscimo de 20% na velocidade de corte é muito maior do que aquele que ocorreria caso o avanço fosse aumentado na mesma proporção. Dependendo do tipo de material a ser usinado, as características mecânicas apresentam uma grande variação (dureza, estrutura cristalográfica, etc.), influenciando a formação dos cavacos, o encruamento do material, etc... Observando esses aspectos, os desgastes e avarias encontrados, com maior frequência, entre as operações de fresamento, podem ser enumerados conforme segue (Piipo - 1989):

- Desgaste por abrasão;
- Fadiga térmicas;
- Lascamento;
- Adesão dos cavacos e aresta postiça de corte.

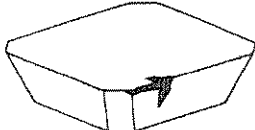
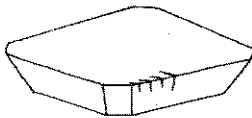
Os fabricantes de pastilhas de metal duro e ferramentas intercambiáveis apresentam quadros orientativos, que objetivam auxiliar o usuário do sistema de fresamento, na solução dos problemas relacionados aos fenômenos do desgaste e das avarias. Esses quadros são conhecidos na língua inglesa como “trouble shooting” ou guia de soluções (Tabela 4). Seu funcionamento é muito simples e pode ser explicado conforme segue:

- A coluna intitulada “problema” relaciona alguns dos casos das avarias e dos desgastes mais comuns de serem encontrados em atividades práticas;
- A coluna “causas” procura relacionar os principais motivos técnicos da ocorrência do problema;
- As 12 colunas seguintes recebem o título de “providências” e procuram relacionar as providências práticas mais usuais e simples, que devem ser tomadas para solucionar o problema. Para um mesmo problema existe mais de uma providência a ser tomada. Nesse caso, inicialmente, recomenda-se a alteração dos dados de corte, conforme o indicado e posteriormente providencia-se as ações recomendadas nas colunas à direita.
- Abaixo da tabela principal encontra-se a lista de providências e a explicação dos símbolos utilizados na tabela.

Tabela 4 - Guia de soluções (Seco Tools AB - 1994)

Problema	Causas	Providências											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Excessivo, rápido desgaste de flanco 	- Velocidade de corte muito alta - Espessura de cavaco muito pequena (taxa de avanço muito baixa) - Método de fresamento errado	↓	↑				●						
Lascamento 	- Taxa de avanço muito alta - Martelamento da aresta por cavacos - Soldagem de cavacos	↑	↓					●		●	●	●	●
Aresta postiça de corte/ Aderência de cavacos 	- Temperatura de corte errada - Taxa de avanço muito baixa - Método de fresamento errado - Posicionamento errado	↑	↑			●	●				●		

Tabela 4 - Guia de soluções (Seco Tools AB - 1994) (Continuação)

Problema	Causas	Providências											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Excessivo, rápido desgaste de entalhe 	- Material duro - Casca superficial dura	↓	↑	↑			●				●		
Fadiga térmica 	- Alta variação de temperatura - Corte interrompido	↓	↓			●					●		
Acab. superficial ruim	- Avanço por rotação muito alto - Ângulo de posição incorreto	↑	↓		●				●			●	●
Vibrações	- Dados de corte muito severos - Estabilidade ruim	↓	↑	↓				●			●	●	●
GUIA DE SOLUÇÕES - Lista de providências													
1. Velocidade de corte 2. Taxa de avanço 3. Profundidade de corte 4. Utilize refrigeração 5. Não utilize refrigeração 6. Método de fresamento concordante						7. Método de fresamento discordante 8. Utilize fase plana 9. Melhore a saída de cavacos 10. Modifique o posicionamento da fresa 11. Minimize o balanço da ferramenta 12. Melhore a estabilidade							
↑ = Aumentar		↓ = Diminuir		Se as ações acima mencionadas não solucionaram o problema, por favor entre em contato com seu representante SECO									

2.11.4 Considerações sobre a vida da ferramenta

2.11.4.1 Curvas de vida

(Ferraresi - 1970, Villela - 1989, Novaski - 1989) Denomina-se vida de uma ferramenta de corte, o tempo efetivo de contato da aresta da ferramenta com a peça (deduzindo-se os tempos passivos), até que a mesma perca sua ação de corte, dentro de um critério previamente definido. As curvas de vida são gráficos obtidos experimentalmente, que fornecem o tempo de vida efetivo da ferramenta, em função da velocidade de corte.

Normalmente, para a confecção das curvas de vida, torna-se necessário a montagem de gráficos auxiliares, que fornecerão os desgastes da ferramenta em função do tempo, para diferentes velocidades de trabalho, sempre em determinadas condições de avanço, profundidade de corte, geometria, etc... Esses gráficos auxiliares são conhecidos em geral como gráficos de desgaste. Para a determinação do final da vida de uma ferramenta é de grande importância a definição do critério de fim de vida, que seja o mais significativo para a operação em questão. Em geral, no levantamento dos gráficos do desgaste são utilizados um ou mais tipos de desgastes convencionais, a fim de melhorar o nível de incerteza das informações obtidas. Procede-se, então, a usinagem dos corpos de prova, verificando-se periodicamente a evolução dos desgastes em função do tempo efetivo de usinagem, para as condições de trabalho previamente estabelecidas. Então, a velocidade de corte é aumentada ou diminuída, mantendo todas as outras variáveis constantes, anotando também a evolução dos desgastes em função do tempo. Repetindo o procedimento para várias velocidades diferentes, será obtido um gráfico semelhante à figura 29.

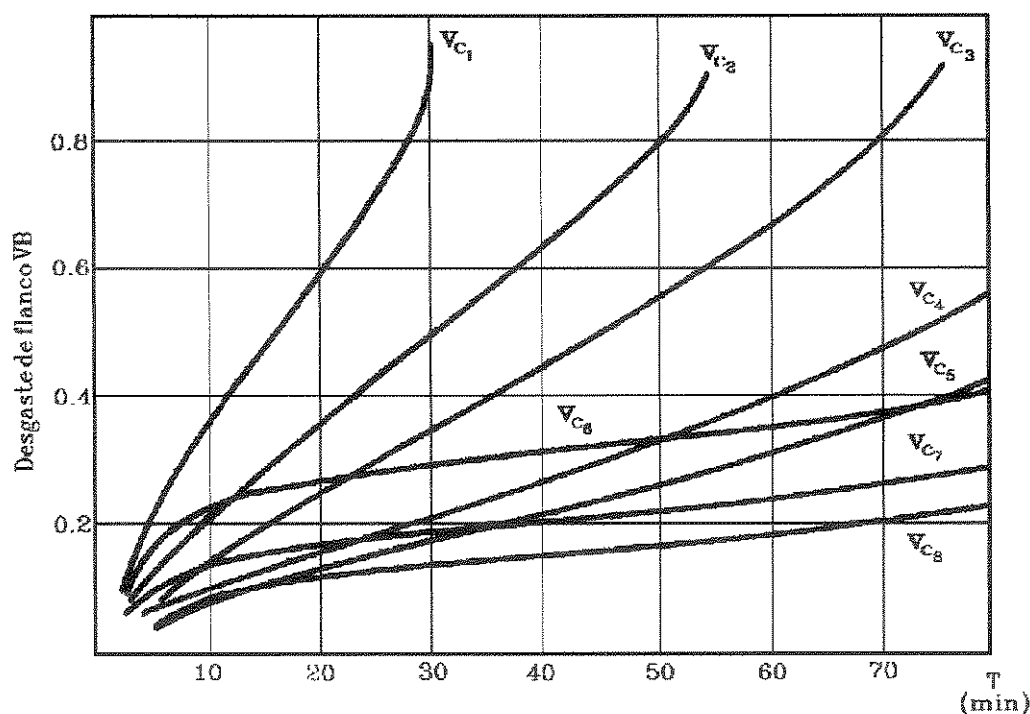


Figura 29 - Curva de desgaste em função da vida T (min)

(Ferraresi - 1970)

A partir desse gráfico fixa-se, um determinado valor para o desgaste padrão, por exemplo $VB = 0.8 \text{ mm}$, e em cada curva de velocidade encontra-se um ponto no eixo de tempo. Esses pontos, plotados em uma curva de tempo em função da velocidade de corte, fornecerão os valores de vida da ferramenta para um desgaste "VB" previamente especificado, para diferentes velocidades em uma determinada condição do par ferramenta/peça. A figura abaixo ilustra a curva de vida obtida para uma condição padrão. As curvas de vida constituem o fundamento das condições econômicas de usinagem. Se a representação da curva de vida for feita em papel dilogarítmico, a função vida $T = f(v_c)$ se aproximará de uma reta, ou seja:

$$\log T = \log K - x \cdot \log v_c$$
$$T \cdot v_c^x = K \qquad eq.1$$

Essa fórmula foi deduzida inicialmente por F.W.Taylor. (Ferraresi - 1970, Villela - 1989, Novaski - 1989), O expoente "x" indica o coeficiente angular da reta T-v na representação dilogarítmica; já a constante "K" representa a vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1.0 m/min (figura 30).

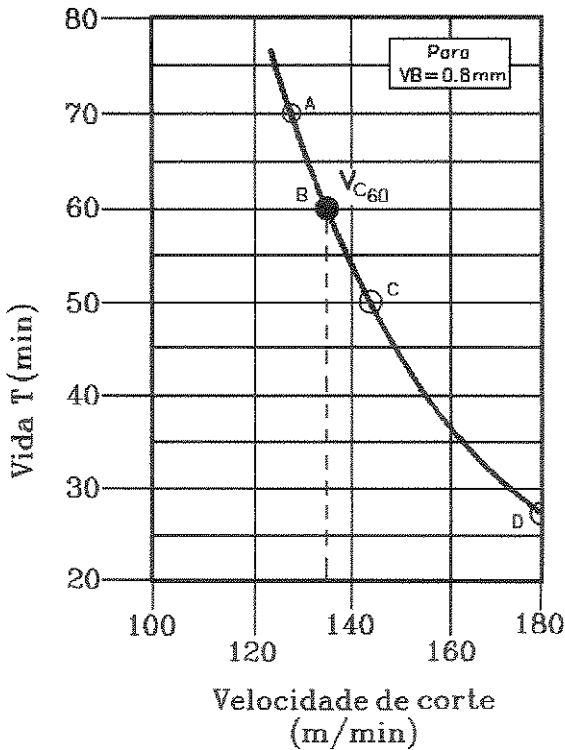


Figura 30 - Curva de vida para diferentes velocidades de corte (Ferraresi - 1970)

Conforme foi dito anteriormente, as curvas de vida das ferramentas são levantadas para condições pré-definidas, que levam em conta o par ferramenta/peça. Como a equação acima representa matematicamente a curva de vida, os valores de x e K irão variar segundo os fatores seguintes (Ferraresi - 1970, Villela - 1989, Novaski - 1989):

1. Material da peça e da ferramenta;
2. Avanço e profundidade de corte;
3. Geometria da ferramenta (α_o , κ_r , γ_o , λ_s) e raio da ponta da mesma;
4. A rigidez do sistema máquina/dispositivo/peça/ferramenta;
5. Presença ou não de fluido refrigerante.

A alteração de qualquer um dos fatores acima possibilitará a introdução de um determinado nível de erro nos resultados obtidos, fato que diminui consideravelmente a confiabilidade, caso a fórmula seja usada para interpolações indiscriminadas.

2.11.4.2 Os critérios de vida

Quando se pretende efetuar a otimização de uma operação de usinagem, é necessário primeiramente exprimir a vida da ferramenta em função da velocidade de corte (Villela - 1989). Contudo, a necessidade de atingir esse objetivo implica na definição do que é vida e como quantificá-la. De acordo com a definição de vida proposta no item 2.11.4.1., é fácil notar que seu valor é intimamente influenciado pelo critério adotado, caracterizando um conceito relativo particular à cada situação. Os critérios mais utilizados nos procedimentos de otimização tradicionais são:

1. Destruição da aresta de corte;
2. Valores estabelecidos para o desgaste de cratera e desgaste de flanco;
3. Variação das forças de corte;
4. Tolerância do componente;
5. Acabamento superficial.

A definição do critério de vida é de fundamental importância na determinação prática das constantes x e K da fórmula de Taylor. A mudança do critério ou a seleção de um critério inadequado pode levar à erros grosseiros nos valores das variáveis, obtidos a partir de qualquer modelo matemático. Em verificações experimentais, constatou-se que a forma da curva vida-velocidade de corte, depende do critério de vida adotado.

2.11.4.3 Considerações sobre os modelos matemáticos

Como citado anteriormente, o primeiro pesquisador a desenvolver um modelo matemático para otimização das condições de corte de operações de usinagem foi F.W.Taylor, que apresentou a conhecida equação:

$$T \cdot v_c^x = K$$

E sua expandida:

$$T \cdot v_c^x \cdot f^y \cdot a_p^z = K \quad \text{eq. 2}$$

Outros pesquisadores como Woxen, Kronenberg, Colding, Konig-Depiereux apresentaram outros tipos de modelos matemáticos que representavam de uma melhor forma os resultados experimentais obtidos (Villela - 1989). Em todos os trabalhos, contudo, observou-se uma relação não linear, mesmo utilizando escalas dilogarítmicas. Esses resultados levaram à conclusão que, para efeitos práticos e de pesquisa a equação de Taylor ou sua expandida deve ser utilizada criteriosa e cuidadosamente. A evidência da não linearidade da curva de vida induziu à utilização do intervalo de validade da equação de Taylor, ou seja, aproximar a curva de vida a uma série de retas (figura 31).

Como a equação de Taylor não representa exatamente a relação entre a vida da ferramenta e a velocidade de corte, sendo necessária a obtenção dos coeficientes x e K com a maior exatidão possível, torna-se praticamente obrigatório a utilização do intervalo de validade e de processos mais elaborados para a determinação de valores ótimos de velocidade.

2.11.4.4 A variabilidade da vida de uma ferramenta de corte

A vida das ferramentas de corte apresenta uma variabilidade muito grande em seus valores, mesmo em condições de trabalho semelhantes (Villela - 1989, Novaski -1989). Essa variação é atribuída a uma série de variáveis, conforme segue:

1. Dureza do material da peça;
2. Inclusões ou variações na composição química;
3. Efeitos termoeletrônicos;
4. Heterogeneidade do material da ferramenta e da peça.

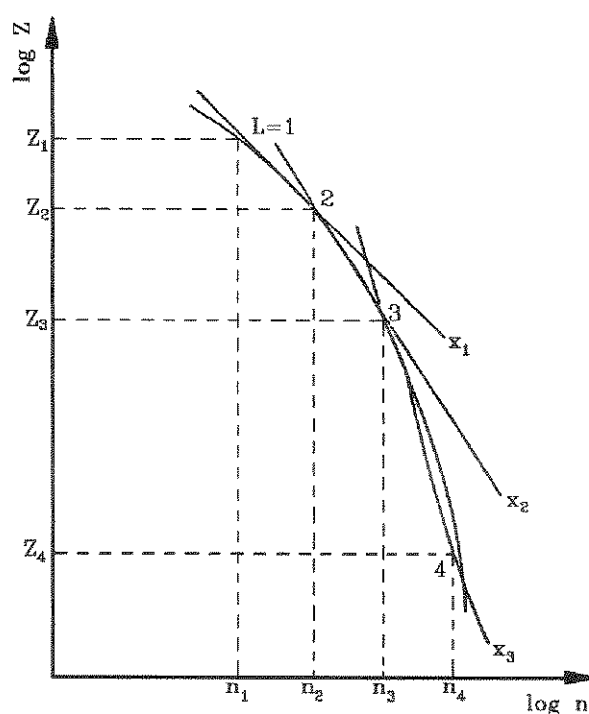


Figura 31 - Intervalos linearizados da equação de Taylor (Novaski - 1989)

Esses fatores, contudo, não podem ser considerados de forma isolada, pois seriam responsáveis por larga dispersão dos valores da vida. Fica claro, que a pequena contribuição dos vários fatores é responsável pela variabilidade da vida das ferramentas de corte, levando a caracterizar um processo estatístico.

Essa análise levou a constatação da natureza estocástica da vida das ferramentas. Alguns pesquisadores realizaram experiências com a equação básica de Taylor e constataram que, o número mínimo de experiências necessárias para a determinação confiável dos coeficientes é demasiadamente grande, caracterizando um procedimento muito pouco prático e muito pouco econômico. Devido à natureza estocástica da vida das ferramentas, os métodos determinísticos apresentam-se pouco confiáveis.

Os modelos estatísticos, decorrentes da constatação da variabilidade da vida das ferramentas de corte, foram baseados em estudos da distribuição de frequências das curvas de vida. Porém, para a obtenção dessas distribuições de frequência eram necessárias grandes quantidades de experiências de laboratório, que forneciam dados de difícil extrapolação para a realidade da prática industrial. A constatação e a consideração da existência de uma independência estocástica entre a quebra e o desgaste, normalmente utilizada pelos modelos probabilísticos, é questionável sob o ponto de vista estatístico.

2.12 Influência dos elementos de liga sobre a usinabilidade dos aços

Os metais puros podem ser utilizados em um grande número de aplicações práticas, no entanto, devido ao fato de apresentarem baixo grau de dureza e baixa resistência mecânica, existem muitas limitações para o uso generalizado. Desse modo, a utilização do cobre comercialmente puro é justificada quando se necessita alta condutibilidade elétrica mas não poderá ser utilizado caso se deseje alta resistência mecânica. Com o objetivo de se melhorar determinadas propriedades físicas e mecânicas dos materiais metálicos, são adicionados determinados elementos, constituindo, dessa forma, as ligas. As possibilidades de formação das ligas são quase ilimitadas e o estudo individual de cada uma é praticamente inviável. Os aços como outros tipos de materiais metálicos constituem ligas e são basicamente ligas Fe-C com diferentes adições e diferentes comportamentos físico-químicos. Cada componente adicionado ao aço apresenta uma grande influência sobre os índices de usinabilidade (Chiaverini - 1984).

A grosso modo, os aços podem ser divididos em dois grupos: aços não ligados e aços liga. Os componentes químicos dos aços não ligados são: silício, manganês, fósforo, enxofre, oxigênio e nitrogênio (Chiaverini - 1984).

Os aços liga apresentam a adição de outros elementos, tais como: níquel, cobalto, cromo, molibdênio, alumínio, tungstênio, vanádio, cobre e outros (Chiaverini - 1984).

O silício normalmente reage quimicamente com o oxigênio, formando inclusões duras de silicatos. Além disso, aumenta a resistência ferrítica, piorando a usinabilidade do aço, diminuindo a vida da ferramenta (Vieregge - 1970). O aumento do teor de silício em um aço de corte fácil diminui a vida da ferramenta, melhorando contudo, o fluxo e a formação dos cavacos.

O oxigênio aparece quase sempre associado a outro elemento como inclusões óxidas (ex.: óxido de manganês, silicatos e óxidos de alumínio). Os óxidos aumentam significativamente os níveis do desgaste das ferramentas de corte.

O nitrogênio favorece o aumento da ductilidade dos aços, aumentando a tendência à adesão sobre o material cortante. Além disso, o aumento da tenacidade do aço facilita a produção de cavacos longos e a um maior desgaste.

O alumínio favorece o refinamento da estrutura, restringindo o crescimento dos grãos, pela formação de óxidos e nitretos. Influencia negativamente a usinabilidade pelo endurecimento da ferrita em solução sólida ou quando dissolvido na austenita.

O manganês, em teores de até 1%, pode influenciar favoravelmente a taxa de usinabilidade dos aços de baixo teor de carbono, sobretudo quanto à formação e fluxo de cavacos. No entanto, a influência do manganês, sobre a taxa de usinabilidade dos aços de alto teor de carbono, pode se tornar negativa, porque endurece a ferrita e a austenita, reduzindo a plasticidade e aumentando os níveis de desgaste (Machining Data Handbook - 1980).

O níquel apresenta uma tendência ao refinamento dos grãos, aumentando a resistência e a tenacidade por solução sólida. A granulação mais fina tende a aumentar a abrasividade do aço, diminuindo as taxas de usinabilidade (Chiaverini - 1984, Vieregge - 1970).

O cobalto contribui para a resistência a quente, pelo endurecimento da ferrita em solução sólida, aumentando a tendência à adesão, piorando a rugosidade da superfície.

O cobre apresenta um efeito semelhante ao cobalto, aumentando a tenacidade e a adesão do aço, piorando, principalmente, o acabamento superficial.

Aços com elementos formadores de carbonetos como: o cromo, o molibdênio, o tungstênio, o vanádio, o nióbio e o titânio tendem a piorar significativamente os índices de usinabilidade.

O cromo endurece ligeiramente a ferrita e melhora a resistência à corrosão e oxidação dos aços, melhora a resistência à altas temperaturas e ao desgaste, quando combinado com altos teores de carbono.

O molibdênio produz o endurecimento por precipitação das ligas, apresentando uma tendência ao endurecimento maior que o cromo. Melhora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis e aumenta a temperatura de crescimento do grão austenítico (refinamento da estrutura).

O tungstênio apresenta uma forte tendência à formação de carbonetos, aumentando consideravelmente a endurecibilidade da liga mesmo em pequenos teores. Promove o aumento da resistência e dureza à altas temperaturas (Machining Data Handbook - 1980).

O vanádio aumenta a dureza da ferrita moderadamente em solução sólida, aumentando também a temperatura de crescimento de grão da austenita (refinamento da estrutura). Aumenta a endurecibilidade em estado dissolvido.

O titânio promove o endurecimento por precipitação da ferrita nas ligas Fe-Ti com alto teor de titânio. Impede a formação de austenita em aços de alto teor de cromo. Reduz a dureza martensítica e endurecibilidade dos aços ao Cr. Apresenta a maior tendência à formação de carbonetos conhecida.

Tabela 5 - Resumo da influência dos elementos de liga sobre a usinabilidade dos aços (Eutetic)

Elemento	Solubilidade sólida		Influência sobre a ferrita	Influência sobre a austenita	Influência dos carbonetos		Principais funções
	Ferro γ	Ferro α			Formação	Revenido	
Al	1.1% ($\uparrow$ C)	36%	Endurece consideravelmente por solução sólida	Aumenta a endurecibilidade no estado dissolvido na austenita	Negativa (Grafitização)		1. Dexoxidante eficiente 2. Restringe o crescimento dos grãos (por formação de óxidos e nitretos dispersos) 3. Elemento de liga nos aços para nitretação
Co	Sem limites	75%	Endurece consideravelmente por solução sólida	Diminui a endurecibilidade no estado dissolvido	Semelhante ao Fe	Sustenta a dureza pela solução sólida	1. Contribui para a dureza a quente pelo endurecimento da ferrita
Cr	12.8% 20% com 0.5% C	Sem limites	Endurece ligeiramente, Aumenta a resistência à corrosão	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Maior que Mn Menor que W	Moderada Resiste à diminuição de dureza	1. Aumenta a resistência à corrosão e oxidação 2. Aumenta a endurecibilidade 3. Melhora a resistência à altas temperaturas 4. Resiste ao desgaste (combinado com alto C)

**Tabela 5 - Resumo da influência dos elementos de liga
sobre a usinabilidade dos aços (Eutetic) (continuação)**

Elemento	Solubilidade sólida		Influência sobre a ferrita	Influência sobre a austenita	Influência dos carbonetos		Principais funções
	Ferro γ	Ferro α			Formação	Revenido	
Mn	Sem limites	3%	Endurece, reduzindo a plasticidade	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Maior que Fe Menor que Cr	Muito pequena nos teores normais	1. Contrabalança a fragilidade ocasionada pelo S 2. Aumenta a endurecibilidade economicamente
Mo	$\pm 3\%$ 8% com 0.3% C	37.5%	Produz o endurecimento por precipitação nas ligas Fe-Mo	Aumenta a endurecibilidade fortemente (Mo > Cr)	Forte Maior que Cr	Opõe-se à diminuição de dureza, criando a dureza secundária	1. Eleva a temperatura de crescimento do grão de austenita 2. Produz maior profundidade de endurecimento 3. Contrabalança a tendência à fragilidade de revenido 4. Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência 5. Melhora a resistência a corrosão dos aços inoxidáveis 6. Forma partículas resistentes à abrasão
Ni	Sem limites	10%	Aumenta a resistência e a tenacidade por solução sólida	Aumenta a endurecibilidade ligeiramente; mas tende a reter austenita com C mais elevado	Negativa (Grafitização)	Muito pequena em teores baixos	1. Aumenta a resistência de aços recozidos 2. Aumenta a tenacidade de aços ferríticos-perlíticos (sobretudo a baixas temperaturas) 3. Torna austeníticas ligas Fe-Cr de alto teor
P	0.5%	2.8%	Endurece fortemente por solução sólida	Aumenta a endurecibilidade	Nenhuma	—	1. Aumenta a resistência de aços de baixo teor de C 2. Aumenta a resistência a corrosão 3. Aumenta a usinabilidade em aços de usinagem fácil
Si	2% 9% com 0.35% C	18.5% não muito alterada pelo C	Endurece por perda de plasticidade (Mn < Si < P)	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Negativa (Grafitização)	Sustenta a dureza por solução sólida	1. Ação desoxidante 2. Elemento de liga para chapas elétricas e magnéticas 3. Aumenta a resistência à oxidação 4. Aumenta a endurecibilidade de aços contendo elementos não grafitizantes 5. Aumenta a resistência de aços de baixo teor em liga
Ti	0.75% 1% com 0.20% C	$\pm 6\%$	Produz o endurecimento por precipitação nas ligas Fe-Ti com alto teor de Ti	Provavelmente aumenta muito a endurecibilidade de no estado dissolvido. O efeito dos carbonetos tende a diminuir a endurecibilidade de	A maior conhecida 2% de Ti torna aços de 0.5% C não endurecíveis	Carbonetos persistentes provavelmente não afetados. Algum endurecimento secundário	1. Reduz a dureza martensítica e a endurecibilidade em aços ao Cr e aços com médio teor de Cr. 2. Impede a formação de austenita em aços de alto teor de cromo

Tabela 5 - Resumo da influência dos elementos de liga sobre a usinabilidade dos aços (Eutetic) (continuação)

Elemento	Solubilidade sólida		Influência sobre a ferrita	Influência sobre a austenita	Influência dos carbonetos		Principais funções
	Ferro γ	Ferro α			Formação	Revenido	
W	6% 11% com 0.25% C	33%	Idêntico às ligas Fe-W com alto teor de W	Aumenta a endurecibilidade fortemente em pequenos teores	Forte	Opõe-se à diminuição de dureza por endurecimento secundário	1. Forma partículas duras e resistentes ao desgaste em aços ferramenta 2. Promove o aumento de dureza e resistência a altas temperaturas
V	1% 4% com 0.20% C	Sem limites	Endurece moderadamente por solução sólida	Aumenta fortemente a endurecibilidade no estado dissolvido	Muito forte (V < Ti ou Cb)	Máxima para endurecimento secundário	1. Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita (promove refino do grão) 2. Aumenta a endurecibilidade (quando dissolvido) 3. Resiste ao revenido e causa acentuado endurecimento secundário

Capítulo 3

Ensaio de laboratório

3.1 Introdução

Conforme mencionado anteriormente, a definição do processo de usinagem à alta velocidade representa um problema de difícil solução. Certamente as taxas de velocidade utilizadas nos processos de corte em geral, dependem de variáveis como: o tipo de material, o tipo de operação de corte, o tipo de ferramenta, o material cortante, etc... No entanto, os processos convencionais não sofrem uma influência significativa da tecnologia de corte empregada. Observando novamente a figura 2, verifica-se a existência de uma grande região compreendida entre as operações de corte com velocidades convencionais e as operações que trabalham com altas velocidades. Essa região intermediária pode ser denominada de área de transição e apresenta um comportamento bastante peculiar que difere das outras duas regiões.

Os ensaios de laboratório objetivam basicamente, abordar as tendências dessa região quanto à evolução dos desgastes com diferentes materiais cortantes. O trabalho pautou para um estudo comparativo das classes de ferramentas utilizadas e não pela determinação da tecnologia de corte na zona de transição.

3.2 Informações gerais do experimento

3.2.1 Máquina ferramenta

Máquina tipo:	Centro de usinagem horizontal CNC (figura 32)
Modelo:	MCA - H150
Marca:	HELLER

Comando:	UNIPRO 90 CNC - Sistema operacional UNIX
Potência máxima:	30 kW
Torque máximo:	143 N.m
Gama de rotações:	60 a 8000 rpm
Avanço máximo disponível:	1.5 mm/rotação

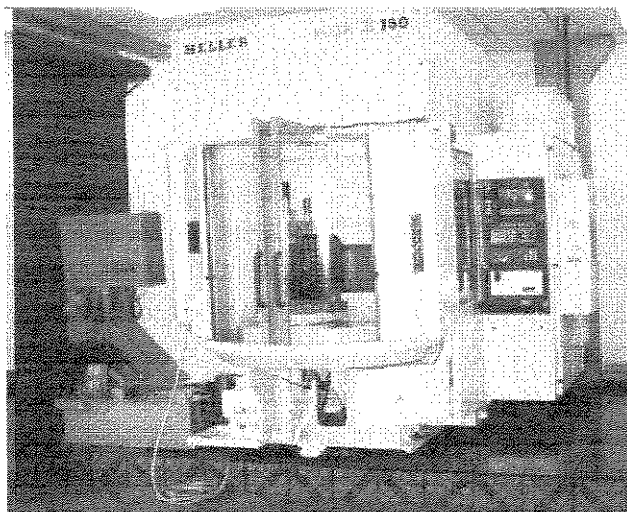


Figura 32 - Centro de usinagem horizontal HELLER MCA-H150
usado nos ensaios de laboratório
(Gentilmente cedido por Seco Tools Ind. Com. Ltda.)

3.2.2 Dispositivo de locação/fixação

Elemento de fixação:	Cantoneira porta-pallet de precisão tamanho M12
Código:	6362D - 400x500 - 1
Fabricante:	Andreas Maier GmbH & Co.
Elemento de fixação:	Pino de centragem para cantoneira porta-pallet
Código:	6363 - 20x50 - 01
Fabricante:	Andreas Maier GmbH & Co.
Elemento de fixação:	Pino de encosto
Código:	6363 - 12 - 003 - 2
Fabricante:	Andreas Maier GmbH & Co.
Elemento de fixação:	Morsa de fuso hidráulico de 4 toneladas
Código:	Tamanho 1
Fabricante:	Industécnica Equipamentos Industriais Ltda.

3.2.3 Ferramenta

Ferramenta: Fresa de topo de fixação mecânica com corte lateral
Código: R217.69-1616.3-13A
Fabricante: SECO TOOLS
Haste tipo: Cilindrica/Weldon (ISO 5414 / DIN 1835 B)

Ângulos da parte de corte:	κ_r	γ_o	γ_p	γ_f	γ_e
	90°	- 17° / - 9°	0° / + 3°	- 17° / - 9°	6°

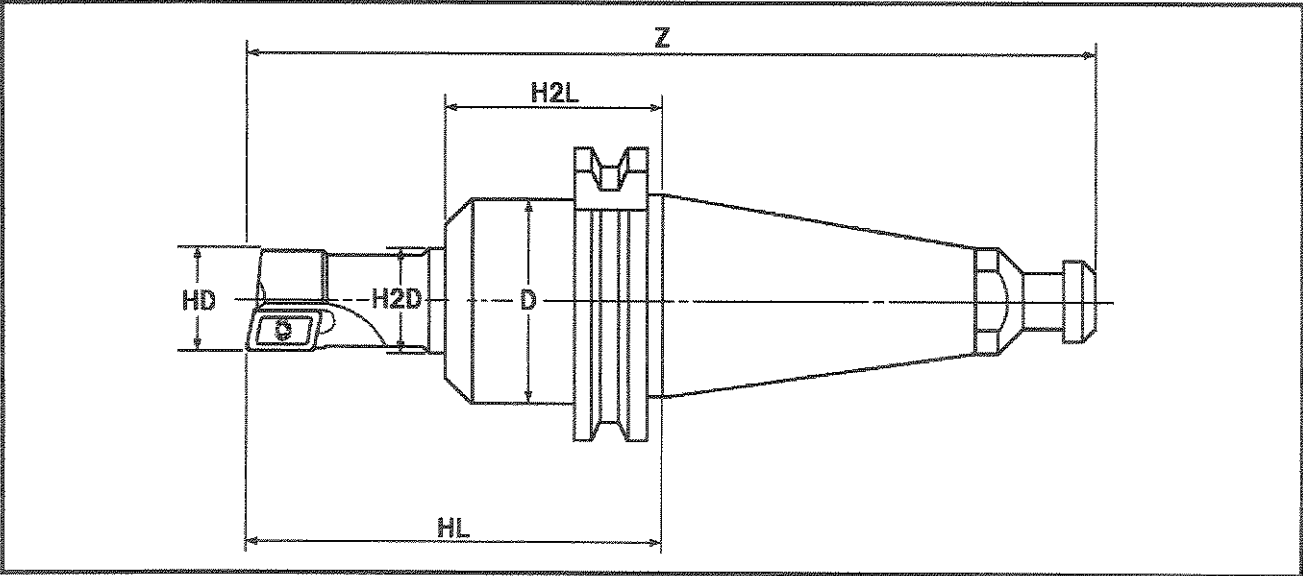
Código das pastilhas: XCMX 13T308TR-M11 (ISO 1832 / 1991)
Fabricante: SECO TOOLS

Identificação e classes:

Identificação	Designação ISO	Designação SECO
Metal duro com cobertura	K01-K25	T15M (lote 542)
Metal duro com cobertura	P10-P30 / M15-M25 / K20-K35	T20M (lote 605)
Metal duro sem cobertura	P30-P45 / M30-M35	S60M (lote 449)
Cermet sem cobertura	P05-P25 / M10-M25	C15M (lote 545)

Informações adicionais:	Tamanho pastilha mm	Prof. máxima mm	Tamanho fase plana mm	Largura chanfro T mm	Ângulo chanfro T
	13	12.0	0.6	0.11	15°

3.2.4 Montagem do adaptador porta-ferramentas



Dimensão	(mm)	Dimensão	(mm)
HD	16.0	HL	93.0
H2D	16.0	H2L	63.0
D	47.2	Z	187.0

3.2.5 Adaptador porta-ferramentas

Adaptador porta-ferramentas: Adaptador integral de troca autom. tipo Whistle-Notch
Código: DV40 BWN 16063
Fabricante: SECO TOOLS
Pino de retenção: Pino de retenção cilíndrico sem furo interno de refrig.
Código: E954431628B
Fabricante: SECO TOOLS
Norma do adaptador: DIN 1835E
Norma do cone: ISO 7388 / DIN 69871 forma B
Norma do pino de retenção: DIN 69872 forma A
Refrigeração: Através do flange

3.2.6 Equipamento de medição

Equipamento tipo: Microscópio de laboratório
Modelo: OPTIPHOT 66
Marca: Nikon - NIPPON KOGAKU K.K.

Especificações elétricas:

	Iluminação episcópica		Iluminação diascópica
	Iluminador EPI universal	Iluminador EPI claro/escuro	
Potência desenvolvida	100V 50/60Hz		100V 50/60Hz
Voltagem secundária	OFF 12/V Números gravados no controle de luminosidade		OFF 6/V Números claros no controle de luminosidade
Lâmpada de halogênio	12V-50W Osram 64610 ou Philips 7027	6V-20W Philips 7388	6V-20W Philips 7388
Fusível	1A/250V		

Equipamento tipo: Escala eletrônica micrométrica para vídeo
Modelo: FOR.A - IV 550
Marca: FOR.A Company Limited

Equipamento tipo: Monitor preto e branco de 9 polegadas
Modelo: PM-930A/931
Marca: Ikegami Tsushinki Co. Ltd.

Equipamento tipo: Adaptador para câmera
Modelo: CMA-D1CE
Marca: SONY

3.2.7 Material do corpo de prova

Material:	Aço ferramenta endurecível
Especificação comercial:	VP40 ISOMAX
Abreviação:	VP 40 - IM
Fabricante:	Villares Metals S.A.
Similaridade:	Sem similar

Composição química nominal (%)													
C	Mn	F	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	W	V	Mo	Ti	Nb
0.15	—	—	—	—	1.00	1.00	—	3.00	—	—	0.30	—	—

Características gerais:	Aço ferramenta endurecível por envelhecimento, desenvolvido especialmente para a fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. Fornecido no estado solubilizado. Após a usinagem completa, o molde é envelhecido para durezas da ordem de 40 a 42 HRC e então levado para usinagem final de acabamento. As principais características do aço VP40 ISOMAX são: • Boas propriedades mecânicas em qualquer direção; • Elevado grau de pureza; • Excelente resposta à texturização; • Excelente resposta à nitretação; • Boa resistência ao desgaste; • Excelente soldabilidade; • Elevada estabilidade dimensional e de forma.
Estado de fornecimento:	Fornecido no estado solubilizado com dureza na faixa de 30 a 35 HRC. O acabamento superficial é usinado para atendimento através de corte e recorte.
Aplicações típicas:	• Moldes para injeção de termoplásticos não-clorados • Matrizes para extrusão de termoplásticos não-clorados • Moldes para termoplásticos reforçados com carga (plásticos de engenharia)

3.2.8 Análise física, química e metalográfica

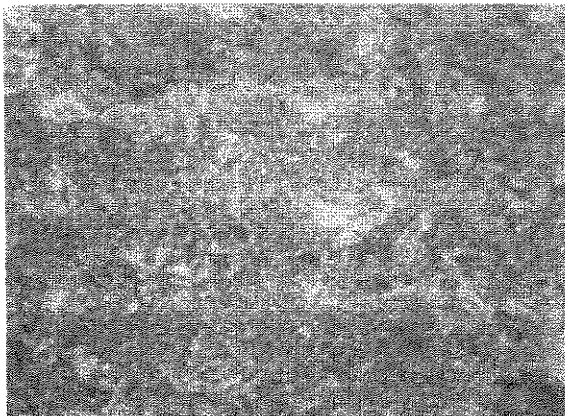
32.2.8.1 Teste de dureza

Microdureza:	318 a 342 HV1
Dureza Brinell:	320 a 322 HB (3000 kgf)

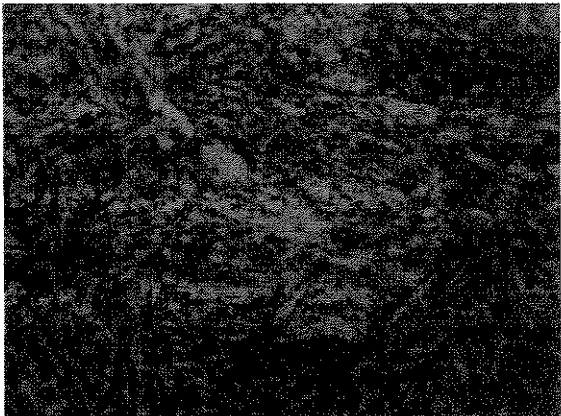
12.2.8.2. Composição química

Composição química real (%)													
C	Mn	F	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	W	V	Mo	Ti	Nb
0.08	1.66	0.02	0.02	0.51	0.10	1.25	0.28	0.85	0.13	<0.01	0.03	<0.01	0.02

3.2.8.3 Análise metalográfica



Ampliação 100x, nital 3%



Ampliação 400x, nital 3%

Material:	Aço baixa liga ($\pm$ 0.10 % de carbono)
Microestrutura:	Martensita em ripas e ferrita
Tamanho de grão:	Tamanho de grão austenítico 5 a 6 (ASTM)
Comentários:	• Micro estrutura característica de aço baixo carbono temperado com martensita em ripas dentro de grãos austeníticos; • A superfície usinada apresenta um pequeno encruamento (endurecimento por precipitação).

3.3 Delimitações gerais

3.3.1 Universo de estudo

Para definir o universo de estudo foram determinadas algumas variáveis iniciais, que delinearão a base dos ensaios de laboratório. A seguir serão comentados os motivos que levaram à seleção das principais variáveis.

3.3.1.1 Aço ferramenta endurecível VP40 ISOMAX

Conforme citado anteriormente, a indústria de moldes e matrizes representa uma área de grande potencial para a aplicação da tecnologia de usinagem à alta velocidade. Uma das áreas de maior expressão dentro das indústrias de matrizaria é seguramente a usinagem de moldes para injeção de termoplásticos e plásticos de engenharia. O VP40 ISOMAX é um material especialmente desenvolvido para esse fim e apresenta larga aplicação industrial.

Além disso, a utilização de um aço liga endurecido provavelmente induziria a erros grosseiros, devido às dimensões do corpo de prova (diminuição da dureza com o aumento da profundidade). Optou-se portanto por um material que proporcionasse elevada dureza de fornecimento, garantindo uma maior homogeneidade de dureza em todo o corpo de prova. Analisando a composição química real do aço VP40 ISOMAX, verifica-se que a adição de elementos formadores de carbonetos como o vanádio, o titânio, o nióbio e o molibdênio, apresentam teores muito baixos e não causam um efeito significativo sobre a taxa de usinabilidade, podendo ser encarados como impurezas presentes na liga. O enxofre e o fósforo também apresentam adições muito pequenas e podem ser considerados impurezas. O manganês presente na liga tende a aumentar a endurecibilidade e a abrasividade da liga influenciando negativamente na taxa de usinabilidade. O alumínio restringe o crescimento dos grãos refinando a estrutura do aço, aumentando a abrasividade (Eutetic, ASM International - 1990, Ferraresi - 1970, Chiaverini - 1984, Vieregge - 1970).

O cobre apresenta efeito semelhante ao cobalto aumentando a dureza a quente da liga, apresenta um efeito positivo sobre a taxa de usinabilidade devido ao aumento da tenacidade e rebaixamento da dureza. O silício aumenta a endurecibilidade na presença de elementos não grafitizantes e aumenta a dureza por encruamento e perda de plasticidade, em geral apresenta um efeito negativo sobre a taxa de usinabilidade (Eutetic, ASM International - 1990, Ferraresi - 1970, Chiaverini - 1984, Vieregge - 1970). Em resumo, o aço utilizado nos ensaios apresenta boa usinabilidade, mesmo com dureza relativamente elevada.

C	Mn	F	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	W	V	Mo	Ti	Nb
0.08	1.66	0.02	0.02	0.51	0.10	1.25	0.28	0.85	0.13	<0.01	0.03	<0.01	0.02
↓	↓↓	↑	↑	↓↓	↓↓	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓	↓	↓	↓	↓

3.3.1.2 Centro de usinagem horizontal MCA-H150 (Heller)

O centro de usinagem horizontal Heller é um equipamento de elevada potência e rigidez, utilizado em produção seriada de diferentes tipos de componentes em situações de elevada diversificação. A máquina apresenta como características construtivas básicas: guias lineares, fusos de esferas recirculantes pré-carregadas, acionamento de cada eixo de movimento por servo-motores CA e aceleração máxima de 2 m/s^2 , eixo árvore compacto com acionamento direto (sem transmissões) e rotação máxima de 8000 rpm, velocidade de avanço rápido de 24 m/min, força de avanço máxima admissível 10.000 N, etc...

A posição horizontal do eixo árvore, favorece também a usinagem com velocidades mais elevadas porque a remoção dos cavacos é facilitada pela ação da gravidade, reduzindo desse modo o calor acumulado na região de corte pela presença do cavaco a elevadas temperaturas. Segundo a classificação proposta pela Universidade Técnica de Darmstadt (Dr. Eng. Th. Schmitt), comentada no item 2.10 desse trabalho, leva à classificação da máquina disponível ao grupo de alta velocidade (HVM).

3.3.1.3 Ferramenta

A ferramenta selecionada para os experimentos práticos é uma fresa de topo de fixação mecânica com corte lateral, apresentando um sistema de fixação patenteado comercialmente por SECODIX-C (Seco Tools AB - Main Catalog - 1994). Esse sistema apresenta uma pequena quantidade de componentes móveis, utilizando somente um parafuso central do tipo TORX, que realiza simultaneamente os efeitos de locação e fixação. O parafuso ao ser apertado gera uma resultante com componentes de força, que tendem a empurrar a pastilha de encontro aos três pontos de apoio fresados no assento da fresa, ao mesmo tempo em que empurra a pastilha axialmente, contra o assento. O parafuso de fixação apresenta massa e dimensões muito pequenas, que auxiliam na criação de um projeto compacto com bom nível de balanceamento. A seleção do ângulo de posição de 90° , objetivou eliminar a influência dessa variável sobre a espessura média do cavaco, ou seja, a espessura média do cavaco seria função da relação diâmetro/largura de penetração (posicionamento) e avanço por dente.

A opção por uma fresa com geometria positivo/negativa relaciona-se ao menor consumo de potência, devido ao ângulo de saída efetivo mais positivo. Além disso, essa geometria possibilita um fluxo de cavacos melhorado pelo ângulo axial positivo, permitindo que o cavaco se direcione para fora do bolsão de armazenamento, todavia, o mesmo permanece confinado até o término do arco de contato (manutenção do calor na zona de corte até o término do arco de contato).

Embora recomenda-se para o fresamento plano frontal periférico um ângulo de saída efetivo de 0° , a fresa utilizada gera um ângulo de saída efetivo de 6° , o que diminuirá o esforço de corte e minimizará as vibrações. O ângulo de folga efetivo gerado é de 10° , fato que aumenta a resistência da cunha de corte.

A fresa R217.69-1616.3-13A selecionada apresenta uma única aresta, porque objetivou-se a eliminação do batimento axial como variável do processo. Segundo as recomendações de Darmstadt, foi selecionado um diâmetro de corte pequeno para minimizar o efeito de desbalanceamento da ferramenta. O ângulo de saída efetivo positivo tende a minimizar o efeito de encruamento causado pela adição de silício, facilitando a formação e escoamento dos cavacos.

3.3.1.4 Classes de metal duro e cermet

Os centros de usinagem normalmente oferecidos atualmente pelo mercado, apresentam em geral características que são os requisitos mínimos para a habilitação como máquinas HVM (High Velocity Machines). Normalmente os recursos incorporados fazem com que essas máquinas atinjam velocidades de corte dentro da faixa mais baixa do critério HSC, combinando elevadas taxas de avanço (Schmitt - 1996). No entanto, esses requisitos não são suficientes para gerar um processo de corte de elevadíssima velocidade, mantendo características próprias da região de transição. Nesse sentido, objetivou-se a comparação entre materiais largamente difundidos no mercado, principalmente na indústria de matrizaria, comparando características como: tenacidade, dureza, resistência térmica, etc... Para tanto, foram comparadas três classes de metal duro e uma classe de cermet sem cobertura (item 3.2.3). O metal duro é um produto metalúrgico largamente utilizado, que consiste basicamente de carbeto duros prensados e sinterizados em uma matriz mediante um aglomerante ou metal base.

As propriedades de dureza e tenacidade serão decorrentes da maior ou menor quantidade de carbeto ou aglomerante. O aumento da quantidade de carbeto será responsável pelo aumento da dureza e o aumento da quantidade de aglomerante ou metal base será responsável pelo incremento da tenacidade. Normalmente o metal duro apresenta concentrações de carbeto de tungstênio (WC), tântalo (TaC), titânio (TiC) e Nióbio (NbC), sendo aglomerados, em geral, pelo cobalto (Co) (Marcondes - 1990, Brookes - 1979).

Os grãos duros de carbeto são resistentes ao desgaste mecânico, fato que permite o equacionamento entre a dureza e tenacidade ou a grosso modo, entre a resistência ao desgaste e a resistência a choques mecânicos. Em todas as operações de corte, a presença da tenacidade é fator extremamente importante, pois caso não haja tenacidade suficiente a aresta poderá lascrar e quebrar, reduzindo drasticamente o desempenho da pastilha ou mesmo levando a perda da ferramenta, que em muitos casos causa danos graves à máquina.

A estabilidade térmica praticamente, poderá ser definida como a resistência à deformação, oxidação e difusão.

A deformação plástica da aresta normalmente acontece quando a força de corte é extremamente alta e a classe de metal duro não apresenta resistência à compressão suficiente para a temperatura de corte em questão. Nesses casos existem basicamente três soluções possíveis (Piippo - 1989, Seco Tools AB - Milling Basic Education):

1. Reduzir a temperatura através da redução da velocidade de corte (em fresamento, a velocidade da mesa também deve ser reduzida, embora se mantenha o mesmo avanço por dente).
2. Reduzir a temperatura da aresta e o esforço de corte, através do uso de uma geometria mais positiva.
3. Alterar a classe de metal duro, aumentando a dureza e a resistência ao desgaste.

A primeira alternativa trará como consequência uma redução nas taxas de remoção de material, sendo, portanto, muito pouco atrativa para aplicações HSC. Se o problema puder ser solucionado mediante a troca de geometrias e classes, poderá haver um ganho significativo de produtividade e conseqüentemente de economia na produção. A oxidação é um fenômeno, que é comum a muitos tipos de materiais e é acelerado principalmente pelo aumento da temperatura.

É comum se observar, que os cavacos produzidos em operações de usinagem podem apresentar colorações diferentes (marrom, azul claro, azul escuro, levemente esverdeado, etc...), dependendo da temperatura envolvida, da espessura do cavaco, etc...

Normalmente a gama de cores observadas (cores de material tratado) indica a densidade da camada de óxido formada sobre a superfície aquecida, sendo um forte indicador da temperatura de corte. Durante o processo de corte, a aresta permanece sujeita às mesmas temperaturas por um longo intervalo de tempo, estando cercada e sofrendo atrito pela peça e pelo cavaco. A entrada de oxigênio entre as superfícies do cavaco, da ferramenta e da peça irá causar uma forte oxidação e o produto dessa oxidação será transportado continuamente.

A difusão é a maior responsável pelo efeito de craterização causado na usinagem dos aços. O efeito é acentuado pelo uso de altas velocidades de corte devido ao grande aumento nos índices de temperatura. A difusão, a grosso modo, implica na reação química entre dois materiais, que se encontram em contato e submetidos à pressão. Logicamente, a temperatura será também um fator de grande influência na aceleração do processo (Piippo - 1989, Seco Tools AB - Milling Basic Education).

O fato de uma das superfícies em contato estar em constante movimento, ao contrário do que se imagina, tende a incrementar o processo, levando ao crescimento da cratera tanto em tamanho quanto em profundidade. Pastilhas de metal duro específicas, quando submetidas à análises microscópicas tornam possíveis a distinção de diferentes constituintes, que em nomenclatura metalúrgica são chamadas de fases. Os grãos de carbeto de tungstênio são chamados de fase α (fase- α) e o material aglomerante (cobalto), que efetua a ligação entre os grãos é chamado de fase β (fase- β). As classes ISO K, mais simples, apresentam em sua composição somente esses dois constituintes. A utilização incorreta de uma classe K para a usinagem de aços possibilita a visualização de uma rápida craterização. Basicamente as classes K apresentam somente as fases α e β puras (WC e Co), constituintes que apresentam uma grande afinidade com as estruturas dos aços. A classe mais indicada para a usinagem dos aços são as chamadas classes ISO P, as quais apresentam além do carbeto de tungstênio, boas adições de outros tipos de carbeto, principalmente o carbeto de titânio (TiC). O titânio apresenta uma estabilidade química e térmica muito maior que o tungstênio e o cobalto, possibilitando a formação de uma fina camada óxida, que retarda a propagação do fenômeno de oxidação.

Além disso, o titânio apresenta pequenas tendências de dissolução nos aços (Chiaverini - 1984). A utilização de pequenas quantidades de carbetos de tântalo, nióbio, tungstênio e titânio (TaC, NbC, WC, TiC) irá promover o aparecimento da chamada fase gama (fase- γ), que é um importante constituinte de todas as classes ISO P (Brookes - 1979).

Pastilhas que apresentam elevados conteúdos de fase γ irão proporcionar boa resistência termo-química, proporcionando excelente resistência a altas velocidades de corte. Os grãos de fase γ encontrados na estrutura servem, também, como um reforço para o fenômeno de difusão, que é mais efetivo para as estruturas simples de WC/Co (Brookes - 1979, Seco Tools AB - Milling Basic Education). O código ISO P01 especifica a classe de metal duro que apresenta o maior conteúdo de fase γ . A propriedade de boa resistência à temperatura, característica das classes P, não pode ser conseguida sem o sacrifício de outra propriedade. O efeito negativo da fase γ recai sobre a tenacidade e a baixa resistência ao desgaste mecânico em baixas temperaturas. Em casos onde o processo de corte não gera altas temperaturas e aplicações onde temperaturas moderadas causam o desgaste de cratera pelo processo de difusão, recomenda-se o uso de classes isentas de fase γ (Brookes - 1979).

Por esse motivo as classes ISO K são mais indicadas para materiais, que apresentam formação de cavacos curtos. Sem dúvida, o material mais importante desse grupo é o ferro fundido, que graças ao seu alto conteúdo de grafita, apresenta uma boa usinabilidade. Outras aplicações para pastilhas de metal duro do grupo K, são os plásticos, materiais sintéticos fibrosos, etc... Graças à sua resistência (resultante da combinação de diferentes fatores) as classes K possibilitam a confecção de arestas bem agudas.

Além do efeito do substrato, cabe analisar a função e influência das coberturas sobre o desempenho das pastilhas (item 5.1 - tabela 1). As classes de metal duro selecionadas apresentam duas opções com cobertura e uma classe ISO P sem cobertura. As classes com cobertura apresentam como constituinte básico o Al_2O_3 (óxido de alumínio) em espessuras bastante elevadas, resultando em excelente resistência à elevadas temperaturas mesmo combinadas à substratos tenazes ISO K. Além desses motivos, com a seleção de duas classes ISO P (com e sem cobertura) e uma classe ISO K seria possível verificar o comportamento das classes em diferentes condições de temperatura, verificando a validade das considerações anteriores.

3.3.1.5 Dados de corte

Os dados de corte utilizados nos ensaios de laboratório, procuraram atender a região de transição situada entre a usinagem dita convencional e operações aceitas como de alta velocidade. Os parâmetros selecionados podem ser resumidos conforme segue:

v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	h_m (mm)	a_p (mm)	a_e (mm)	Método de fresamento
300	0.08	0.04	4.0	4.0	Concordante
348	0.12	0.06			
402					

As velocidades de corte selecionadas foram inicialmente comparadas com os trabalhos publicados pelo Instituto PTW de Darmstadt (Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz - 1996, Tlustý - 1993, Narutaki, Yamane & Kitagawa - 1993, Mathew & Oxley - 1982, Sahm - 1996), e às recomendações do fabricante de ferramentas para o material utilizado (Seco Tools AB - Technical Guide - 1994).

O fabricante da ferramenta divide os diversos tipos de materiais metálicos e não metálicos em grupos de usinagem, que obedecem a critérios específicos de agrupamento. Esses grupos de usinagem se assemelham muito com os grupos utilizados pelo Machining Data Handbook publicado pela SME (Machining Data Center - 1980). O VP40 ISOMAX foi classificado através da descrição de aplicação e faixa de dureza medida, recaindo no grupo SMG 6 (Seco Material Group) (Seco Tools AB - Technical Guide - 1994). Esse grupo reúne aços ferramentas de difícil usinabilidade, aços liga de alto teor e elevada dureza e aços inoxidáveis de estrutura martensítica. Basicamente, os processos de usinagem de altíssima velocidade de corte utilizam o princípio de diminuição da carga de cavacos sobre a aresta de corte através da diminuição do avanço por dente (f_z) e da profundidade de corte (a_p). De maneira geral, essa redução de carga reflete diretamente sobre a taxa de remoção de material (Q eq. 3). Através do uso de elevadas velocidades de corte, a taxa de remoção de material pode ser mantida ou mesmo elevada pela maior rotação de trabalho. O fabricante da ferramenta recomenda para materiais do grupo SMG 6 e condição de contato $a_e/D = 100\%$, os seguintes parâmetros iniciais:

$$Q = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000}$$

eq. 3

Grupo de materiais Seco (SMG)	Classes											
	T15M			T20M			C15M			S60M		
	Avanço por dente (f _z) - mm/dente											
	0.08	0.12	0.16	0.08	0.12	0.16	0.08	0.12	0.16	0.08	0.12	0.16
Velocidade de corte (v _C) - m/min												
6	—	—	—	145	130	—	135	120	—	90	80	75

(Seco Tools AB - Technical Guide - 1994)

A classe T15M não apresenta recomendações de velocidade de corte para esse grupo de material, porque é um metal duro com cobertura destinado à usinagem de ferros fundidos cinzentos e ferros fundidos nodulares e cobre o campo de aplicação ISO K (K01 - K25).

A intenção do uso dessa classe relaciona-se ao tipo de cobertura (basicamente Al₂O₃) e à boa combinação de resistência ao desgaste e tenacidade que é proporcionada.

A T20M é uma classe resistente recomendada para operações de desbaste e operações de acabamento e semi-desbaste de aço com altas velocidades, podendo também ser utilizada com sucesso no fresamento de aços duros. É uma qualidade complementar no programa de fornecimento da Seco para fresamento em alta velocidade de aços inoxidáveis e operações de desbaste em ferros fundidos cinzentos e ferros fundidos nodulares.

A S60M é uma classe sem cobertura de extrema tenacidade indicada para operações de desbaste com elevada severidade. Adequada para altos avanços e altas profundidades de corte.

O cermet C15M é baseado em carbonitreto de titânio e indicado para operações de acabamento e semi-acabamento de aços e aços inoxidáveis austeníticos.

Em todas as variações de dados de corte foi obedecido o limite de carga da pastilha, estando o esforço concentrado na fase negativa da proteção de aresta. Selecionou-se o método de fresamento concordante por se tratar de uma máquina rígida, isenta de folgas, um material laminado pré-usinado sem cascas.

3.3.2 Metodologia do experimento

As experiências conduzidas em laboratório, objetivaram o levantamento de curvas de desgaste para as classes especificadas. Todas as curvas de desgaste foram monitoradas através do comprimento linear usinado em cada passada da ferramenta. Resumindo, a cada 200 mm de material usinado, a ferramenta era retirada da região de contato e parada para medição e análise. Foi estipulado inicialmente como critério de fim de vida, a usinagem de 8400 mm de material ou o lascamento severo da aresta de corte (Observação: os 8400 mm correspondem à um tempo médio de contato da ferramenta de 20 minutos. Esse tempo médio foi adotado, devido à utilização desse padrão pela maioria dos fabricantes de ferramentas de corte). Caso os 8400 mm fossem atingidos, haveria a comparação do desgaste de flanco máximo VB da pastilha. Foi considerado lascamento severo, o lascamento de pelo menos 60% do comprimento utilizado da aresta de corte, ou seja, utilizando um $a_p = 4.0$ mm, o lascamento seria considerado severo se pelo menos 2.4 mm da aresta de corte estivesse lascada.

O corpo de prova apresentou as dimensões do croquis da figura 33, sendo fixado através de uma morsa de fuso hidráulico de 4 toneladas, conforme a figura 34.

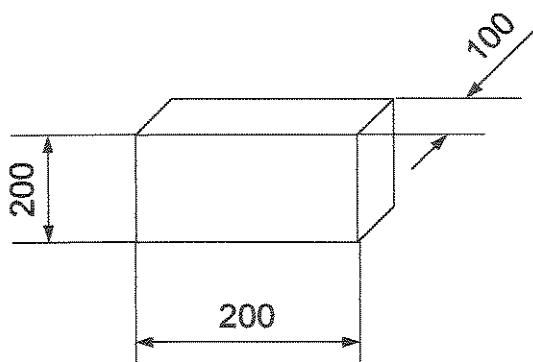


Figura 33 - Croquis do corpo de prova

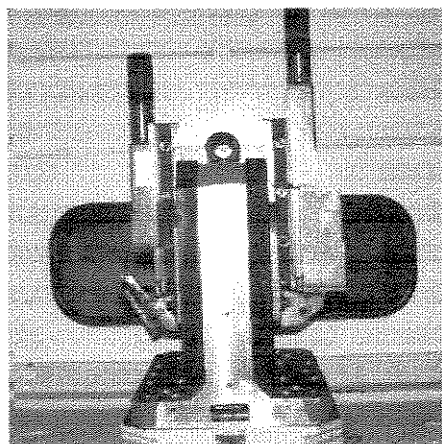


Figura 34 - Sistema de fixação do corpo de prova

Capítulo 4

Resultados

4.1 Curvas de desgaste

Na condução dos testes de laboratório cabe ressaltar que utilizou-se pastilhas do mesmo lote de fabricação afim de evitar dispersão nos pontos. O lote do material usinado também foi mantido constante com o mesmo objetivo. Para cada ensaio foram executadas três repetições para verificar a dispersão dos pontos. Os valores representados nos gráficos das figuras 35, 36, 37, 38, 39 e 40 representam os pontos médios obtidos experimentalmente com uma dispersão máxima entre 10 e 15%. As figuras numeradas de 35 a 40 representam os ensaios experimentais de numerados de 1 a 6.

4.1.1 Ensaio 1

Dados de trabalho:					
v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)	a_e (mm)	h_m (mm)	Observações
300	0.08	4.0	4.0	0.04	Movimento concordante

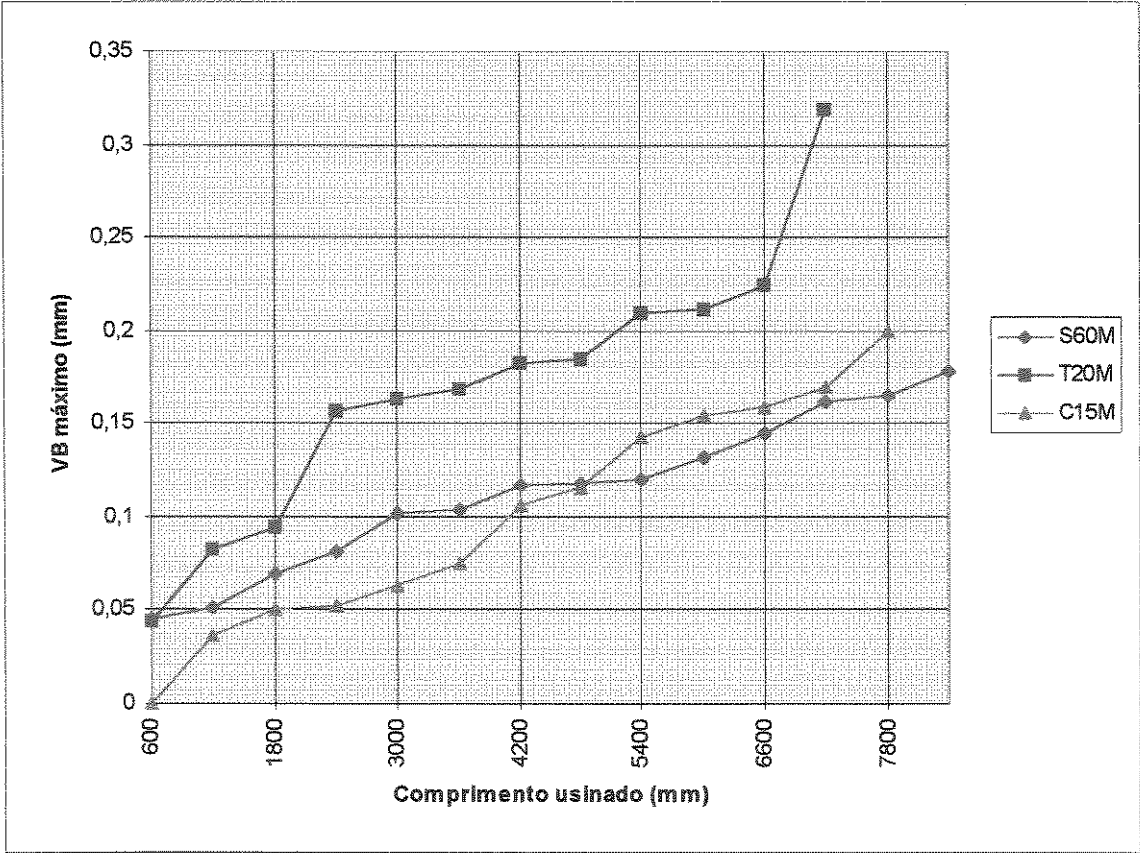


Figura 35 - Curva de desgaste para a 1ª condição de ensaio

4.1.2 Ensaio 2

Dados de trabalho:					
v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)	a_e (mm)	h_m (mm)	Observações
300	0.12	4.0	4.0	0.06	Movimento concordante

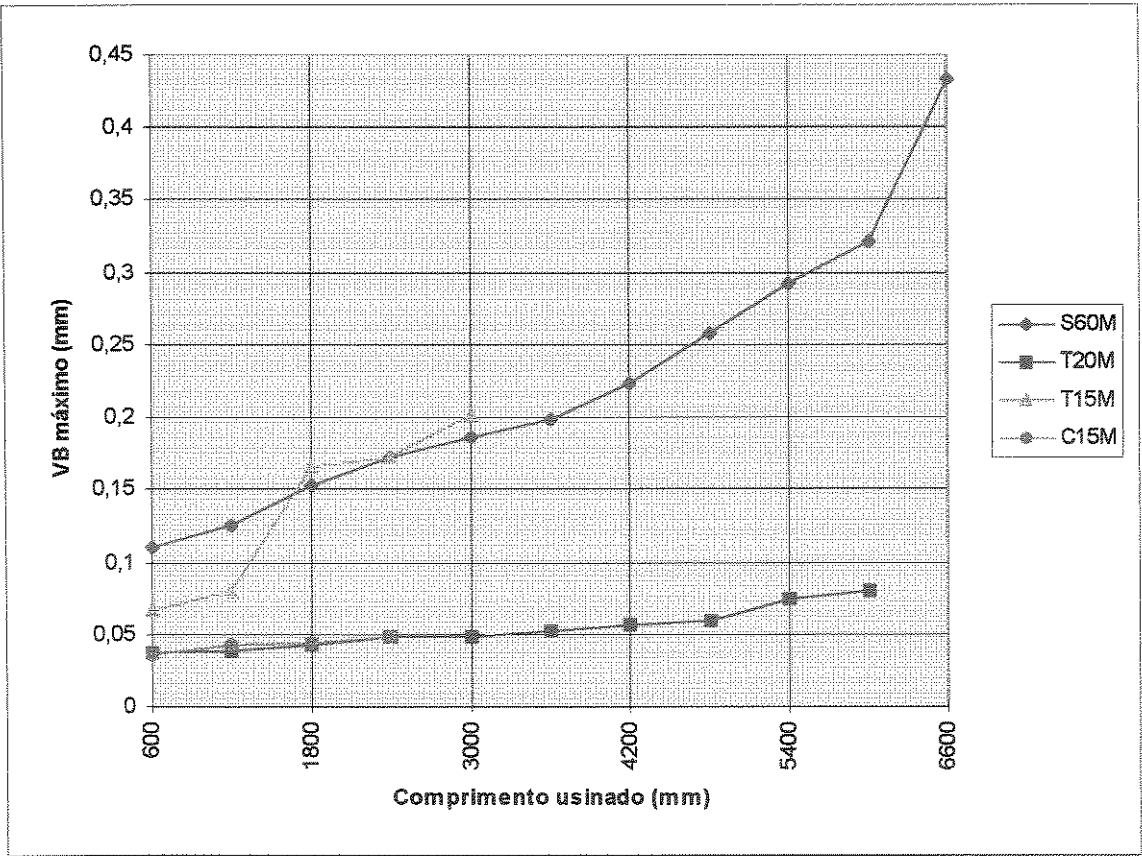


Figura 36 - Curva de desgaste para a 2ª condição de ensaio

4.1.3 Ensaio 3

Dados de trabalho:					
v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)	a_e (mm)	h_m (mm)	Observações
348	0.08	4.0	4.0	0.04	Movimento concordante

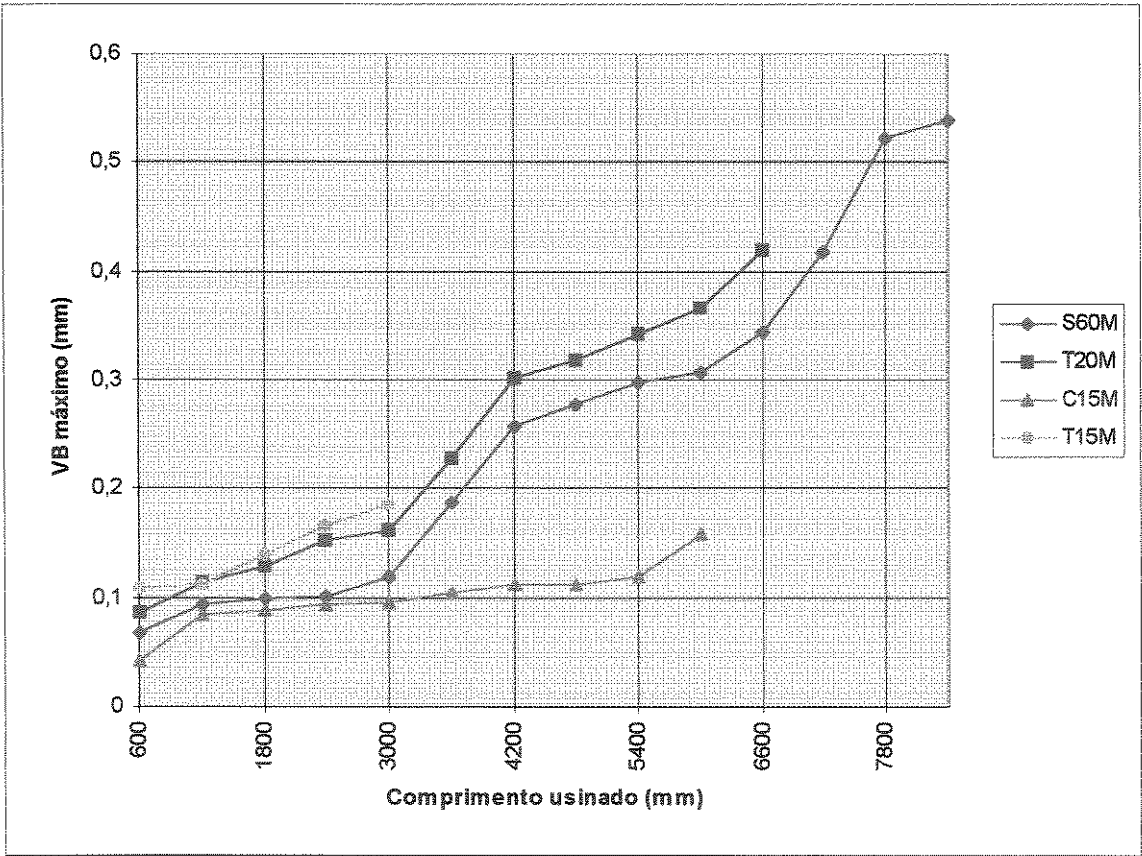


Figura 37 - Curva de desgaste para a 3ª condição de ensaio

4.1.4 Ensaio 4

Dados de trabalho:					
v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)	a_e (mm)	h_m (mm)	Observações
348	0.12	4.0	4.0	0.06	Movimento concordante

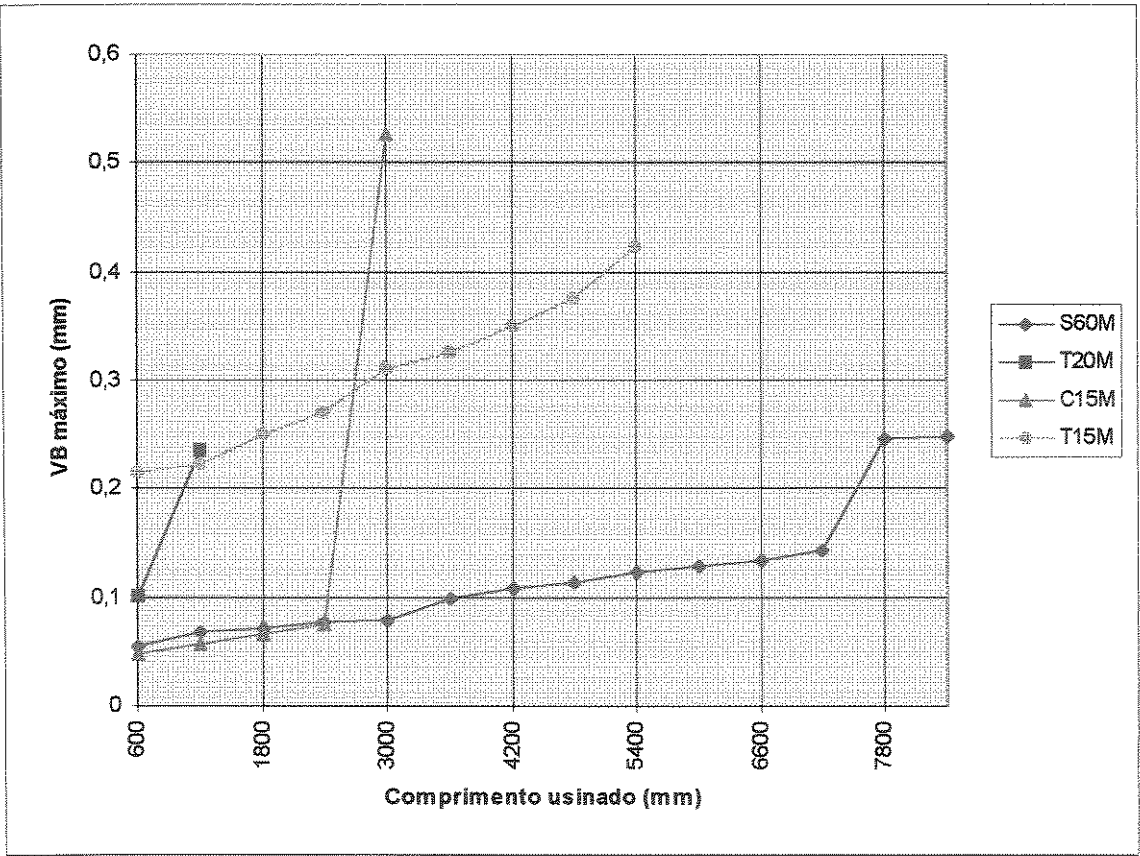


Figura 38 - Curva de desgaste para a 4ª condição de ensaio

4.1.5 Ensaio 5

Dados de trabalho:					
v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)	a_e (mm)	h_m (mm)	Observações
402	0.08	4.0	4.0	0.04	Movimento concordante

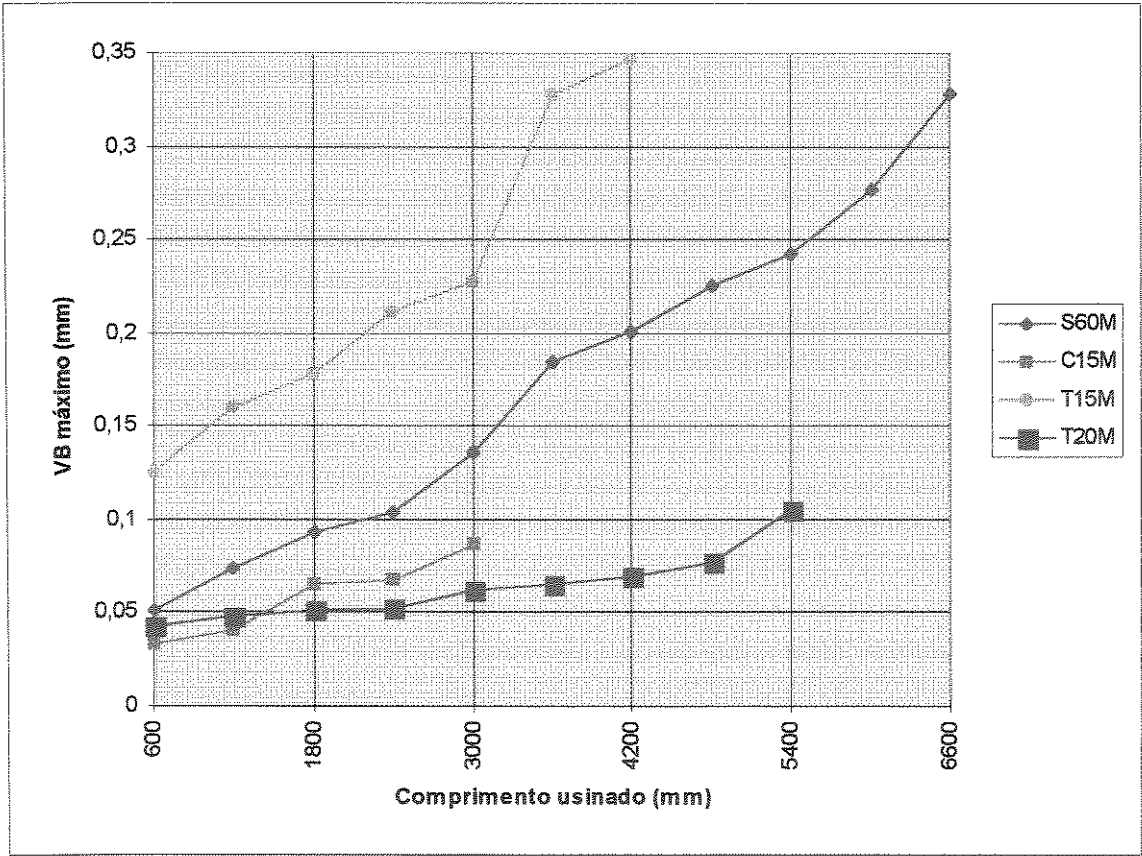


Figura 39 - Curva de desgaste para a 5ª condição de ensaio

4.1.6 Ensaio 6

Dados de trabalho:					
v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)	a_e (mm)	h_m (mm)	Observações
402	0.12	4.0	4.0	0.06	Movimento concordante

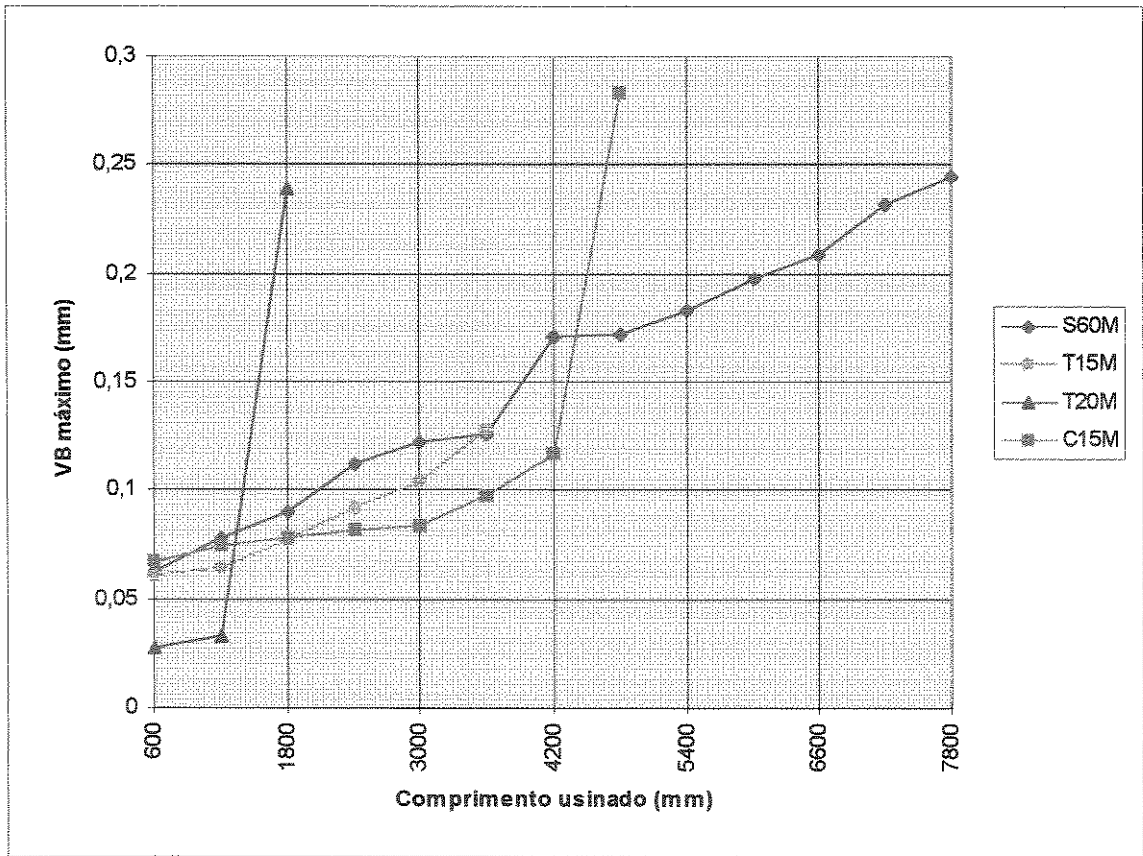


Figura 40 - Curva de desgaste para a 6ª condição de ensaio

4.2 Considerações sobre os ensaios de laboratório

4.2.1 Classe T15M (ISO K01-K25)

A tabela 6, apresenta a evolução do desgaste de flanco máximo da classe T15M em determinadas condições de corte para intervalos lineares previamente estabelecidos. A simples comparação das condições de trabalho com a evolução do desgaste de flanco não oferece informações suficientes para a análise do comportamento da classe em condições de trabalho não típicas (fresamento de topo na região de transição). A T15M por ser uma classe basicamente recomendada para a usinagem de ferros fundidos cinzentos e ferros fundidos nodulares em condições de elevada severidade (campo de aplicação ISO K01-K25), considera a utilização de seções de corte relativamente altas em combinação com velocidades particularmente elevadas (Seco Tools AB - Technical Guide - 1984).

Tabela 6 - Resultados do desgaste VB máximo
para a classe T15M

Comprimento usinado	Avanço por dente (mm/dente)					
	0.08			0.12		
	Velocidade de corte (m/min)					
	300	348	402	300	348	402
Desgaste máximo VB (mm)						
600	—	0.109	0.126	0.066	0.215	0.061
1200	—	0.122	0.160	0.080	0.223	0.064
1800	—	0.139	0.178	0.165	0.250	0.077
2400	—	0.166	0.212	0.172	0.271	0.092
3000	—	0.186	0.228	0.202	0.311	0.104
3600	—	—	0.327	—	0.326	0.128
4200	—	—	0.347	—	0.350	—
4800	—	—	—	—	0.376	—
5400	—	—	—	—	0.423	—
6000	—	—	—	—	—	—
6600	—	—	—	—	—	—
7200	—	—	—	—	—	—
7800	—	—	—	—	—	—
8400	—	—	—	—	—	—

Para tanto, o procedimento de análise se tornará mais prudente e seguro se houver a abordagem das características metalúrgicas da classe. Em primeira aproximação a classe T15M apresenta as seguintes características (Seco Tools do Brasil - 1997):

Cobertura:

- Espessura total da cobertura - 3.5 μm
- $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ti}(\text{C},\text{N}) + \text{TiC} + \text{Ti}(\text{C},\text{O},\text{N})$

Substrato:

- Zona enriquecida de cobalto: AUSENTE
- $\text{Co} \cong 6\%$

A classe T15M apresenta sua primeira camada de cobertura composta por Al_2O_3 . O óxido de alumínio é um composto de baixo coeficiente de dilatação térmica e baixa condutividade térmica. Por ser um composto basicamente refratário, irá proteger o substrato da pastilha contra a ação das elevadas temperaturas geradas nas interfaces de contato entre o cavaco, a ferramenta e a peça. No entanto, a espessura total da camada de cobertura da classe T15M não é comparativamente elevada. Essa menor espessura limitará a capacidade de restrição do fluxo de calor, tornando o substrato mais sensível à diminuição de dureza.

Por outro lado, o substrato por apresentar uma boa tenacidade e uma dureza moderada, será mais sensível às reduções de dureza localizadas, principalmente em regiões próximas à aresta de corte. Nessas regiões, a queda de dureza implicará em alterações dimensionais que causarão tensões de tração e compressão localizadas, levando ao lascamento da camada de cobertura.

Para atender a área de aplicação mencionada acima, a pastilha XCMX 13T308TR-M11 é reforçada com uma preparação de aresta de $0.11 \times 15^\circ$. Além do chanfro de proteção, o processo de cobertura CVD exige por sua vez, um maior arredondamento da aresta para melhorar a aderência das diferentes camadas de cobertura. Esse maior arredondamento da aresta dificulta a utilização da classe em aplicações onde a espessura do cavaco é muito pequena (cavacos delgados) ou seja, em baixa velocidade de avanço. Nesses casos, a adesão e a fadiga térmica serão responsáveis pelo lascamento da aresta de corte. Esse fato pode ser observado através do quadro do desgaste (tabela 6), onde a velocidade de corte de 300 m/min combinada com a taxa de avanço de 0.08 mm/rotação levou ao lascamento severo da aresta de corte em comprimentos inferiores a 600 mm (figura 35).

No entanto, o aumento da temperatura de corte ocasionado pelo aumento da espessura, possibilitou a alteração do comportamento do desgaste, minimizando a adesão e melhorando o desempenho geral da classe (figura 36).

Observando o quadro de evolução do desgaste (tabela 6), verifica-se que à 348 m/min de velocidade de corte, a tendência de evolução do desgaste de flanco se assemelha muito ao observado na velocidade de 300 m/min (figuras 36 e 37). Contudo, o melhor desempenho pode ser explicado pela minimização da soldagem de partículas do cavaco (adesão) pelo aumento da temperatura de corte.

Considerando a velocidade de 402 m/min, observa-se que o aumento da taxa de avanço levou a uma diminuição do valor do comprimento linear usinado, devido à deformação localizada e ao lascamento da camada de cobertura, causados pelo aumento excessivo da temperatura de corte. Durante o levantamento experimental de dados, pôde ser observado que depois do lascamento da cobertura existia um processo acelerado de remoção da cobertura, levando ao lascamento severo da aresta de corte. Além disso, simultâneamente ao processo de remoção da cobertura existe um aumento considerável do atrito entre o cavaco e a superfície de contato da aresta de corte, acentuando ainda mais as interações físico-químicas de soldagem e difusão.

Resumindo, para a classe T15M (ISO K01-K25), observou-se o seguinte comportamento, em relação à vida da ferramenta:

v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	Efeito
300	0.08	referência
300	0.12	+
348	0.08	+
348	0.12	++
402	0.08	++
402	0.12	+

Assim, todos os parâmetros responsáveis pelo aumento da temperatura de corte, favoreceram o desempenho da classe, todavia nota-se pelas figuras 35, 36, 37, 38, 39 e 40 e pela tabela 6 que, existe um limite de aumento da temperatura pela combinação $v_c = 402$ m/min e $f_z = 0.12$ mm/dente.

4.2.2 Classe T20M (ISO P10-P30, M15-M25, K20-K35)

Da mesma maneira que a classe T15M, a tabela 7 apresenta a evolução do desgaste de flanco máximo da ferramenta em determinadas condições de corte para intervalos lineares previamente estabelecidos. Estudando o comportamento metalúrgico da classe T20M de maneira semelhante à executada com a classe T15M, torna-se possível explicações e comentários relacionados às curvas de tendência.

A T20M é uma classe altamente resistente ao desgaste indicada para operações leves e moderadamente severas à elevadas velocidades de corte ou para operações de fresamento de materiais duros. Também é indicada para operações severas (desbaste pesado) em ferros fundidos cinzentos e ferros fundidos nodulares, onde as exigências por tenacidade são maiores (Seco Tools AB - Technical Guide - 1994). A classe T20M apresenta as seguintes características (Seco Tools do Brasil - 1997):

Tabela 7 - Resultados do desgaste VB máximo para a classe T20M

Comprimento usinado	Avanço por dente (mm/dente)					
	0.08			0.12		
	Velocidade de corte (m/min)					
	300	348	402	300	348	402
Desgaste máximo VB (mm)						
600	0.044	0.086	0.043	0.037	0.102	0.028
1200	0.083	0.115	0.048	0.038	0.236	0.033
1800	0.094	0.128	0.051	0.043	—	0.239
2400	0.157	0.153	0.053	0.048	—	—
3000	0.163	0.162	0.062	0.049	—	—
3600	0.169	0.229	0.066	0.053	—	—
4200	0.183	0.302	0.070	0.056	—	—
4800	0.185	0.319	0.077	0.060	—	—
5400	0.209	0.342	0.105	0.074	—	—
6000	0.212	0.367	—	0.080	—	—
6600	0.224	0.420	—	—	—	—
7200	0.319	—	—	—	—	—
7800	—	—	—	—	—	—
8400	—	—	—	—	—	—

Cobertura:

- Espessura total da cobertura - 4.5 µm
- TiN + Al₂O₃ + TiN + Ti(C,N) + TiN

Substrato:

- Zona enriquecida de cobalto: AUSENTE
- η phase < 1.5 µm
- Co ≅ 7%

Observando as figuras 35, 36, 37, 38, 39, 40 e a tabela 7 de evolução do desgaste de flanco para a classe T20M, verifica-se que em taxas de avanço menores ($f_z = 0.08$ mm/dente) existe um comportamento teóricamente esperado, ou seja, uma diminuição do comprimento linear usinado com o aumento da velocidade de corte. Para a taxa de avanço $f_z = 0.08$ mm/dente a redução da vida da ferramenta pode ser atribuído principalmente à deformação do substrato e à fase η.

O processo tradicional de cobertura CVD, normalmente gera, para algumas classes de metal duro, uma terceira fase constituinte conhecida como “η phase”. Essa fase é gerada basicamente pela migração de carbetos e carbono para regiões próximas à camada de cobertura, diminuindo o percentual de cobalto, fragilizando a aresta de corte. Normalmente a fase η limita o desempenho da classe em operações que combinam elevadas velocidades de corte e materiais muito duros. Voltando a observar a tabela de evolução de desgastes da classe T20M, é possível notar a influência da fase η, principalmente em velocidades maiores que 300 m/min. Nessas condições, o efeito da fase η combinado com o encruamento da superfície da peça e com a adesão de partículas sobre a aresta de corte, leva a uma aceleração considerável do lascamento da aresta. Observando mais atentamente, verifica-se que a 402 m/min o desempenho foi ligeiramente aumentado. Esse aumento pode ser atribuído principalmente à diminuição do efeito de soldagem de partículas sobre regiões que apresentavam micro lascas.

Fazendo-se um resumo, para a classe T20M (ISO P10-P30, M15-M25, K20-K35), apresenta-se o seguinte comportamento em relação à vida da ferramenta:

v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	Efeito
300	0.08	referência
300	0.12	—

v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	Efeito
348	0.08	—
348	0.12	— — —
402	0.08	— —
402	0.12	— —

Ou seja, o aumento da velocidade de corte (v_c), mantendo-se o avanço, provocou uma piora da vida da ferramenta, o mesmo ocorrendo com o aumento do avanço, que conduziu à aceleração do lascamento do revestimento.

4.2.3 Classe S60M (ISO P30-P45, M30-M35)

A S60M é uma classe sem cobertura com tenacidade extremamente elevada, indicada principalmente para operações severas de desbaste em condições altamente desfavoráveis (campo de aplicação ISO P30-P45, M30-M35). Apresenta um bom desempenho em altas taxas de avanço e grandes profundidades de corte. Apresenta também um bom desempenho em materiais difíceis de serem usinados que endurecem por precipitação ou materiais que encruam facilmente, exigindo elevada tenacidade (Seco Tools AB - Technical Guide - 1994). Observando metalúrgicamente a classe, destacam-se as seguintes características (Seco Tools do Brasil - 1997):

Substrato:

- Zona enriquecida de cobalto: AUSENTE
- Baixa porosidade
- Granulometria moderada
- $Co \cong 11\%$

Observando a tabela de evolução do desgaste de flanco máximo para a classe S60M, verifica-se que em baixas taxas de avanço ($f_z = 0.08$ mm/dente), o aumento da velocidade de corte produziu um aumento natural da marca de desgaste para os mesmos comprimentos lineares usinados, devido ao aumento da temperatura na região de corte. Observa-se que o aumento do percentual do cobalto torna a tenacidade do composto consideravelmente maior.

Esse aumento da tenacidade minimiza o aparecimento de micro-trincas resultantes principalmente do processo de encruamento do cavaco e da superfície em usinagem.

A S60M por ser uma classe sem cobertura, apresenta um arredondamento da aresta menor, sendo mais indicada para remoção de cavacos delgados, porque diminuirá o encruamento devido ao menor esforço de corte. Com a combinação de uma velocidade de corte de 300 m/min e uma taxa de avanço de 0.08 mm/min foram gerados baixo encruamento e pequena soldagem de cavacos, fato que minimizou o lascamento severo da pastilha. O aumento da velocidade de corte para 348 m/min trouxe como consequência um aumento considerável da temperatura de corte. O aumento da marca de desgaste, nessa faixa de velocidade pode ser explicado principalmente pelo aumento da temperatura de corte . O aumento da geração de calor tende a reduzir a dureza do substrato facilitando a abrasão mecânica do cavaco.

**Tabela 8 - Resultados do desgaste VB máximo
para a classe S60M**

Comprimento usinado	Avanço por dente (mm/dente)					
	0.08			0.12		
	Velocidade de corte (m/min)					
	300	348	402	300	348	402
Desgaste máximo VB (mm)						
600	0.045	0.069	0.052	0.111	0.055	0.063
1200	0.051	0.093	0.074	0.125	0.069	0.078
1800	0.070	0.099	0.093	0.153	0.071	0.090
2400	0.082	0.101	0.104	0.173	0.077	0.112
3000	0.102	0.120	0.136	0.187	0.080	0.122
3600	0.104	0.187	0.185	0.189	0.099	0.126
4200	0.117	0.258	0.201	0.224	0.109	0.171
4800	0.118	0.278	0.225	0.258	0.115	0.172
5400	0.120	0.298	0.243	0.293	0.123	0.183
6000	0.132	0.307	0.277	0.321	0.129	0.198
6600	0.145	0.345	0.328	0.434	0.135	0.209
7200	0.162	0.417	—	—	0.144	0.232
7800	0.165	0.523	—	—	0.246	0.245
8400	0.178	0.540	—	—	0.248	—

No entanto com uma velocidade de corte de 402 m/min, mantendo a taxa de avanço de $f_z = 0.08$ mm/dente, o nível de desgaste de flanco foi ligeiramente inferior que na velocidade de 348 m/min. Esse fato pode ser atribuído principalmente à menor adesão de cavacos, constatada visualmente no microscópio.

O menor desempenho da classe S60M, a 402 m/min, pode ser atribuído à redução ainda mais significativa da dureza do substrato em combinação ao encruamento do cavaco. Com maior espessura de corte ($f_z = 0.12$ mm/dente) pode ser observado um aumento significativo da marca de desgaste na velocidade de corte de 300 m/min. Nessas condições, o maior encruamento causado pelo aumento da espessura do cavaco em combinação com uma grande adesão levaram ao lascamento severo da aresta de corte em um menor comprimento linear usinado. O aumento da temperatura causado pela velocidade de corte de 348 m/min, diminuiu a adesão e soldagem de cavacos melhorando consideravelmente a marca de desgaste para o mesmo comprimento linear usinado. Incrementando a velocidade de corte para 402 m/min, pode ser observado na tabela 8 uma redução no valor da marca de desgaste para os mesmos comprimentos lineares usinados, atribuído principalmente à diminuição da soldagem de cavacos na aresta de corte. No entanto o aumento da geração de calor torna o substrato menos duro e mais sensível ao desgaste por abrasão mecânica. Esse fato pôde ser constatado visualmente no microscópio através do aparecimento de craterização na região adjacente à aresta de corte. Embora a soldagem de cavacos tenha sido minimizada a combinação da craterização com a redução de dureza fez com que a pastilha apresentasse um desempenho ligeiramente inferior ao encontrado com a velocidade de 348 m/min.

Resumindo, para a classe S60M (ISO P30-P45, M30-M35), observou-se o seguinte comportamento, em relação à vida da ferramenta:

v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	Efeito
300	0.08	referência
300	0.12	—
348	0.08	— — —
348	0.12	—
402	0.08	— —
402	0.12	—

Assim, todos os parâmetros responsáveis pelo aumento da temperatura de corte, favoreceram o aumento do desgaste de flanco, todavia nota-se pelas figuras 35, 36, 37, 38, 39 e 40 e pela tabela 8 que, a partir de determinado patamar de temperatura inicia-se o processo de lascamento da aresta de corte, ocasionado principalmente pela adesão.

4.2.4 Classe C15M (ISO P05-P25, M10-M25)

A C15M é um cermet baseado em Ti(C,N) especialmente desenvolvido para operações de fresamento no campo de aplicação ISO P10-P20. Apresenta um bom desempenho em operações de acabamento e semi-desbaste de aços em geral ou operações de acabamento fino em aços inoxidáveis austeníticos (Seco Tools AB - Technical Guide - 1994). Observa-se que os cermet's apresentam como características principais, elevada dureza e pequeno arredondamento da aresta.

Tabela 9 - Resultados do desgaste VB máximo para a classe C15M

Comprimento usinado	Avanço por dente (mm/dente)					
	0.08			0.12		
	Velocidade de corte (m/min)					
	300	348	402	300	348	402
Desgaste máximo VB (mm)						
600	—	0.043	0.033	0.036	0.047	0.067
1200	0.037	0.084	0.041	0.043	0.057	0.075
1800	0.050	0.088	0.065	0.044	0.067	0.078
2400	0.053	0.094	0.068	0.048	0.075	0.082
3000	0.063	0.096	0.087	—	0.526	0.084
3600	0.075	0.105	—	—	—	0.098
4200	0.106	0.112	—	—	—	0.117
4800	0.116	0.113	—	—	—	0.283
5400	0.143	0.119	—	—	—	—
6000	0.155	0.159	—	—	—	—
6600	0.159	—	—	—	—	—
7200	0.170	—	—	—	—	—
7800	0.200	—	—	—	—	—
8400	—	—	—	—	—	—

Esse menor arredondamento, torna-se particularmente interessante em operações que utilizam baixas taxas de avanço. A classe C15M apresenta como constituintes básicos Ti(C,N) + WC + TaC + Co + Ni + Mo. O molibdênio apresenta em geral uma forte tendência em aumentar a resistência a quente do composto, formando carbeto facilmente. Além do molibdênio, a adição de Ni tende a melhorar a tenacidade mantendo uma boa resistência da aresta de corte. A baixa afinidade química dos cermet's com uma ampla gama de materiais os torna uma boa opção para operações de acabamento de aços em elevadas velocidades de corte (Seco Tools AB - 1991).

Observando a tabela de evolução do desgaste de flanco máximo para o cermet C15M, verifica-se que com pequenas espessuras ($f_z = 0.08$ mm/dente), o aumento da velocidade de corte produziu um aumento natural da marca de desgaste para os mesmos comprimentos lineares usinados. Esse aumento da marca de desgaste pode ser explicado pelo aumento da temperatura na região de corte, diminuindo a dureza a quente. Além disso, o encruamento do material, causado pelo esforço de corte, leva ao aparecimento de micro-trincas que aceleram a possibilidade de adesão dos cavacos, levando ao lascamento severo. Com a combinação da velocidade de corte de 300 m/min e o avanço de 0.08 mm/dente, o desgaste de flanco máximo e o comprimento linear usinado foram consideravelmente maiores que os valores levantados nas velocidades de 348 e 402 m/min. O lascamento severo pode ser atribuído principalmente ao aumento da adesão causado pelo aparecimento de micro-trincas decorrentes da variação de carga localizada devido ao encruamento dos cavacos. No entanto, o aumento do avanço para $f_z = 0.12$ mm/dente ocasionou um aumento da carga sobre a aresta de corte devido ao aumento da área da seção do cavaco. Essa maior carga combinada com uma aresta de corte de resistência comparativamente menor (aresta de corte mais aguda, devido ao menor arredondamento), levou a um lascamento severo nos primeiros milímetros de usinagem para as velocidades de 300 e 348 m/min. Observa-se através da tabela 9, que o aumento da temperatura de corte melhorou o fluxo de cavacos para a mesma carga gerada sobre a aresta de corte. Nessas condições foi minimizada a adesão dos cavacos sobre as micro trincas geradas, levando a uma melhora visível no desempenho da classe.

Resumindo, para a classe C15M (ISO P05-P25, M10-M25), observou-se o seguinte comportamento, em relação à vida da ferramenta:

v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	Efeito
300	0.08	referência
300	0.12	-----
348	0.08	—
348	0.12	--
402	0.08	----
402	0.12	--

Através das figuras 35, 36, 37, 38, 39 e 40 e pela tabela 9, verifica-se nitidamente a presença de uma região onde a adesão se torna mais atuante causando o lascamento severo com comprimentos lineares consideravelmente menores.

Capítulo 5

5.1 Conclusões

1. Pode ser verificado através dos experimentos práticos que o fenômeno do desgaste predominante para o material utilizado dentro da faixa de velocidade de corte de 300 a 400 m/min, foi a aresta postiça e a adesão.
2. A forte adesão e a soldagem de cavacos levou ao lascamento generalizado das classes de metal duro com e sem cobertura e da classe de cermet.
3. O cermet apresentou, como era esperado, um menor desgaste de flanco, devido à maior dureza a quente, a maior estabilidade química e a menor tendência à soldagem dos cavacos. No entanto, seu desempenho não foi superior à classe S60M (metal duro sem cobertura), devido à menor tenacidade e à maior tendência a propagação de trincas.
4. As classes de metal duro com cobertura foram particularmente sensíveis ao lascamento severo, devido à menor dureza a quente do substrato, levando a deformação de pontos localizados da aresta de corte e ao lascamento da camada de cobertura.
5. As classes de metal duro com cobertura foram particularmente sensíveis ao encruamento do material e a variação de dureza localizada (variação de carga), acelerando fenômenos como o lascamento da camada de cobertura e o aumento da adesão.
6. As classes sem cobertura, com elevada tenacidade, se apresentaram mais indicadas para as operações na região de transição, entre processos convencionais e processos considerados de elevada velocidade, devido à maior segurança da aresta de corte mesmo em condições de desgaste mais severos.
7. As classes sem cobertura com elevada tenacidade se mostraram mais adequadas para as operações de fresamento com baixas taxas de avanço (cavacos delgados) e elevadas

velocidades de corte, devido ao menor arredondamento da aresta de corte e a maior segurança proporcionada por uma maior estabilidade da aresta de corte.

8. Classes de metal duro com a última camada de Al_2O_3 não se mostraram adequadas para operações de fresamento devido à elevada fragilidade e ao baixo coeficiente de dilatação térmica (micro-trincas)
9. Classes mais modernas recobertas pelo processo MT-CVD podem ser um boa recomendação para aplicações semelhantes à estudada, devido ao aumento da tenacidade nas regiões próximas à camada de cobertura (retardamento do lascamento de cobertura).
10. Classes com cobertura muito espessas, não representam uma boa recomendação para operações que utilizam elevadas velocidades de corte em combinação com baixos avanços em materiais que encruam facilmente ou endurecem por precipitação, devido ao maior raio de arredondamento e a fragilidade ao aumento localizado de dureza da maioria das classes com cobertura.
11. Os resultados e conclusões, aplicam-se às condições estudadas, feitas em um aço de grande aplicabilidade em matrizaria (moldes de injeção de termo-plásticos), onde frequentemente se procura trabalhar ou na zona de transição ou na zona de altíssima velocidade de corte.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Verificar o comportamento de classes de metal duro e cermet disponíveis no mercado em operações de fresamento de cópia de perfis complexos dentro da zona de transição entre velocidades convencionais e altas velocidades de corte.
- Desenvolver uma metodologia ou um coeficiente de correção da velocidade de corte para otimização de operações de fresamento em situações onde o corte interrompido inerente ao processo se torna ainda mais severo.

Referências Bibliográficas

- (1) Schulz, Herbert - High Speed Machining, Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Metodista de Piracicaba, 10/10/1996.
- (2) Sahm, D - The Technology of High Speed Cutting, Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Metodista de Piracicaba, 10/10/1996.
- (3) Schmitt, Th. - High Speed Milling Machines, Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Metodista de Piracicaba, 10/10/1996.
- (4) Voll, Horst - Performance Capabilities of HSC Spindle Units with Rolling Bearings, Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Metodista de Piracicaba, 10/10/1996.
- (5) Distler, H. , Eberlein, W. - Computer Numerical Control Systems that Master High Speed Cutting Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Metodista de Piracicaba, 10/10/1996.
- (6) Walz, Tilmann - Experience in High Speed Machines with Direct Drives, Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Metodista de Piracicaba, 10/10/1996.
- (7) Kress, KG Aalen, Beck, Hans W. - HSC and High Performance Tools Reduce Workpiece Machining Time, Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Metodista de Piracicaba, 10/10/1996.
- (8) Finzer, Thorsten - The HSC Technology, Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Estadual de Campinas, 1997.
- (9) Schulz, H., Moriwaki, T. - High Speed Machining, Annals of the CIRP, v.41/2/1992
- (10) Tlustý, J - High Speed Machining, Annals of the CIRP, v.42/2/1993.
- (11) Narutaki, N., Yamane, Y, Hayashi, K., Kitagawa, T. - High Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools, Annals of the CIRP, v.42/1/1993.

- (12) Mathew, P., Oxley, P.L.B. - Predicting the Effects of Very High Speeds on Cutting Forces, etc...Annal of the CIRP, v.31/1/1982
- (13) International Standard Organization, France. ISO 3685-1988; Tool Life Testing with Single Point Turning Tools. France, 1988
- (14) Piippo, K. - Milling in Stainless Steel, Sweden. Seco Tools AB, Fagersta, Sweden, 1989.
- (15) Seco Tools AB, Milling - Technical Guide, Sweden. Seco Tools AB, Fagersta, Sweden 1994.
- (16) Novaski, O. - Determinação das Condições Econômicas de Usinagem através de Parâmetros Obtidos na Empresa, Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1989. Tese de Doutorado
- (17) Ferraresi, D. - Fundamentos da Usinagem dos Metais, São Paulo. Editora Edgar Blücher, 1970.
- (18) Rodin, P. - Design and Production of Metal Cutting Tools, Moscow. Mír Publishers, 1968.
- (19) Seco Tools AB, Technical Information - Milling Basic Education, Sweden. Seco Tools AB, Fagersta, Sweden.
- (20) International Standard Organization. ISO 513-1975; Application of Carbides for Machining by Chip Removal - Designation of the Main Groups of Chip Removal and Groups of Application, 1975.
- (21) Seco Tools AB, Technical Information - C15M The New Cermet Grade for Milling, Sweden. Seco Tools AB, Fagersta, Sweden.
- (22) Vieregge, G. - Zerspanung der Eisenwerkstoffe, Düsseldorf. Verlag Stahleisen M.B.H, 1970.
- (23) Machining Data Center. Machining Data Handbook. 3a edição, Ohio, Metcut Researches Associates, v.2, 1980.
- (24) Seco Tools AB, Milling - Main Catalog, Sweden. Seco Tools AB, Fagersta, Sweden 1994.
- (25) Marcondes, Francisco Carlos - A História do Metal Duro, Brasil, Sandvik do Brasil, São Paulo, 1990.
- (26) Seco Tools AB, Milling Basic Education Package - Presentation, Sweden, Seco Tools AB, Fagersta, 1995.
- (27) SPK Feldmühle - I Seminário sobre Aplicação de Cerâmicos para Usinagem de Metais, São Paulo, Gremafer, SPK Feldmühle, 1990.
- (28) Karl Hertel - Cutting Ceramics Manual, Germany, Werkzeugfabrik Karl Hertel GmbH Verkaufs KG.
- (29) Sandvik Coromant - Turning with Ceramics - Inserts and Holders, C-1000:238-Eng

- (30) EPB® Emile PFALZGRAF S.A. - Modular Tooling System, Sweden, Fagersta, 1997.
- (31) Seco Tools AB - Secomax Technical Guide - PCBN Polycrystalline Cubic Boron Nitride, Sweden, Fagersta, 1996.
- (32) Bossom, Paul K. - Finishing Machining of the Hardened Steel Alloys, England, De Beers Industrial Diamond Division.
- (33) Seco Tools AB - Copy Milling - Catalog and Technical Guide, Sweden, Fagersta, 1996
- (34) Seco Tools AB - Procedure Outline for Test and Trouble Shoting, Sweden, Fagersta, 1985.
- (35) Seco Tools AB - Wear Pattern - TP20 New Grade for Turning, Sweden, Fagersta, 1985.
- (36) Eutetic - Informativo Técnico
- (37) ASM International - Machinability of Steels, Metals Handbook, USA, 10ª edição, 1990.
- (38) Chiaverini, Vicente - Aços e Ferros Fundidos, Associação Brasileira dos Metais, São Paulo, 5ª edição, 1984.
- (39) Brookes, Kenneth J.A. - World Directory and Handbook of Hardmetals, UK, Engineers Digest Limited, International Carbide Data, 1979.
- (40) Shaw, Milton C. - Metal Cutting Principles, USA, Claredon Press, Oxford, New York, 1984.
- (41) Seco Tools do Brasil - Relatório de Avaliação Metalúrgica, Brasil, São Paulo, 1997.
- (42) ABNT - NB-204 Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989.
- (43) ABNT - NB-205 Geometria da Cunha de Corte, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990.