

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR EDUARDO SILVA
LISBOA E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 28/02/96.


ORIENTADOR
Prof. OLÍVIO NOVASKI
Matric. 05403-8
FEM - UNICAMP

FRESOTORNEAMENTO EM AÇOS ENDURECIDOS

Autor: **Eduardo Silva Lisboa**

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

Campinas

02/1996

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPTO. DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

FRESOTORNEAMENTO EM AÇOS ENDURECIDOS

Autor: Eduardo Silva Lisboa

Orientador: Prof. Dr. 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 a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas - 02/1996

S.P. - Brasil



E	BC	
UNIVERSIDADE:	UNICAMP	
	837	
	27923	
	667/96	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	R\$ 11,00	
	04/07/96	
PD		

-00085586-3

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

L681f Lisboa, Eduardo Silva
Fresotorneamento em aços endurecidos / Eduardo
Silva Lisboa.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

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

1. Usinagem. 2. Processos de fabricação. 3.
Ferramenta para cortar metais. 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
DEPTO. DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

FRESOTORNEAMENTO EM AÇOS ENDURECIDOS

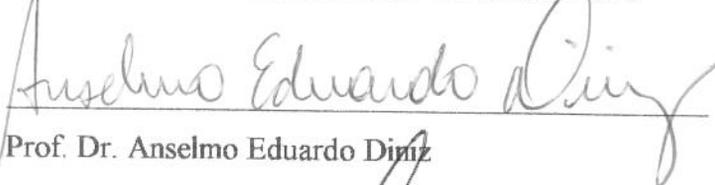
Autor: **Eduardo Silva Lisboa**

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



Prof. Dr. Olívio Novaski, Presidente

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Campinas, 28 de Fevereiro de 1996

Dedicatória:

Aos meus pais, e a minha esposa.

Agradecimentos:

Este trabalho somente pôde ser concluído com a colaboração de diversas pessoas, às quais registro aqui meus sinceros agradecimentos e homenagem:

Aos meus pais, Raimundo e Maria, co-responsáveis por meu caminho até aqui.

A minha esposa, Cristiane, pela colaboração, paciência e compreensão.

Ao meu orientador, Olívio, pelo apoio técnico, mas sobretudo, pela forma compreensiva e amigável com que orientou este trabalho.

A todos os professores, alunos e funcionários do DEF/UNICAMP, que de forma direta ou indireta me apoiaram na conclusão deste trabalho.

A todos os professores, estagiários e funcionários do Depto. de Mecânica da FATEC-SP, que de forma direta ou indireta me apoiaram na conclusão deste trabalho. Entre eles cito: Os professores Santilli, Bulba e Marcelo, os instrutores Marcos, Edson, Walter, Jarbas, Dawson e Miranda, e os estagiários Wanderley, Marco e Shimahara que tiveram participação direta na elaboração deste trabalho.

A Sandvik Coromant, através do engenheiro Marcondes, pelo fornecimento das pastilhas de cerâmica utilizadas em parte dos ensaios.

“Honra a teu pai e mãe”, que é o primeiro mandado com promessa:
“Para que te vá bens e perdure por muito tempo na terra.”

(Efésios 6 : 2,3)

Sumário

Sumário.....	i
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de figuras.....	vii
lista de tabelas.....	x
Nomenclatura.....	xi
Capítulo I : INTRODUÇÃO.....	10
Capítulo II : CONCEITO E CONSIDERAÇÕES SOBRE FRESOTORNEAMENTO.....	11
2.1 Generalidades.....	11
2.2 Fresotorneamento ortogonal.....	12
2.2.1 - Fatores cinemáticos básicos.....	13

2.2.1.1 - Influência do desvio radial na qualidade de superfície.....	13
2.2.1.2 - Influência da velocidade de corte no processo.....	14
2.2.1.3 - Influência do avanço por dente na vida da ferramenta.....	15
2.2.1.4 - Mecanismo de formação do cavaco.....	15
2.3 - Justificativas para o uso do fresotorneamento.....	17
Capítulo III : FERRAMENTAS CERÂMICAS.....	19
3.1 - Generalidades.....	19
3.2 - Definição e Classificação dos Materiais de Corte.....	21
3.2.1 - Pastilhas de cerâmica a base de alumina.....	22
3.2.1.1 - Cerâmica mista.....	23
3.2.1.2 - Cerâmica óxida.....	23
3.2.1.3 - Alumina reforçada com whiskers.....	23
3.2.2 - Pastilhas de cerâmica a base de nitreto de silício.....	24
3.2.2.1 - SIALON.....	24
3.3 - Propriedades.....	25
3.3.1 - Estabilidade Química.....	25
3.3.2 - Resistência/Tenacidade.....	26
3.3.3 - Dureza.....	26
3.3.4 - Resistência ao Desgaste.....	27
3.3.5 - Flutuação da Resistência à Tensão Térmica.....	29
3.4 - Características das ferramentas.....	29
3.5 - Exigências do processo de usinagem para aços endurecidos, quanto às ferramentas.....	30
3.6 - Utilização de materiais cerâmicos no fresamento.....	30
3.7 - Recomendações para o uso de pastilhas de cerâmica quanto à geometria.....	31
3.8 - Início e término do corte com pastilhas de cerâmica.....	32
3.9 - PCBN como material de corte.....	32
3.9.1 - Propriedades.....	33

3.9.1.1 - Dureza.....	33
3.9.1.2 - Tenacidade.....	33
3.9.1.3 - Resistência ao choque térmico.....	33
3.9.1.4 - Resistência a reações químicas.....	34
3.9.2 - O PCBN no fresotorneamento.....	34
Capítulo IV : PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	35
4.1 - Materiais e equipamentos utilizados.....	35
4.2 - Metodologia dos ensaios realizados.....	39
4.2.1 - Ensaios preliminares.....	42
4.2.2 - Ensaios definitivos.....	42
Capítulo V : RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1 - Ensaios preliminares.....	43
5.2 - Ensaios definitivos.....	44
5.2.1 - Ensaio 1.....	44
5.2.2 - Ensaio 2.....	44
5.2.3 - Ensaio 3.....	45
5.2.4 - Ensaio 4.....	46
5.2.5 - Ensaio 5.....	48
5.2.6 - Ensaio 6.....	48
Capítulo VI : CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

Resumo

Lisboa, Eduardo Silva, Fresotorneamento em Aços Endurecidos, Campinas; Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 1996. 51 p. Tese (mestrado)

Este trabalho objetivou o estudo da tecnologia de fresotorneamento, através da análise da viabilidade técnica do mesmo, como uma alternativa para a usinagem final de peças endurecidas, que possuam simetria rotacional. Foram usinados corpos de prova de aço rolamento ABNT 52100, com 60-61 HRc de dureza. Utilizou-se pastilhas de cerâmica mista, variando-se os parâmetros avanço, diâmetro da ferramenta, rotação da peça e ferramenta. A máquina empregada nos ensaios foi um torno CNC no qual foi acoplado um cabeçote fresador. Este acoplamento foi feito no carro transversal, configurando os eixos de rotação da peça e ferramenta na disposição ortogonal, caracterizando portanto, um fresotorneamento ortogonal. Os resultados alcançados mostraram ser possível se atingir qualidades de trabalho e rugosidades baixas, todavia, o objetivo principal da pesquisa não foi o de perseguir as condições ótimas e sim o de se conhecer o processo e sua viabilidade técnica.

Assim, o processo de fresotorneamento, estudado apenas no seu aspecto técnico, mostrou ser um método com potencialidades para ser uma alternativa aos processos de usinagem com ferramentas abrasivas.

Palavras-chave: usinagem, fresotorneamento, cerâmica mista.

Abstract

Lisboa, Eduardo Silva, Turn-milling on hardened steel, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 1996. 51 p. Tese (mestrado)

This work aimed the development of a technology for turn-milling, by searching its technical feasibility, as an alternative for final machining of hardened workpieces having rotary symmetry. Test specimens made of ABNT 52100 bearing steel, with 60-61 Hrc hardness were machined. Cutting material applied was mixed ceramic inserts and it was kept a variation on feed rate, tool diameter and rotation speed of workpiece and tool. Testings were made on a CNC Lathe which a milled head was coupled to. This coupling was made on the transverse carrier, figuring an orthogonal exposure of the rotating axes for workpiece and tool, thus making it true of an orthogonal turn-milling. Achieved results showed that work quality and low roughness can be obtained, no matter the main purpose of this research has been learning about the way out of procedures and technical possibilities, rather than obtaining optimum results. Therefore, the turn-milling process, as investigated, considering the technical aspects only, showed itself as a method with potential enough to serve as an alternative to the machining processes using abrasive tools.

keywords: machining, turn-milling, mixed ceramics.

Lista de figuras

Figura - 2.1 - Possibilidades de arranjo para fresotorneamento.....	11
Figura - 2.2 - Possibilidades de arranjo no fresotorneamento ortogonal.....	12/13
Figura - 2.3 - Influência do desvio radial na qualidade de superfície.....	13
Figura - 2.4 - Influência da velocidade de corte na qualidade de superfície no processo de fresotorneamento.....	15
Figura - 3.1 - Novos compostos cerâmicos e seus comportamentos.....	20
Figura - 3.2 - Dureza, tenacidade e temperatura máxima de corte dos vários materiais para ferramentas de corte.....	21
Figura - 4.1 - Forma geométrica e dimensões do corpo de prova.....	35
Figura - 4.2 - Dimensões das fresas, projetadas especificamente para o processo de fresotorneamento.....	37/38
Figura - 4.3 a - Aspecto do cabeçote fresador em usinagem.....	40
Figura - 4.3 b - Aspecto da disposição ortogonal entre peça e ferramenta...	40
Figura - 4.3 c - Aspecto da máquina com o cabeçote fresador em usinagem	40
Figura - 4.4 - Estrutura metalográfica na superfície antes e após usinagem	42
Figura - 5.1 - Influência da profundidade de corte na rugosidade de superfície	46
Figura - 5.2 - Influência da rotação da peça na rugosidade de superfície....	47
Figura - 5.3 - Influência do avanço na rugosidade de superfície.....	49

Lista de tabelas

Tabela - 3.1 - Dureza dos principais materiais cerâmicos, usados como ferramentas de corte.....	27
Tabela - 3.2 - Valores comparativos de tenacidade.....	33
Tabela - 4.1 - Composição química do aço ABNT 52100 (VC52 - Aços Villares S/A)	35
Tabela - 4.2 - Características geométrica das fresas.....	37
Tabela - 4.3 - Condições dos ensaios realizados.....	41
Tabela - 5.1 - Efeito do método discordante.....	47

Nomenclatura

v_c	velocidade de corte	[m/min.]
v_f	velocidade de avanço	[mm/min.]
f	avanço	[mm/volta]
a_p	profundidade de usinagem	[mm]
a_c	largura de usinagem	[mm]
l_f	percurso de avanço	[mm]
Ra	rugosidade aritmética média	[μ m]
χ_r	ângulo de posição da ferramenta	[$^\circ$]
γ_0	ângulo de saída ortogonal da ferramenta	[$^\circ$]
α_0	ângulo de folga ortogonal da ferramenta	[$^\circ$]
λ_s	ângulo de inclinação da ferramenta	[$^\circ$]
r_E	raio de curvatura da ponta da ferramenta	[mm]
n	rotação	[rpm]
n_p	rotação da peça	[mm/volta]
n_f	rotação da ferramenta	[mm/volta]
Z	numero de pastilhas da ferramenta	
ϕ	diâmetro	[mm]
ω	velocidade angular	[1/min.]
E	módulo de elasticidade	[GPa]
IT	qualidade de trabalho - ISO	
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	

Capítulo I : INTRODUÇÃO

A moderna tecnologia de usinagem ganha alternativas com um processo de usinagem recentemente desenvolvido, denominado fresotorneamento. Os primeiros trabalhos a respeito do assunto começaram a ser desenvolvidos por uma equipe de pesquisadores da Universidade de T. H. Darmstadt - Alemanha, em meados de 1988. A equipe de Darmstadt, coordenada pelo Prof. H. Schulz, e composta por pesquisadores distribuídos em várias áreas (projeto de máquinas, de componentes e usinagem entre outras.) alcançou, após cerca de 08 anos de pesquisa, componentes com qualidade de trabalho IT4 e rugosidades R_z (DIN) da ordem de $0,5 \mu\text{m}$.

Em 1994, após vários trabalhos publicados por esta instituição, um grupo de aproximadamente 50 empresas alemãs, dentre elas Bosch, SKF e Krupp, consolidaram uma parceria com aquela universidade a fim de expandir a pesquisa sobre torneamento em alta velocidade, fresamento em alta velocidade e fresotorneamento, visando retorno técnico-econômico

A pesquisa fora iniciada tendo em vista que os processos convencionais de torneamento e fresamento apresentam fatores tecnológicos limitantes que inviabilizam sua otimização, como por exemplo a força centrípeta na placa e ferramenta respectivamente.

Este trabalho objetivou o estudo da tecnologia do fresotorneamento ortogonal, na disposição centralizado, através da análise da viabilidade técnica do mesmo, como uma alternativa para a usinagem final de peças endurecidas, que possuam simetria rotacional. Os resultados alcançados mostraram ser possível se atingir qualidades de trabalho e rugosidades baixas, todavia, o objetivo principal da pesquisa não foi o de perseguir as condições ótimas e sim o de se conhecer o processo e sua viabilidade técnica.

Assim, o processo de fresotorneamento, estudado apenas no seu aspecto técnico, mostrou ser um método com potencialidades para ser uma alternativa aos processos de usinagem com ferramentas abrasivas.

Capítulo II : CONCEITO E CONSIDERAÇÕES SOBRE FRESOTORNEAMENTO

2.1 - Generalidades

O fresotorneamento é um processo de usinagem composto de três movimentos; rotação da peça , rotação da ferramenta e avanço da ferramenta

Tem-se dois métodos de fresotorneamento (fig. 2.1).

- o ortogonal : o eixo da ferramenta é disposto de forma a se cruzar perpendicularmente ao eixo da peça.

- o coaxial : o eixo da ferramenta avança paralelamente ao eixo de rotação da peça.

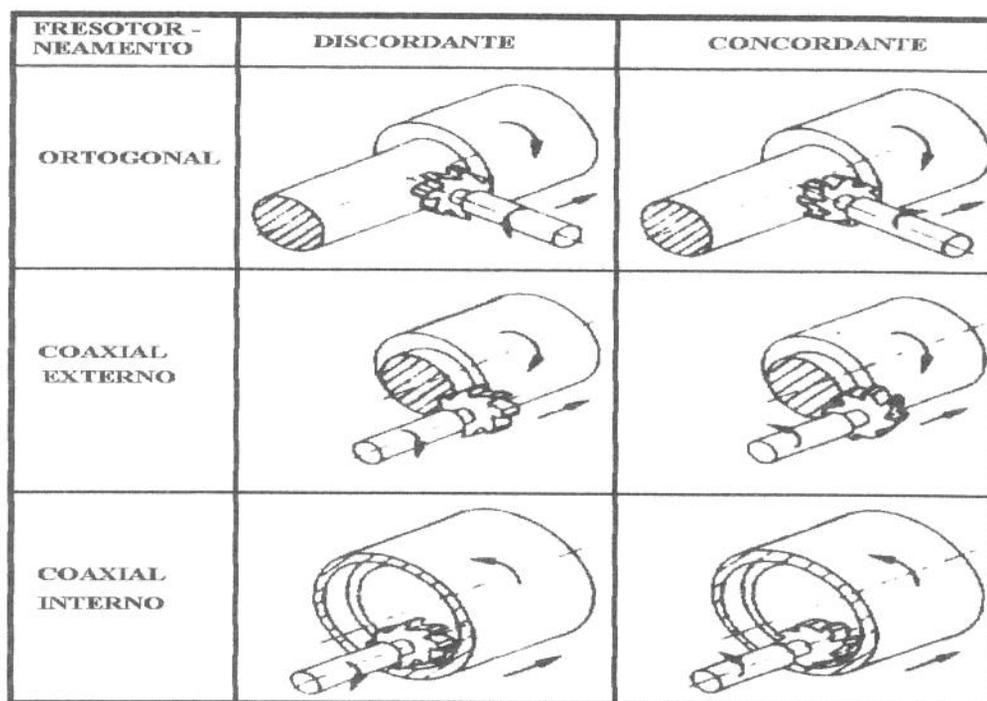


Figura . 2.1 - Possibilidades de arranjo para fresotorneamento (Schultz -1990)

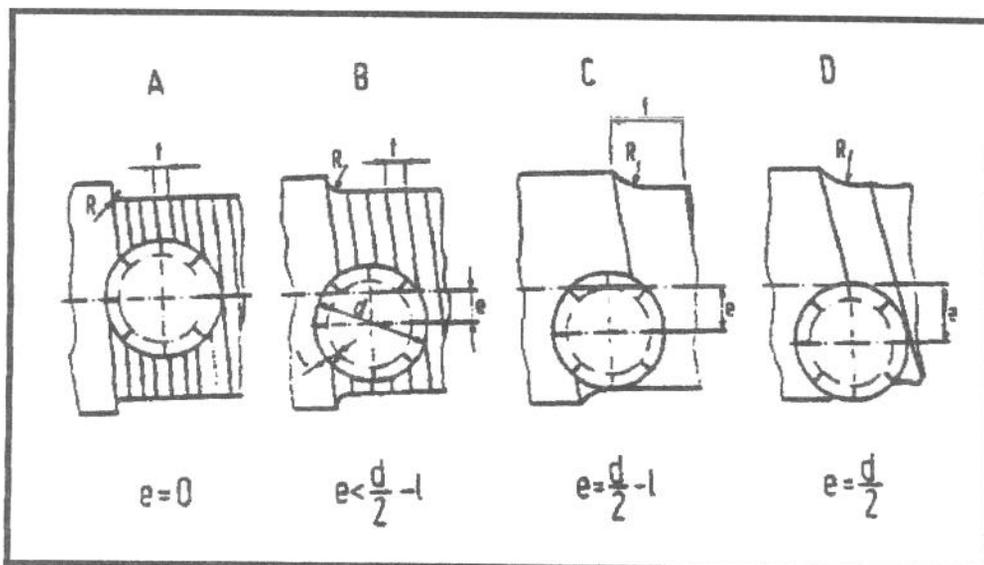
Enquanto o processo ortogonal é mais adequado para a usinagem externa, a disposição em paralelo possibilita a usinagem de superfícies internas e externas. É possível usinar aço temperado sem recorrer a qualquer refrigerante.

Neste processo, peças de simetria rotacional podem ser facilmente produzidas. Com o uso de cerâmica mista no corte de aço temperado (62 HRC) a vida da ferramenta excede à daquela utilizada em torneamento duro (Schulz, 1994).

Neste trabalho será focado o processo ortogonal de fresotorneamento, bem como as ferramentas de cerâmica e os requisitos básicos para que uma máquina-operatriz atenda bem as condições de usinagem em aço endurecido, objetivando o domínio da técnica do processo. O processo ortogonal foi escolhido por se tratar de um modelo simples de montagem, e pouco explorado.

2.2 Fresotorneamento ortogonal

Podem ser distinguidos um método centralizado e outro excêntrico dentro do processo ortogonal de fresotorneamento. Assim, os eixos ortogonais de rotação da peça e ferramenta podem ser centralizados ou ajustados verticalmente pelo valor "e" de excentricidade. Esta última variação é usada quando da usinagem de peças muito grandes, conforme figura 2.2.



Caso A - Ferramenta e peça com eixo de simetria coplanares, onde uma proporção grande entre nf/np , possibilita uma boa qualidade superficial, bem como altos avanços. Nesta configuração o máximo avanço é igual a menor aresta de corte.	
Caso B - Excentricidade $e < d/2 - l$. Nesta configuração o máximo avanço é igual a projeção da menor aresta de corte na peça.	
Caso C - Excentricidade $e = d/2 - l$. Caso em que a projeção da aresta de corte na peça é máxima, e portanto é a configuração que permite o maior avanço.	
Caso D - Excentricidade $e = d/2$. Possibilita avanço mínimo e abaixo deste valor não é possível produzir peças cilíndricas.	
Onde:	e = excentricidade entre os eixos de rotação da peça e ferramenta. f = avanço máximo possível para o valor de excentricidade estabelecido. R = raio gerado em função do avanço. d = diâmetro da ferramenta. l = comprimento da aresta principal de corte

Figura. - 2.2 - possibilidades de arranjo no fresotorneamento ortogonal (Schulz -1990).

2.2.1 - Fatores cinemáticos básicos

2.2.1.1 - Influência do desvio axial na qualidade de superfície.

Normalmente as arestas de uma fresa possuem tolerância de posicionamento das pastilhas nos seus respectivos alojamentos. Assim, ocorrem irregularidades na estrutura das superfícies. A geometria da superfície é gerada somente pela aresta de corte mais próxima da peça. Em ensaios realizados com fresas de dois dentes, o desvio de posicionamento axial relativo de um dente a outro, influencia a rugosidade, conforme figura 2.3(Schultz, H.et.al, 1994).

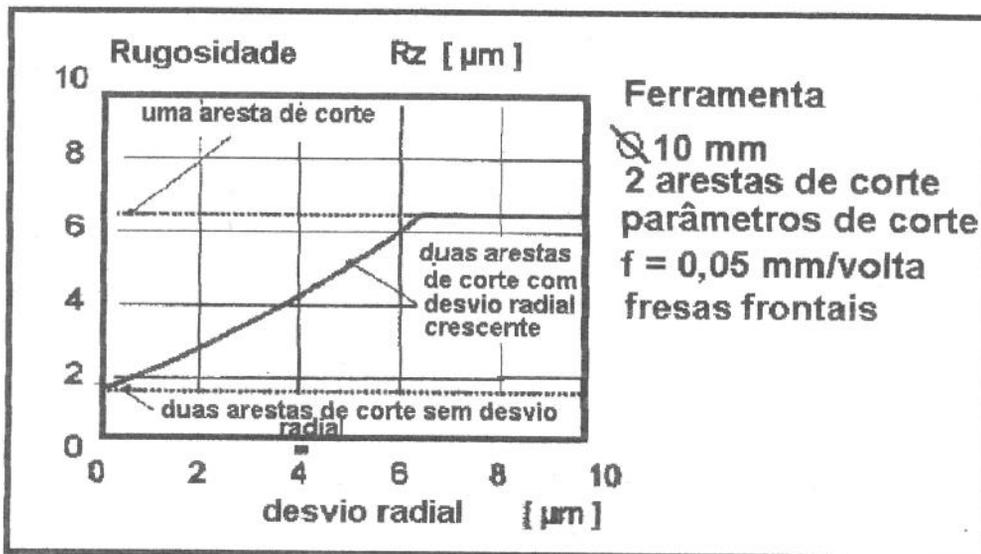


Figura. - 2.3 - Influência do desvio radial na qualidade de superfície (Schulz -1990).

A fase plana melhora a rugosidade da superfície, desde que a aresta esteja paralela com a superfície da peça e seu comprimento seja de 3 a 10 vezes o avanço por dente, se obtendo assim, acabamento melhor que aquele possível com pastilhas de ponta arredondada (Marcondes 1990)

2.2.1.2 - Influência da velocidade de corte no processo

A dureza da aresta de corte deve ser cerca de três vezes maior que a dureza da peça. (Nakayama, K. et al, 1988.). Isto implica que, para se usinar aços endurecidos deve se utilizar ferramentas de., tendendo a trincar em velocidades de corte similares às usadas pelo metal duro sem cobertura (As altas velocidades diminuem o atrito proporcionalmente, assim como favorecem a geração de altas temperaturas pela deformação do cavaco, facilitando sua deformação plástica e diminuindo a força de corte necessária.). Portanto, deve-se usar dureza elevada. Porém, tais ferramentas tem a desvantagem de serem frágeis (Ferraresi D., 1989) velocidades para a usinagem de aço endurecido em torno de 200 a 600 m/min., o que caracteriza a operação como usinagem em alta velocidade. (Schultz, H; Moriwaki, T, 1992)

A velocidade de corte v_c é determinada somente pela rotação da ferramenta. A rotação da peça associada ao movimento de avanço da ferramenta, gera o movimento circular de avanço. (Schultz, H. et. al, 1993).

As velocidades de corte que proporcionam uma vida econômica da ferramenta devem estar dentro de campos relativamente estreitos, pois para o corte de materiais duros as ferramentas empregadas são em sua maioria extremamente frágeis. Assim uma velocidade de corte excessivamente alta ocasiona o amolecimento do material da ferramenta diminuindo sua vida e uma velocidade de corte muito baixa confere um regime mais próximo do estático tendendo a danificar a ferramenta por quebra, figura 2.4 (Schulz, H. et. al, 1994).

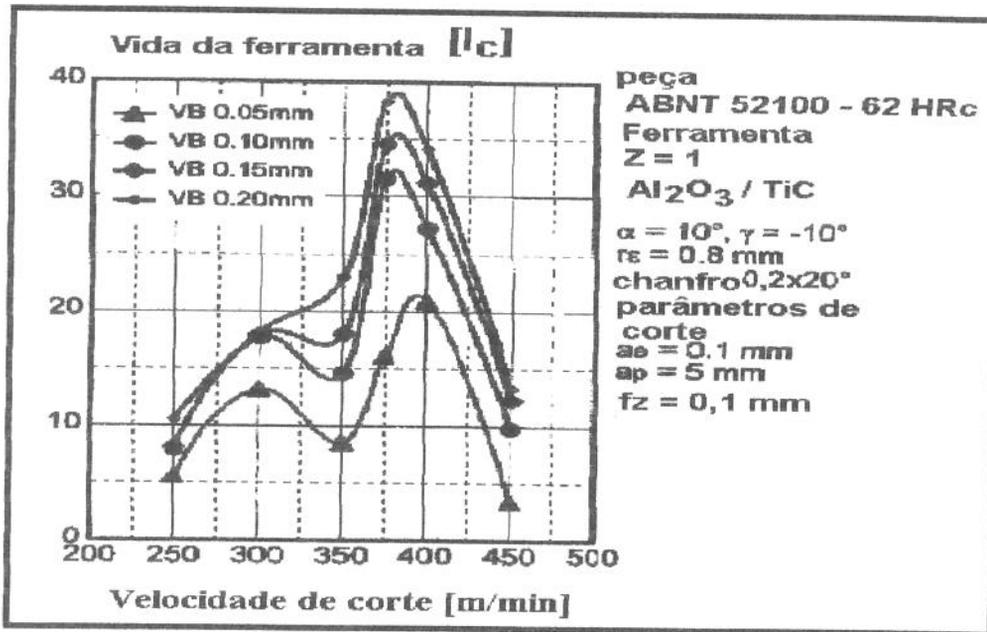


Figura. - 2.4 - Influência da velocidade de corte na vida da ferramenta no processo de fresotorneamento (Schulz -1994).

2.2.1.3 - Influência do avanço por dente na vida da ferramenta

Avanços pequenos por dente causam aumento do atrito e avanços maiores conduzem a tensões mecânicas maiores sobre a aresta de corte, devido ao aumento da espessura do cavaco. Assim, para uma otimização da vida da ferramenta, recomenda-se avanços por dentes entre 0,10 e 0,15 mm (Schultz,H.et.al, 1994).

2.2.1.4 - Mecanismo de formação do cavaco

O volume do material removido pelas arestas de corte primária e secundária depende de parâmetros estabelecidos: profundidade de usinagem, velocidade de avanço da ferramenta e frequência de rotações da peça e da ferramenta (Schulz, H., Daniel, A., 1993).

O volume do material removido pelas arestas de corte primária e secundária depende de parâmetros estabelecidos: profundidade de usinagem, velocidade de avanço da ferramenta e frequência de rotações da peça e da ferramenta (Schulz, H., Daniel, A., 1993).

A usinagem por fresotorneamento de aços temperados produz cavacos semelhantes a dentes de serra (König W., et al, 1993).

As observações de Schulz e equipe (Schulz, H; 1994) referentes à usinagem por fresotorneamento do aço 52100 mostram que os cavacos consistem principalmente de material básico não deformado com estrutura martensítica rígida, e com as lamelas simples conectadas entre si em uma estrutura tetragonal de martensita endurecida que está sendo formada durante a formação do cavaco. O material se acumula à frente da aresta de corte até que as crescentes tensões provocam uma fissura que se estende da peça em direção à aresta de corte. O material logo a frente da aresta de corte entra em regime de transformação plástica pelas tensões das altas pressões e pelas altas temperaturas.

O elevado atrito ocorrido durante a formação do cavaco aquece esse. Com espessuras mínimas eles se fundem e formam pequenas esferas, com diâmetros de alguns décimos de milímetro.

Com o aumento da profundidade de usinagem, ou com o aumento do avanço por dente, esta forma de cavaco vai desaparecer. Além disto, a fusão dos cavacos é influenciada pela geometria da aresta de corte e pelo material de corte. O cavaco com formato de esferas é mais frequentemente encontrado quando da usinagem com cerâmica mista com chanfros de proteção, não se formando frequentemente, quando se utiliza ferramentas de CBN. Mas mesmo assim, uma aresta de corte gasta pode provocar a fusão dos cavacos (Schultz,H.et.al, 1994.).

A formação de altas temperaturas na zona de transformação pode aquecer os cavacos até a sua temperatura de fusão. A peça e a ferramenta se aquecem moderadamente. Assim, as tensões térmicas nas zonas que delimitam o corpo da peça permanecem relativamente baixas, produzindo efeito positivo no tocante ao seu uso especialmente no caso de peças tratadas térmicamente (Konig W., et al, 1990).

A sobremedida relativamente baixa, utilizada na usinagem final de componentes, proporciona pressões pequenas na ferramenta. O rápido aquecimento da ferramenta e da peça durante o processo de usinagem, é seguido por uma fase demorada de diminuição da temperatura, e a temperatura máxima é mais baixa do que as máximas temperaturas em usinagem contínua. Assim, as velocidades de corte usadas em fresotorneamento necessariamente devem ser maiores do que aquelas usadas em usinagem contínua de materiais de alta dureza (Schulz,H.et.al, 1994.).

2.3 - Justificativas para o uso do fresotorneamento

O fresotorneamento pode ser justificado como sendo uma alternativa tecnicamente viável para a usinagem final de peças de alta dureza (maior que 58 HRc), devido às seguintes considerações:

- possibilita altas velocidades de corte, superando os fatores limitantes do torneamento e fresamento, como por exemplo a força centrípeta na placa e na ferramenta respectivamente (Schultz, H, 1990);
 - redução das forças de usinagem, melhorando a tolerância dimensional e geométrica, especialmente para peças de parede fina. Esta redução se dá devido ao fato dos atritos possuírem um comportamento mais dinâmico e portanto se tornam proporcionalmente menores. A alta deformação do cavaco produz energia tal que facilita sua deformação plástica e assim o corte (Schulz, H, 1990);
 - há pequenas oscilações de frequência no eixo árvore devido à baixa rotação da peça, possibilitando a usinagem de peças de parede fina, sem deformações por forças centrípetas (Schulz, H, 1990);
 - o corte intermitente produz a formação de um cavaco curto, assim durante o processo de fresotorneamento os cavacos são formados com volume constante e podem ser retirados da máquina por processo automatizado (Schulz,H.et.al, 1994);
-

- as altas velocidades de corte não permitem que haja tempo hábil para que a energia liberada pela deformação do cavaco possa ser transportada, assim, as tensões térmicas nas zonas que delimitam o corpo da peça permanecem relativamente baixas, produzindo efeito positivo no tocante ao nível de deformações na peça, especialmente para peças tratadas térmicamente, que poderão ser usinadas sem o uso de fluido refrigerante (König W., et al, 1990) ;
 - o corte intermitente produz a formação de um cavaco curto, assim durante o processo de fresotorneamento os cavacos são formados com volume constante e podem ser retirados da máquina por processo automatizado (Schulz,H.et.al, 1994) ;
 - a peça pode completar a sua usinagem pelos diferentes processos. Isto possibilita a usinagem multilateral (por exemplo, pode-se travar a arvore do torno e efetuar um fresamento sem a necessidade de se soltar a peça.), evitando falhas de locação e fixação (Schulz,H.et.al, 1994) ;
 - possibilita alcançar rugosidades da ordem de $Rz = 0,5 \mu m$ e qualidade de trabalho IT 4 (Schulz,H.et.al, 1994.) ;
 - a máxima temperatura é mais baixa que as máximas temperaturas em usinagem contínua. Assim, as velocidades de corte usadas em fresotorneamento necessariamente devem ser maiores do que aquelas usadas em usinagem dura (Schulz,H.et.al, 1994.) ;
 - possibilita usinar peças com dureza superficial de até 62 HRC (König W., et al, 1990) ;
 - possibilita diminuir tempos de usinagem (König W., et al, 1990) ;
 - possibilita substituir a operação de retificação, principalmente em condições limitantes, como peças de parede fina e/ou tratadas termicamente (König W., et al, 1990) ;
 - possibilita eliminar etapas de fabricação e assim aumentar produtividade: (König W., et al, 1990) ;
 - a combinação de alta rotação da fresa com baixa rotação da peça pode possibilitar a otimização da velocidade efetiva de corte, tanto para peças grandes e desproporcionais , como para peças de pequeno diâmetro (König W., et al, 1990) ;
-

Capítulo III : FERRAMENTAS CERÂMICAS

3.1 - Generalidades

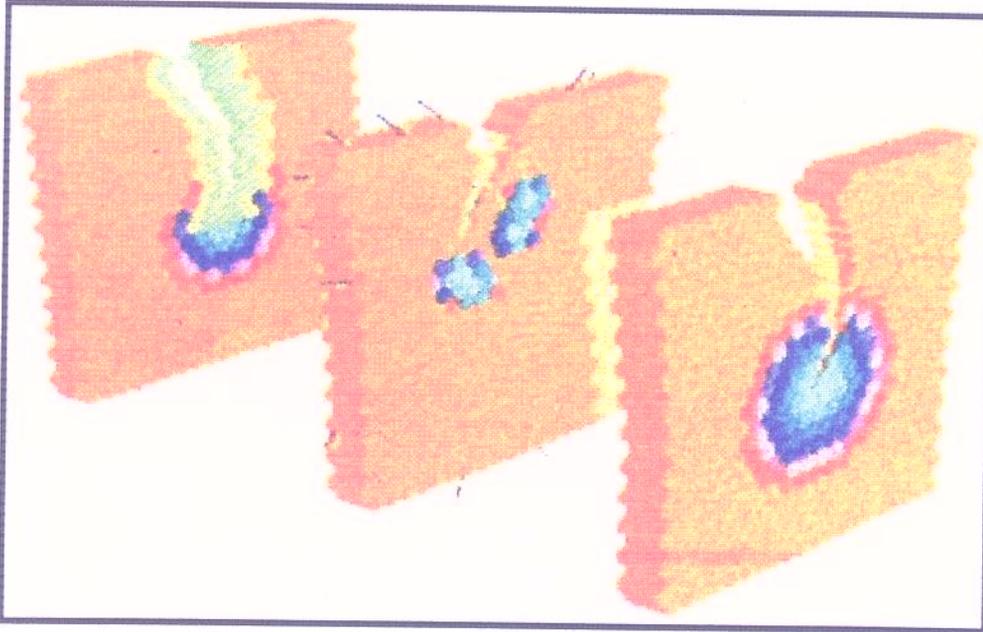
A fragilidade da cerâmica, conhecida desde a antiguidade, ainda não foi resolvida apesar de toda a tecnologia do século XX. Quando os átomos dos materiais cerâmicos são comprimidos em cristais rígidos, resistem a altas temperaturas e a abrasão, mas esta rigidez torna a cerâmica quebradiça. Hoje há cerâmicas reforçadas, onde fibras absorvem e desviam parte da energia da trinca, reduzindo sua pressão.

A era da cerâmica de alta tecnologia começou a quase meio século, quando motores e turbinas de carros e aviões passaram a exigir isolantes mais avançados para suas velas de ignição. Assim foi desenvolvido o óxido de alumínio, uma substância que pode ser moldada e comprimida a temperaturas elevadas.

Atualmente as cerâmicas ganharam destaque no mundo científico em função da corrida pelos pesquisadores do mundo todo para se conseguir fabricar supercondutores que tivessem resistividade muito próximo de zero à temperatura do nitrogênio líquido, o que tornaria o processo economicamente viável, tendo como base a cerâmica.

Paralelamente às pesquisas de supercondutividade, vários produtos vem sendo produzidos com cerâmica, como as placas de revestimento do nariz dos ônibus espaciais, coletes a prova de projéteis, implantes dentários, próteses de juntas ósseas, pastilhas de microprocessadores, tesouras, esferas de canetas hidrográficas, pistões, cilindros e válvulas de motores de combustão interna, e ferramentas de corte entre outros (Friedel, R, 1995).

A figura 3.1, mostra o comportamento de novos compostos cerâmicos.



A imagem em primeiro plano mostra como um pequeno defeito se transforma em uma trinca e desenvolve um padrão circular de pressão. Numa cerâmica reforçada, no centro, fibras absorvem e desviam parte da energia da trinca, reduzindo sua pressão. Na cerâmica do plano de fundo, dois tipos de cristais são usados para controlar os danos: quando a trinca aumenta um dos cristais começa a se expandir e sob pressão, fecha o trincado.

Fig. - 3.1 - Novos compostos cerâmicos e seus comportamentos (Friedel, R, 1995).

A proporção de pastilhas de cerâmica utilizadas nos processos de usinagem encontra-se, atualmente entre 2% e 10%. No que diz respeito ao volume total usinado, a proporção é consideravelmente maior, pois o número de peças usinadas por aresta é significativamente maior que os carbets. Tempos de usinagem curtos, conjugados à longa vida da ferramenta e, portanto, altas quantidades por vida, são valores inerentes à capacidade de desempenho das ferramentas de corte de cerâmica. (Marcondes 1990).

3.2 - Definição e Classificação dos Materiais de Corte

Ferramentas de corte compostas de materiais cerâmicos são formadas por compressão, definidas por materiais não-metálicos e inorgânicos e se enquadram na classificação dos óxidos, nitretos e carbeto com elementos metálicos ou semi-metálicos. Em termos gerais, os óxidos, carbeto e nitretos prestam-se particularmente ao uso como materiais de corte por possuírem notável grau de dureza, excelente estabilidade química, alta resistência à abrasão e alta resistência à compressão em temperaturas em torno de 1000 °C, conforme fig 3.2.

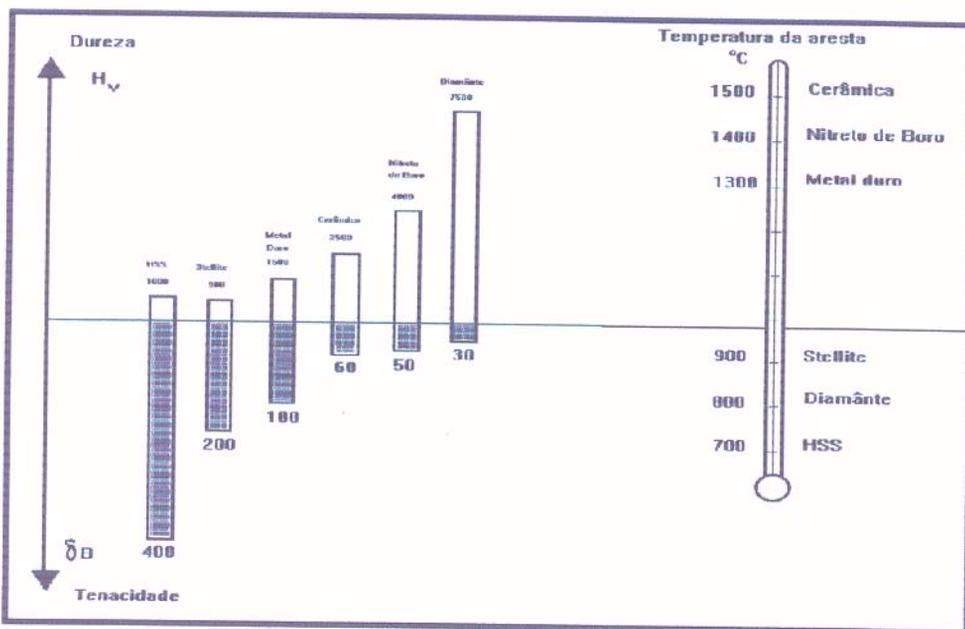


fig. - 3.2 - Dureza, tenacidade e temperatura máxima de corte dos vários materiais para construção de ferramentas de corte (Marcondes, 1990).

Dada a ampla diversificação de suas condições de aplicação, os materiais de corte foram ainda desenvolvidos, passando de materiais de fase simples para combinação de materiais multifásicos através de técnicas de formação de ligas

Através da exploração de possibilidades de formação de ligas é possível se obter combinações dentro da classificação principal dos óxidos, nitretos e carbetos, bem como combinações de componentes a partir da mistura de classificação de materiais. Foram desenvolvidos sistemas binários e ternários bem como materiais de fase simples.

Os materiais cerâmicos estão divididos em dois grandes grupos. Essa divisão é feita em função do material empregado como matriz: alumina (Al_2O_3) ou nitreto de silício (Si_3N_4), que por sua vez são subdivididos. Os materiais desses subgrupos diferem entre si, pela composição química, pelo processo de fabricação e propriedades.

3.2.1 - Pastilhas de cerâmica a base de alumina

A alumina foi considerada viável para a aplicação em usinagem por volta de 1905. As primeiras patentes surgiram por volta de 1912 na Alemanha e Inglaterra. Entretanto, devido à sua baixa tenacidade e baixa condutividade térmica, a alumina foi descartada como produto comercial. Porém, durante a segunda guerra, devido ao alto valor do tungstênio, a alumina recebeu novamente atenção. Essas ferramentas comercialmente conhecidas como cerâmica branca ou cerâmica pura, ainda tinham uma baixa aceitação no mercado (Baldoni,D.H.,et al, 1988).

Um grande número de pesquisas vem sendo realizado sobre as cerâmicas a base de alumina, com consequentes bons resultados. Insetos constituídos puramente de alumina não são mais comercializados. Atualmente encontram-se no mercado a cerâmica mista, a cerâmica óxida e a cerâmica reforçada com whiskers.

3.2.1.1 - Cerâmica mista

Compostos à base de alumina contendo 25 a 40% de carbetto de titânio em volume, como uma segunda fase dispersa na matriz de alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), conhecido também como cerâmica preta. Uma composição mais recente (~1983), contém aproximadamente 23% em peso de nitreto de titânio (TiN) mais TiC , disperso na matriz de alumina. Esse material é de cor marrom escuro (Jack., D. H,1986).

3.2.1.2 - Cerâmica óxida

Composto de alumina (Al_2O_3) mais zircônia (ZrO_2), surgiu por volta de 1980, visando expandir a faixa de aplicação para usinagem de aços. A quantidade de partículas de zircônia tetragonal dispersa na matriz de alumina varia de 10 a 40%. Esse tipo de pastilha é de cor branca e é comercialmente conhecida como cerâmica óxida (Jack., D. H,1986).

3.2.1.3 - Alumina reforçada com whiskers

Materiais mais recentes para ferramenta de corte, a alumina é reforçada com whiskers de carbetto de silício ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$). Whiskers nesse caso são cilindros monocristalinos de SiC e são caracterizados pelo comprimento L e diâmetro D , sendo L/D a taxa de forma. D varia de 0.05 a 10 μm , dependendo do fabricante. O volume de whiskers presente no composto varia de 20 a 40% nos produtos comerciais. As pastilhas de ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$) têm cor verde claro (Vigneau, J. et al,1987).

3.2.2 - Pastilhas de cerâmica à base de nitreto de silício

O nitreto de silício, Si_3N_4 , foi um dos primeiros nitretos a serem isolados, tendo sido produzido e caracterizado em 1884, mas somente em 1955 é que suas propriedades térmicas, químicas e mecânicas foram notadas e o interesse por ele foi renovado. Existem duas formas do nitreto de silício α e β . A forma β , tendo em vista as propriedades mecânicas, é mais vantajosa, por causa de sua microestrutura fibrosa, que aumenta a resistência e a dureza. A forma α é transformada irreversivelmente para a forma β sob temperaturas maiores que 1500 °C. O nitreto de silício foi comercializado pela primeira vez pela Ford Motor Co., com o nome de S-8, em 1983 (Sorrel, C.C., Mc Cartney, 1986).

3.2.2.1 - SIALON

Trabalhando independentemente, pesquisadores japoneses e ingleses descobriram que o alumínio e o oxigênio podem entrar na rede do nitreto de silício sem afetar sua estrutura. Eles observaram ainda que essa nova estrutura tinha propriedades físico-mecânicas similares às do nitreto de silício β . Essa solução sólida é conhecida como SIALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$). A marca SYALON foi patenteada pela Lucas Cookson Syalon (Sorrel, C.C., Mc Cartney, 1986).

Alem de ser mais baratos, as pastilhas de SIALON (**Silício**, **Alumínio**, **Oxigênio** e **Nitrogênio**) apresentam algumas vantagens em relação ao nitreto de silício convencional (Si_3N_4), as quais:

- maior resistência à oxidação
 - maior resistência às reações químicas
 - maior resistência ao desgaste por abrasão
 - mais fácil de ser fabricado.
-

3.3. - Propriedades

3.3.1 - Estabilidade Química

O Al_2O_3 possui a maior resistência ao desgaste dentre as ferramentas de usinagem, com a ligação mais estável. Na extremidade inferior da escala, encontram-se os carbeto, o carbeto de tungstênio e o carbeto de titânio, que são, assim, relativamente pouco resistentes à oxidação. O Si_3N_4 ocupa uma posição intermediária e pode ter sua estabilidade química melhorada através da introdução de alumínio e oxigênio na estrutura Si_3N_4 , a fim de formar os cristais mistos β -sialon. Os fenômenos de desgaste por difusão e formação de escamas não ocorrem com materiais de corte de cerâmica de Al_2O_3 , mas podem ser cada vez mais observados no espectro dos materiais de corte, até chegar aos metais mais duros.

O aumento da temperatura de corte causado pelo aumento da velocidade, tende a implementar a ocorrência de fenômenos, entre a peça e a ferramenta, tais como a difusão.

As cerâmicas mistas apresentam uma baixa afinidade com o ferro, devido à pequena solubilidade do carbeto de tungstênio, sendo 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, oxidação e dissolução química (N. Narutaki, et al, 1993.).

A alumina é o aditivo ideal para as pastilhas de cerâmica devido à sua inatividade química (Komanduri, R;Samanta, K; 1989). As pastilhas a base de nitreto de silício e alumina reforçada com whiskers são as mais reativas com o cobalto e com o ferro (Billman, E.R.;et al; 1988.). A reatividade do carbeto de silício com materiais ferrosos parece ser a razão pela qual os insertos de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ w possuem baixo desempenho em aplicações com aços endurecidos, onde o desgaste predominante é o desgaste de cratera (Costa, D.D., 1993).

3.3.2 - Resistência/Tenacidade

Os dados, limite de resistência à tração, módulo de elasticidade, ductilidade à fratura e energia de fratura, são muito diferentes de um grupo de materiais de corte para outro. A observação isolada de tais parâmetros individuais não indica uma avaliação do comportamento típico do material de corte. Somente é possível se fazer uma avaliação significativa relacionando-se os valores dos materiais aos dados do desempenho. O comportamento do material de corte sob altas temperaturas também é um fator decisivo na utilização no processo de remoção de cavacos.

As cerâmicas geralmente falham por fratura frágil. A ruptura ocorre devido à propagação catastrófica de um defeito (trinca), quando sujeito a tensões suficientemente altas.

As pastilhas de cerâmica apresentam alta resistência à compressão, que varia muito pouco com a variação da temperatura (Bhattacharyya, S.K.; 1981).

3.3.3. - Dureza

A dureza é, naturalmente, de grande importância para a estabilidade de corte da ferramenta.

Em geral, os materiais de corte de cerâmica são, sob este aspecto superiores aos metais duros, especialmente a temperaturas elevadas. A máxima temperatura de usinagem a que a cerâmica pode ser submetida é de aproximadamente 1500 °C (Marcondes, 1990.).

A dureza da aresta de corte deve ser geralmente, três vezes maior que a dureza da peça. Logo, para tornear aços com dureza superior a 60 HRc (~760 Hv), seria necessário uma ferramenta com dureza maior que 2200 Hv. Das pastilhas de cerâmica, as que apresentam maior dureza, a temperatura ambiente, são as baseadas em alumina reforçadas com whiskers (2000 Hv) e a cerâmica mista (2200 Hv) (Nakayama, K. et al, 1988.).

Porém, o fato de algumas pastilhas de cerâmica não apresentarem dureza a temperatura ambiente ideal, não deve ser considerado isoladamente, pois a dureza a quente do material da ferramenta e da peça, variam de acordo com o par ferramenta-peça. (Costa, D.D., 1993).

A tabela 3.1 mostra a dureza dos principais materiais cerâmicos, usados como ferramentas de corte

Tabela 3.1 - Dureza dos principais materiais cerâmicos, usados como ferramentas de corte

material de corte	dureza [HV]
$Al_2O_3 + TiC$ - Cerâmica Mista	4,5
$Al_2O_3 + ZrO_2$ - Cerâmica Óxida	5,3
Si_3N_4 - Nitreto de Silício	7,0

3.3.4. - Resistência ao Desgaste

Existem dois grupos de materiais, independentes do valor da dureza que devem ser distinguidos e que influenciam diferentemente sobre a deterioração da ferramenta, quais sejam (König, W.et al, 1990) :

- a) materiais ferrosos que são endurecidos por transformação martensítica.
 - b) materiais ferrosos que são endurecidos por precipitação de carbeto.
-

No grupo a) estão inclusos tipicamente os aços usados para cementação. Neste caso, a elevada temperatura gerada durante o corte deforma a matriz como um todo, e a difusão, dependendo do material da ferramenta, passa a ser o mecanismo de desgaste predominante. A difusão ocorre principalmente na interface cavaco-ferramenta, sendo preponderante o desgaste de cratera. Em temperaturas mais baixas, o mecanismo predominante passa a ser a abrasão.

O material do grupo b) apresenta alta concentração de carbeto distribuídos na matriz. Durante o corte, a elevada temperatura gerada deforma a matriz, deixando os carbeto intactos. A agressividade dos carbeto é dessa forma mantida. O mecanismo de desgaste por abrasão é assim bastante significativo.

Apesar das muitas opções, a quantificação dos fenômenos de desgaste permanece problemática. Um critério freqüentemente aplicado é a conjunção da ductilidade à fratura, dureza e módulo "E". O alto índice de dureza, em combinação com alta ductilidade à fratura, são fatores decisivos na resistência ao desgaste.

Um módulo "E" baixo confere menores concentrações locais de tensões do que um módulo "E" elevado.

O desgaste por abrasão apresenta-se normalmente como o fenômeno predominante nos processos de usinagem convencionais. Já em processos de corte com cerâmica o desgaste por abrasão apresenta-se somente como mais um dos fatores a serem considerados.

A maior parte do desgaste de cratera, usinando aço-carbono a altas velocidades de corte é devido à oxidação do material da ferramenta. No caso de ferramentas cerâmicas, a oxidação dos materiais da ferramenta podem ser ignorados, desde que as ferramentas sejam óxidas. Por outro lado, os óxidos do cavaco (FeO) que serão oxidados pelo ar durante o tempo de corte ao ar, tem uma grande tendência a reagir com as cerâmicas com SiC. (Narutaki, N., 1991).

O desgaste por difusão é predominante nos processos a alta velocidade.

O uso de nitreto de silício na usinagem de aço é limitado. Cerâmicas de nitreto de silício contem fases de baixo ponto de fusão que são liquidadas na temperatura de sinterização. O líquido se solidifica para uma fase vitrificada aglomerando de forma coesa os cristais de Si_3N_4 de granulação fina. O enfraquecimento desta fase de fronteira dos grãos começa a cerca de 900 °C. O desenvolvimento de tal temperatura no processo de usinagem, reduz a resistência de coesão dos grãos de Si_3N_4 , deste modo pode ocorrer a remoção destes grãos pelo fluxo de cavaco (Tönshoff, H.K., Denkena, B., 1991).

3.3.5. - Flutuação da Resistência à Tensão Térmica

A flutuação da resistência à tensão térmica ocorre com operações de corte interrompidas (por exemplo, no fresamento) e quando se realiza a usinagem com fluido refrigerante, o que, dependendo dos dados do material de corte, resulta na variação do comportamento operacional.

A resistência ao choque térmico é inversamente proporcional ao coeficiente de expansão térmica e diretamente proporcional à condutibilidade térmica. Alterações bruscas de temperatura, de corte interrompido, ou o uso ininterrupto de fluido refrigerante pode causar fraturas nos insertos cerâmicos. Os insertos a base de nitreto de silício (Si_3N_4), são os mais resistentes ao choque térmico, devido à sua boa condutividade térmica e baixo coeficiente de expansão.

3.4 - Características das ferramentas

Para se obter qualidade e produtividade através do processo de usinagem de materiais endurecidos, faz-se necessário a utilização de ferramentas de corte confeccionados com materiais que devem atender requisitos relacionados a seguir (Costa, D.D., 1993):

- alta dureza à temperatura ambiente;
- alta resistência à ruptura transversal (maior que 390 N/mm^2);
- alta tenacidade à fratura;
- alta resistência à compressão;
- alta resistência ao choque térmico, e
- alta resistência a reações químicas.

3.5. - Exigências do processo de usinagem para aços endurecidos, quanto às ferramentas

O projeto de ferramentas de corte para processos de usinagem, em aços endurecidos devem considerar basicamente quatro critérios como seguem:

- 1. Tipo do material cortante
- 2. A geometria da aresta de corte
- 3. O projeto da ferramenta
- 4. A interface ferramenta/eixo árvore

3.6. - Utilização de materiais cerâmicos no fresamento.

Fresamento em altas velocidades tem se tornado muito importante nesses últimos anos. Esta tendência é confirmada pelo rápido aumento no número de máquinas aptas para usinagem à altas velocidades de corte. (Schulz , H.;Scherer, J., 1989):

A aplicação de ferramentas de corte de cerâmica ao fresamento depende em grande parte :

- da rigidez das máquinas disponíveis e da operação envolvida;
- da estabilidade e comportamento da ressonância da peça a ser usinada;
- da fixação viável da peça a ser usinada;
- da estabilidade e comportamento de ressonância da árvore da fresadora e da máquina como um todo, e
- do acerto da velocidade de corte e do avanço por dente à peça a ser usinada

3.7. - Recomendações para o uso de insertos de cerâmica quanto à geometria.

Ângulo de saída

Comumente usa-se valores negativos. A geometria negativa coloca a ponta da ferramenta sob ação de compressão e elimina a formação de trincas devido à tração. Quando possível, usa-se aresta de corte chanfradas como medida de proteção (Ezugwu, E.O.; et al; 1987).

Ângulo de folga

O ângulo de folga se torna importante quando o desgaste predominante da ferramenta ocorre na superfície de folga (VB). Deve ser suficientemente grande para evitar o atrito entre a ferramenta e a peça, porém não deve ser exagerado a ponto de enfraquecer a aresta de corte (Ezugwu, E.O.; et al; 1987).

Ângulo de posição

O fator limitante é a geometria da peça. Para pastilhas cerâmicas, os fabricantes fornecem porta-ferramentas internos e externos, com ângulos variando entre 45 a 107⁰ (Costa, D.D., 1993).

Ângulo de ponta

Sempre que possível, deve-se utilizar ângulos de pontas grandes para tornar as ferramentas mais robustas, e também insertos de formas quadradas ou redondas (König W., et al; 1984.)

3.8 - Início e término do corte com pastilhas de cerâmica

Alguns cuidados devem ser tomados no início e término do corte. No início do corte deve-se realizar um pré-chanfro para corrigir os desvios radial e axial da peça bruta. O ângulo desse chanfro não deve coincidir com o ângulo de posição da ferramenta.

No término do corte, deve-se evitar o término brusco, que pode causar a quebra do inserto. Isto pode ser feito através do chanframento da peça ou em alguns casos, através da redução drástica do avanço.

3.9 - PCBN como material de corte.

Em 1957, foi produzido o CBN (Nitreto de Boro Cúbico), por pesquisadores da General Electric. (Wentorf, R.H.; 1957)

Os BN (Nitreto de Boro), exibem extensas regiões de homogeneidade, apresentando uma região sólida considerável, são mais frequentes na estrutura cúbica ou hexagonal, sendo a última altamente anisotrópica (Sorrel, C.C., 1986)

Os grãos monocristalinos de CBN são atualmente produzidos por sinterização (sob alta pressão), ou por deposição iônica sob vapor ou por dupla exposição iônica (Andoh, Y., et al; 1988 - Lin, W.L., et al; 1990 - Satou, M., et al; 1985), os quais são usados na produção de micro coberturas, empregadas como dielétricos, dissipadores de calor, proteção contra desgaste e calor. Porém tal tecnologia não é empregada para produzir grandes massas, como pastilhas para ferramentas de corte (Costa, D.D.; 1993)

Em 1972, foi produzido comercialmente o PCBN (Nitreto de Boro Cúbico Policristalino) (Sorrel, C.C., 1986)

Os grãos de CBN obtidos após a sinterização, são selecionados e então novamente sinterizados, obtendo-se uma grande massa policristalina (PCBN). Isso é necessário porque as pastilhas para as ferramentas de geometria definida requerem uma massa maior. Os produtos atualmente comercializados, possuem materiais como segunda fase, que podem ser um metal (geralmente o cobalto), um cerâmico (TiC ou TiN), ou o próprio Nitreto de Boro na forma hexagonal (Hibbs, L.E.; et al 1974 - Wentorf, R.H.; 1980)

3.9.1 - Propriedades

3.9.1.1 - Dureza

Dureza Mohs (capacidade de um material riscar outro)

$Al_2O_3 < CBN < Diamante\ monocristalino$ (Gardinier, C.F; 1988)

Dureza Knoop (grau de penetração de um material mais duro em outro)

$Diamante\ (7000\ kg/mm^2) > CBN\ (4700\ kg/mm^2)$ (Gardinier, C.F; 1988)

A dureza dos PCBN são inferiores as do CBN e aumentam de forma diretamente proporcional ao conteúdo de CBN (%) presente no mesmo (Wise, Mark; 1992)

A dureza a quente ($\cong 1000^\circ C$) do PCBN é superior a das pastilhas cerâmicas comerciais (Boehs, L; 1987).

3.9.1.2 - Tenacidade

A Tenacidade do PCBN é diretamente proporcional ao teor de CBN (Wise, Mark; 1992)

A tabela 3.2 mostra valores comparativos de tenacidade

Tabela 3.2 - Valores comparativos de tenacidade (Apostila SPK - Feldmühle; 1990 - Wise, Mark; 1992 - Wentorf, R.H.; 1980)

Material de corte	Tenacidade de ruptura - K_{IC} [$MPa \cdot m^{1/2}$]
$Al_2O_3 + ZrO_2$ - Cerâmica Óxida	5,3
$Al_2O_3 + TiC$ - Cerâmica Mista	4,5
Si_3N_4 - Nitreto de Silício	7,0
PCBN - (90 a 95 % CBN) [Wise, Mark; 1992]	10
20 % de HBN + 80 % de CBN [Wentorf, R.H.; 1980]	22

3.9.1.3 - Resistência ao choque térmico

Os PCBN com alto teor de CBN possuem alta resistência ao choque térmico. Porém para os PCBN com segunda fase de TiC ou TiN espera-se uma resistência inferior (Costa, D.D.; 1993).

3.9.1.4 - Resistência a reações químicas

Pôr não reagir com o ferro é indicado para usinagens em altas velocidades de materiais ferrosos

O BN presente no PCBN reage com o oxigênio em altas temperaturas, formando o óxido de boro, como uma película protetora que impede que a reação continue (Gardinier, C.F.; 1988)

3.9.2 - O PCBN no fresotorneamento.

As pesquisas sobre fresotorneamento são recentes (1988), para que se tenham respostas conclusivas a respeito de todas as variáveis do processo. Nos poucos trabalhos publicados, o PCBN obteve desempenho superior aos processos de torneamento de aços endurecidos (Schulz,H.et.al. - 1994)

Basicamente nas pesquisas da equipe de Darmstadt, coordenada pelo Prof. H. Schulz, o uso do PCBN alcançou resultados de vida maior que as cerâmicas bem como acabamento superior. Todavia o custo das pastilhas de PCBN é hoje significativamente superior ao das cerâmicas, assim há que se fazer um estudo de custo de usinagem, a fim de verificar a viabilidade econômica do processo.

Neste trabalho, como o objetivo foi o de se estudar o comportamento do processo de fresotorneamento mediante a mudança de parâmetros de usinagem, não se esgotou a vida da ferramenta em nenhum dos ensaios. Por esta razão foram usadas somente pastilhas de material cerâmico a base de Al_2O_3 , que possuem um desempenho similar, a um custo menor.

Capítulo IV : PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 - Materiais e equipamentos utilizados

Os corpos de prova, usados ao longo do ensaio, foram previamente manufaturados em um torno paralelo universal mecânico Romi S20. Usou-se, para isto, barras laminadas de aço ABNT 52100 (AISI 52100), 2 polegadas de ϕ , classificado como aço rolamento, para aplicações onde se necessite de têmpera profunda, tais como rolos, esferas, agulhas, e pistas internas e externas (Silva, A.L. e Mei, P.R., 1988).

Após a usinagem, os corpos de prova foram submetidos a tratamento térmico de têmpera e revenimento para a dureza de 60 HRC.

O material possui a composição química em porcentagem [%] (tabela 4.1) e características mecânicas a seguir (Certificado de qualidade Aços Villares S/A):

Tabela 4.1 - Composição química do aço VC52 (Aços Villares S/A)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
1,040	0,190	0,310	0,016	0,010	1,500	0,090	0,030	0,130	0,030

- coalescido
- usinabilidade 55% (referente ao SAE 1212 resulfurado que possui 100% de usinabilidade)
- Limite de resistência a tração 64 kgf/mm²
- Dureza 190 HB
- Limite de escoamento 40 kgf/mm²
- Estricção 65 %

A figura 4.1 mostra a geometria do corpo de prova, bem como suas dimensões em milímetros [mm].

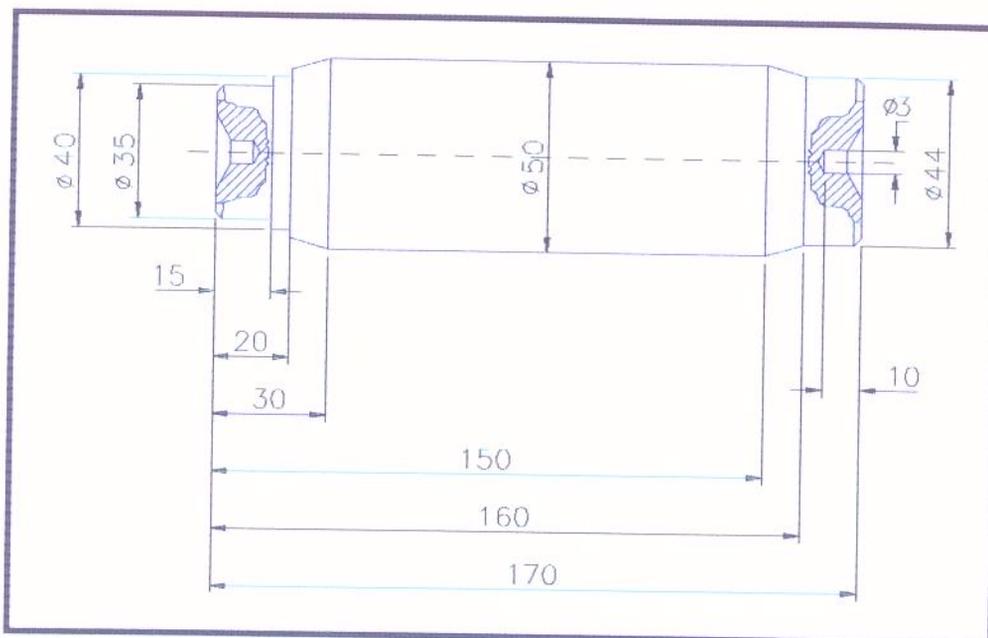


Figura 4.1 - Forma geométrica e dimensões do corpo de prova (sem escala)

Para a realização dos ensaios foram utilizadas pastilhas de cerâmica SPK - Feldmühle, com formas e tamanho SNGN 12 04 12 T 020 20, à base de óxido de alumínio com carbeto de titânio disperso na matriz (Al_2O_3 / TiC), e pastilhas Sandvik - Coromant, SNKN 12 04 ENN - CC690 (CC690 \Rightarrow qualidade Sandvik - Coromant), composta de nitreto de silício (Si_3N_4).

Para os ensaios foram utilizadas fresas comerciais, bem como fresas específicas para o processo. Para o último caso, procurou-se seguir as recomendações de Schulz (H. Schulz, T. Moriwaki, 1992), sendo que as ferramentas, foram então, projetadas e confeccionadas no Centro de Oficinas da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC). O material empregado para confeccionar as fresa foi aço ABNT 52100, temperado e revenido à 58 HRC

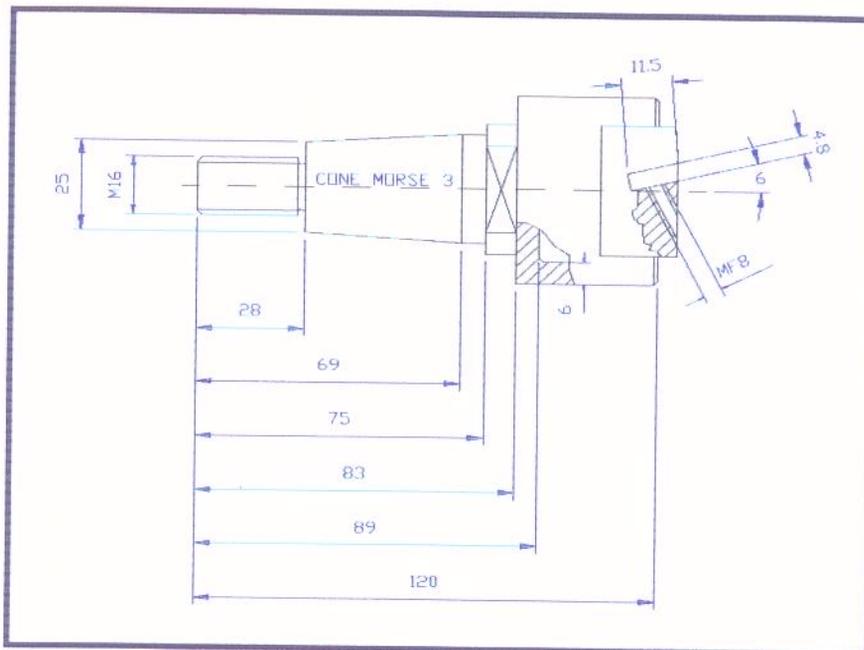
As fresas são duplo negativas, ou seja os ângulos de saída dorsal γ_p e de saída lateral γ_f são negativos. Neste tipo de fresa são usados pastilhas negativas, tornando-as adequadas à usinagem de materiais endurecidos ou que requeiram maior resistência ao impacto (Marcondes, 1990). Este tipo de locação da pastilha é exigência dos materiais cerâmicos, que desta forma trabalham sob compressão, situação em que são mais resistentes à fratura.

As características das fresas utilizadas estão apresentadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características geométricas das fresas

Procedência	ϕ [mm]	ângulo de saída [γ_0]	ângulo de inclinação [λ_s]	ângulo de posição [χ_r]	numero de arestas [Z]	Fixação
confeccionada	24	- 6°	- 4°	90°	1	cone morse nº 3
confeccionada	52	- 6°	- 4°	90°	1	cone morse nº 3
comercial (Sandvik)	100	- 7°	0°	90°	8	cone morse nº 3

O desenho das fresas projetadas especificamente para o processo de fresotorneamento esta mostrado na figura 4.2.



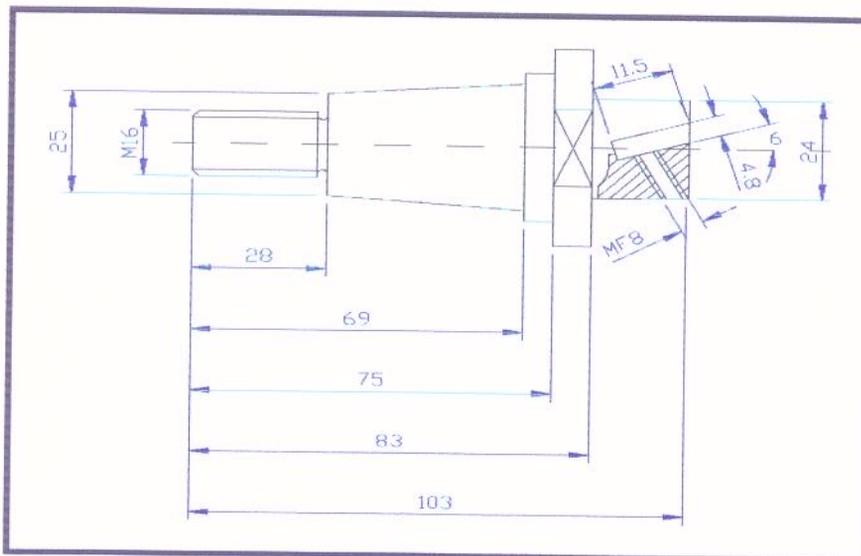


Figura 4.2 - Dimensões das fresas, projetadas especificamente para o processo de fresotorneamento, em milímetros (sem escala).

Os seguintes equipamentos foram utilizados:

◆ Torno ROMI CNC ECN 40 II com:

- Motor principal 15 cv.
- Motor de corrente contínua para o avanço longitudinal 1,1 cv.
- Motor de corrente contínua para o avanço transversal 1,1 cv.

◆ Cabeçote fresador adaptado de um cabeçote retificador, com:

- Motor balanceado dinamicamente ⇒ Potência $N = 7,2 \text{ kW}$
- Rotação $n = 3435 \text{ rpm}$
- Tensão $U = 220/330 \text{ V}$
- Corrente $I = 26/ 15,2 \text{ A}$
- Mancal com rolamentos axiais ⇒ Rotação crítica $n_{\text{máx.}} = 10.000 \text{ rpm}$

- ◆ Rugosímetro marca SURFTRONIC, de procedência Dinamarquesa sob licença de Rank Taylor Hobson, com as seguintes características:

- Capacidade 0,1 - 30 μm
- Comprimentos de amostragem Cut off \Rightarrow high (acima de 1 mm)
0,750 mm
0,250 mm
0,075 mm
- Resolução das escalas

fundo de escala [μm]	resolução [μm]
0,1	0,005
0,3	0,010
1	0,050
3	0,100
10	0,500
30	1,000

- Raio de ponta do apalpador = 0,01 mm
- Material do apalpador = diamante
- ◆ Durômetro, marca BRIRO, sob licença de Georg Reicherter.
 - Material do penetrador = diamante

4.2 - Metodologia dos ensaios realizados

O cabeçote fresador foi montado sobre o carro transversal do torno, de maneira que o centro do mancal ficasse perpendicular ao eixo árvore do torno, configurando assim, o fresotorneamento ortogonal. Da mesma maneira, os eixos da ferramenta e da peça eram coplanares, ou seja, a excentricidade "e" (vide item 2.2, figura 2.2) foi nula. As figura 4.3 a, 4.3 b e 4.3 c mostram o aspecto da montagem.



Figura 4.3 a - Aspecto do cabeçote fresador em usinagem

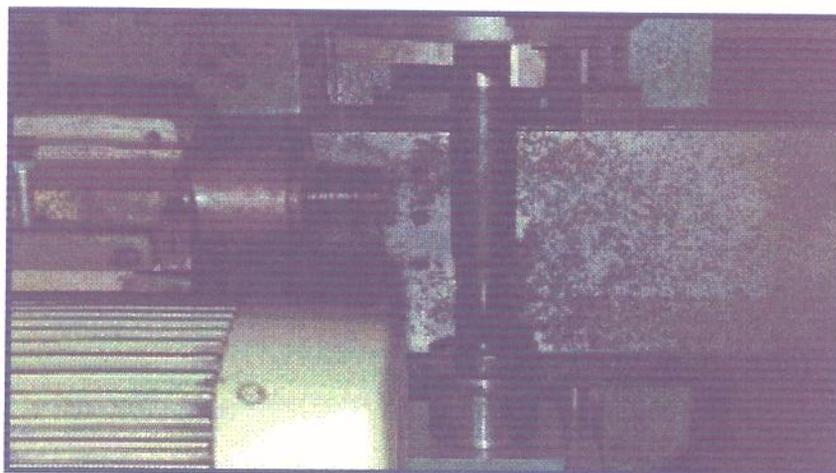


Figura 4.3 b - Aspecto da disposição ortogonal entre peça e ferramenta.

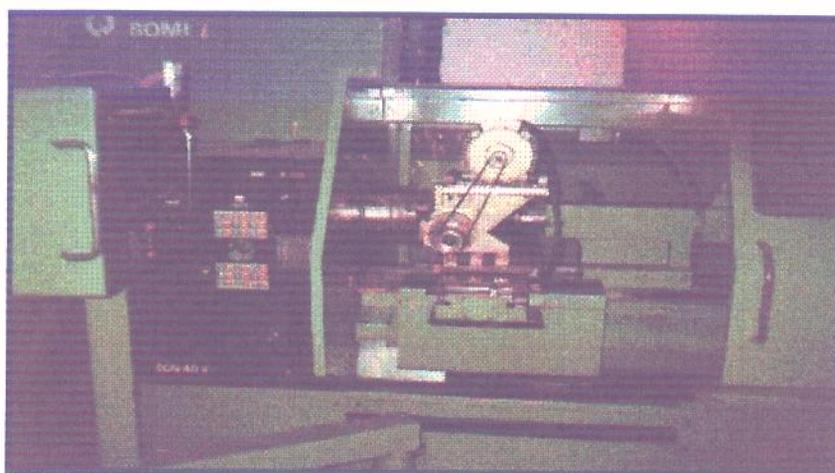


Figura 4.3 c - Aspecto da máquina com o cabeçote - fresador em usinagem

Os ensaios seguiram a seguinte sequência:

- ensaios preliminares.
- ensaios definitivos monitorando a rugosidade de superfície.

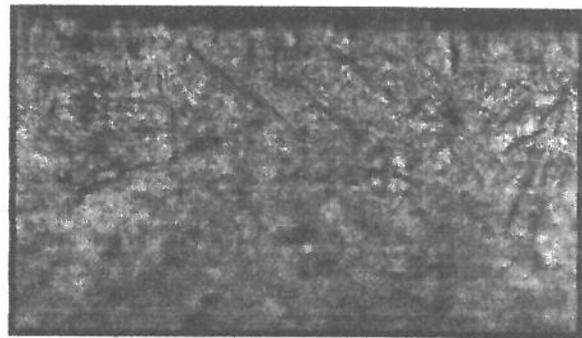
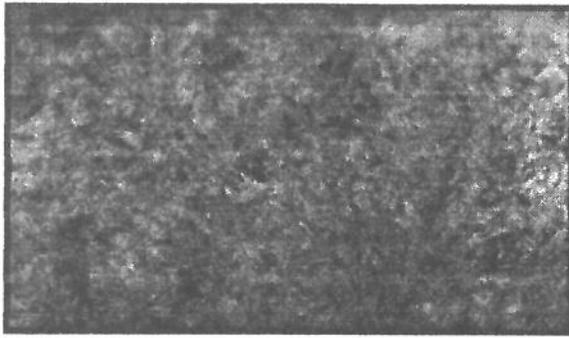
As condições dos ensaios foram as indicadas na tabela 4.3:

Tabela 4.3 - Condições dos ensaios realizados

Ensaio	Fresa	Parâmetros de corte	
Preliminar	Sandvik-Coromant	$l_f = 132 \text{ mm}$	$n_p = 300 \text{ RPM}$
	$\phi = 100 \text{ mm}$	$v_c = 2698 \text{ m/min}$	$n_f = 8587,5 \text{ RPM}$
	$Z = 8$	$a_p = 0,2 \text{ mm}$	concordante
	$\gamma_0 = -7^\circ$	$f = 0,15 \text{ mm/rot.}$	Dureza = 60 HRc
	pastilha - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCe Si}_3\text{N}_4$		Relação $n_f/n_p = 28,6$
Definitivo Ensaio 1	$\phi = 52 \text{ mm}$	$l_f = 50 \text{ mm}$	$n_p = 45 \text{ RPM}$
	$Z = 1$	$v_c = 553 \text{ m/min}$	$n_f = 3385 \text{ RPM}$
	$\gamma_0 = -6^\circ / \lambda_s = -4^\circ$	$a_p = 2 \text{ mm}$	concordante
	pastilha - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$	$f = 0,10 \text{ mm/rot.}$	Dureza = 60 HRc
			Relação $n_f/n_p = 37,6$
Definitivo Ensaio 2	$\phi = 52 \text{ mm}$	$l_f = 50 \text{ mm}$	$n_p = 90 \text{ RPM}$
	$Z = 1$	$v_c = 553 \text{ m/min}$	$n_f = 3385 \text{ RPM}$
	$\gamma_0 = -6^\circ / \lambda_s = -4^\circ$	$a_p = 0,25 \text{ mm}$	concordante
	pastilha - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$	$f = 0,25 \text{ mm/rot.}$	Dureza = 60 HRc
			Relação $n_f/n_p = 19,6$
Definitivo Ensaio 3	$\phi = 52 \text{ mm}$	$l_f = 50 \text{ mm}$	$n_p = 90 \text{ RPM}$
	$Z = 1$	$v_c = 288 \text{ m/min}$	$n_f = 1760 \text{ RPM}$
	$\gamma_0 = -6^\circ / \lambda_s = -4^\circ$	$a_p = 0,1 \text{ a } 2 \text{ mm}$	concordante
	pastilha - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$	$f = 0,12 \text{ mm/rot.}$	Dureza = 60 HRc
			Relação $n_f/n_p = 19,6$
Definitivo Ensaio 4	$\phi = 52 \text{ mm}$	$l_f = 50 \text{ mm}$	$n_p = 11,2 \text{ a } 850 \text{ RPM}$
	$Z = 1$	$v_c = 288 \text{ m/min}$	$n_f = 1760 \text{ RPM}$
	$\gamma_0 = -6^\circ / \lambda_s = -4^\circ$	$a_p = 0,2 \text{ mm}$	discordante
	pastilha - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$	$V_f = 10,8 \text{ mm/mim}$	Dureza = 60 HRc
			Relação $n_f/n_p = 157,1 \text{ a } 2,1$
Definitivo Ensaio 5	$\phi = 24 \text{ mm}$	$l_f = 50 \text{ mm}$	$n_p = 180 \text{ RPM}$
	$Z = 1$	$v_c = 309 \text{ m/min}$	$n_f = 4098,5 \text{ RPM}$
	$\gamma_0 = -6^\circ / \lambda_s = -4^\circ$	$a_p = 0,2 \text{ mm}$	discordante
	pastilha - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$	$V_f = 10,8 \text{ mm/mim}$	Dureza = 60 HRc
			Relação $n_f/n_p = 22,8$
Definitivo Ensaio 6	$\phi = 24 \text{ mm}$	$l_f = 50 \text{ mm}$	$n_p = 600 \text{ RPM}$
	$Z = 1$	$v_c = 309 \text{ m/min}$	$n_f = 4098,5 \text{ RPM}$
	$\gamma_0 = -6^\circ / \lambda_s = -4^\circ$	$a_p = 0,05 \text{ mm}$	discordante
	pastilha - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$	$f = 0,01 \text{ a } 0,1 \text{ mm/rot.}$	Dureza = 61 HRc
			Relação $n_f/n_p = 6,8$

A excessão dos ensaios preliminares, todos os pontos dos demais ensaios representam a média de cinco usinagens com os mesmos parâmetros, e a dureza das peças foi medida antes e depois dos ensaios.

A figura 4.4 mostra a estrutura metalográfica, com aumento de 400 X na superfície, antes e após usinagem. Das fotos pode-se constatar que não houve mudança de estrutura significativa se ambas apresentam estrutura martensítica em forma de agulhas com pequena porcentagem de austenita retida.



Aço rolamento ABNT 52100, submetido a tratamento térmico de têmpera e revenimento para a dureza de 60 - 61 HRC.

Peça usinada - Ensaio 1		
$\phi_{ferramenta} = 52 \text{ mm}$	$l_f = 50 \text{ mm}$	$n_p = 45 \text{ RPM}$
$Z = 1$	$v_c = 553 \text{ m/min}$	$n_f = 3385 \text{ RPM}$
$\gamma_0 = -6^\circ / \lambda_s = -4^\circ$	$a_p = 2 \text{ mm}$	concordante
pastilha - Al_2O_3/TiC	$f = 0,10 \text{ mm/rot.}$	Dureza = 60 HRC
		Relação $n_f/n_p = 37,6$

Figura 4.4 - Estrutura metalográfica na superfície antes e após usinagem.

4.2.1 - Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares foram conduzidos com uma ferramenta comercial (Sandvik, ϕ 100 mm, $Z = 8$) e dois tipos de pastilhas de cerâmica (Al_2O_3/TiC e Si_3N_4), objetivando verificar o comportamento do conjunto utilizado quanto à rigidez, campo de velocidade de corte que possibilitasse à ferramenta uma vida aceitável (em torno de 10 min) e comportamento da pastilha de cerâmica no processo de fresotorneamento, tendo em vista que os dados de catálogo são referentes ao processo de fresamento.

4.2.2 - Ensaios definitivos

Os ensaios definitivos foram conduzidos utilizando-se duas fresas com diâmetros de 52 e 24 mm, possuindo apenas um dente. As fresas foram construídas tendo um dente, visando eliminar possíveis influências do desvio axial (vide item 2.2.1.1, figura 2.3). Os ensaios foram conduzidos inicialmente, com a fresa de ϕ 52 mm e em vista dos resultados obtidos, projetou-se outra fresa com ϕ 24 mm.

Capítulo V : RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Ensaaios preliminares

Dos ensaios preliminares pode-se observar, para as condições do conjunto instalado:

- a fresa possuía massa demasiada para a velocidade de corte escolhida (v_c excessiva), gerando uma ondulação em formato de hélice, com um passo de aproximadamente 10 mm, na superfície usinada, resultado da vibração do conjunto;
 - a pastilha de Si_3N_4 sofreu um desgaste de cratera proporcionalmente maior que a pastilha de Al_2O_3 , provavelmente em função do desgaste por desprendimento dos grãos, conforme explicado por H.K.Tönshoff (item 3.3.4);
 - verificou-se que com o uso de 8 pastilhas, isolar resultados referentes a cada uma seria muito vulnerável a erros, assim adotou-se o procedimento do uso de apenas uma pastilha, apesar da literatura indicar que quanto maior o numero de arestas menor a rugosidade de superfície (vide item 2.2.1.1, figura 1.3), desde que o desvio radial seja o menor possível;
 - a dureza da peça não se alterou;
 - a temperatura do corpo de prova, imediatamente após a usinagem, permitiu a manipulação, mesmo sem o prévio uso de fluido refrigerante, conforme literatura (Konig W., et al, 1990, item 2.2.1.4), e;
 - o cavaco gerado tinha o aspecto de pó ou micro esferas da ordem de décimos de milímetros, devido à excessiva velocidade de corte que aquece este até a sua temperatura de fusão, conforme observado também por Schulz (Schulz,H.et.al, 1994 - item 2.2.1.4.).
-

5.2 - Ensaio definitivos

Os ensaios seguiram uma ordem cronológica, e à medida que se obteve benefícios em um ensaio, este foi repassado para o ensaio posterior, visando ao final, resultados melhores. Apesar dos ensaios possuírem ordem cronológica, não houve uma necessária dependência entre estes, sendo que alguns deles tiveram caráter observatório, de forma isolada.

5.2.1 - Ensaio 1

Com a ferramenta de 52 mm, utilizando-se dos parâmetros indicados na tabela 4.3 e para as condições do ensaio, observou-se que:

- a ondulação em forma de hélice na superfície diminuiu significativamente;
- o emprego de apenas uma pastilha facilitou o estudo do comportamento da usinagem;
- obteve-se uma rugosidade de superfície de $Ra\ 5\ \mu m$, em função da sobremedida ser demasiada para a rigidez do conjunto cabeçote-fresador. Esta sobremedida excessiva teve por objetivo verificar o comportamento do conjunto quanto à rigidez;
- optou-se por usinar um comprimento de avanço de 50 mm, o mais próximo da placa do torno, a fim de se melhorar a rigidez do corte.

5.2.2 - Ensaio 2

Neste ensaio foram alterados os seguintes parâmetros:

- a sobremedida foi reduzida em 8 vezes, a fim de beneficiar a rigidez e tornar o processo mais próximo do usual em usinagem de aços endurecidos, onde a máxima sobremedida removida não alcança o valor de 0,3 mm, sendo o usual entre 0,05 e 0,1 mm (Schulz, H; 1994);
-

- o avanço foi aumentado em 2,5 vezes, pois, o excessivo desgaste de flanco, fazia supor um atrito alto entre a ferramenta e a peça;
- a rotação foi dobrada a fim de se investigar o comportamento da peça quanto a rugosidade

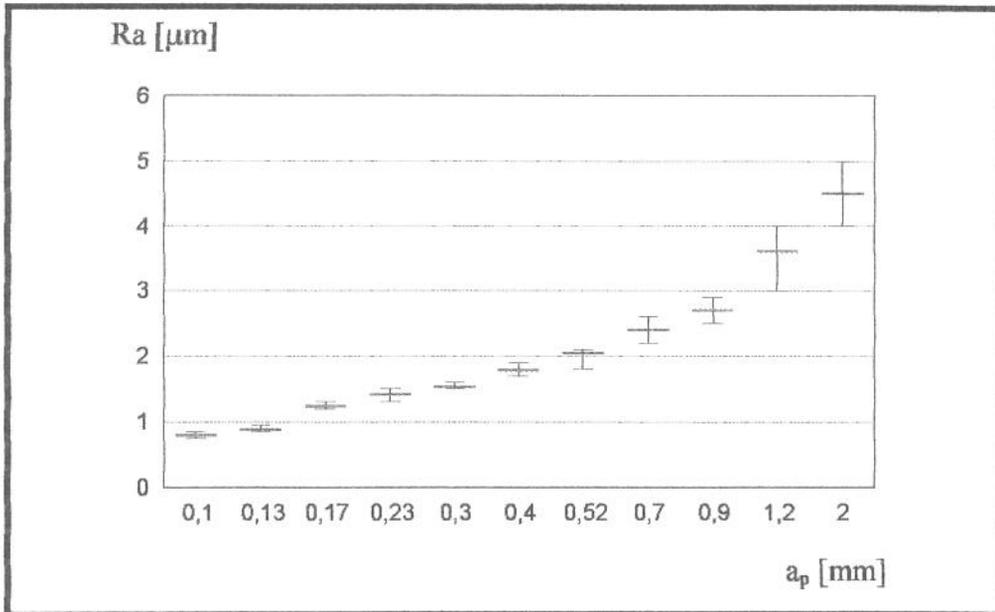
A rugosidade de superfície alcançada foi de Ra 3,8 μm ficando cerca de 31,6% mais baixa que o ensaio anterior e o desgaste de flanco diminuiu.

A mudança na rotação não permitiu observação conclusiva, assim posteriormente foram feitos ensaios alterando-se apenas este parâmetro.

5.2.3 - Ensaio 3

Este ensaio objetivou verificar o comportamento da rugosidade da superfície em função do aumento da profundidade de corte. Manteve-se os parâmetros do ensaio 2, alterando-se apenas a v_c e o avanço, a fim de se adequar ao recomendado pela literatura, para uma maior vida da ferramenta, pois no ensaio 2 apareceu uma craterização excessiva na pastilha.

A rugosidade da superfície aumentou de maneira aproximadamente linear até cerca de 0,4 mm de profundidade de corte. A partir deste ponto as características da curva mudaram, indicando um aumento substancial, o que leva a crer que até 0,4 mm a rugosidade é função predominantemente do processo e, a partir deste ponto passa a assumir características originadas principalmente da rigidez do cabeçote fresador (figura.5.1).



$\phi = 52$ mm	$l_f = 50$ mm	$n_p = 90$ RPM
$Z = 1$	$v_c = 288$ m/min	$n_f = 1760$ RPM
$\gamma_0 = -6^\circ / \lambda_s = -4^\circ$	$a_p = 0,1$ a 2 mm	concordante
pastilha - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$	$f = 0,12$ mm/rot.	Dureza = 60 HRc
		Relação $n_f/n_p = 19,6$

Figura 5.1 - Influência da profundidade de corte na rugosidade de superfície

5.2.4 - Ensaio 4

Neste ensaio foram alterados os parâmetros, sentido do movimento (discordante), a rotação da peça foi variável e a velocidade de avanço v_f foi mantida constante em 10,8 mm/min.

Para as condições utilizadas neste ensaio, observou-se que à medida que se aumentou a rotação, a rugosidade da superfície diminuiu (fig.5.2). Este resultado é observado provavelmente em função do aumento da velocidade efetiva de corte e contraria a literatura, que diz que uma proporção crescente n_f/n_p tende a melhorar a rugosidade (Schulz -1990 - item 2.2 - fig. - 2.2).

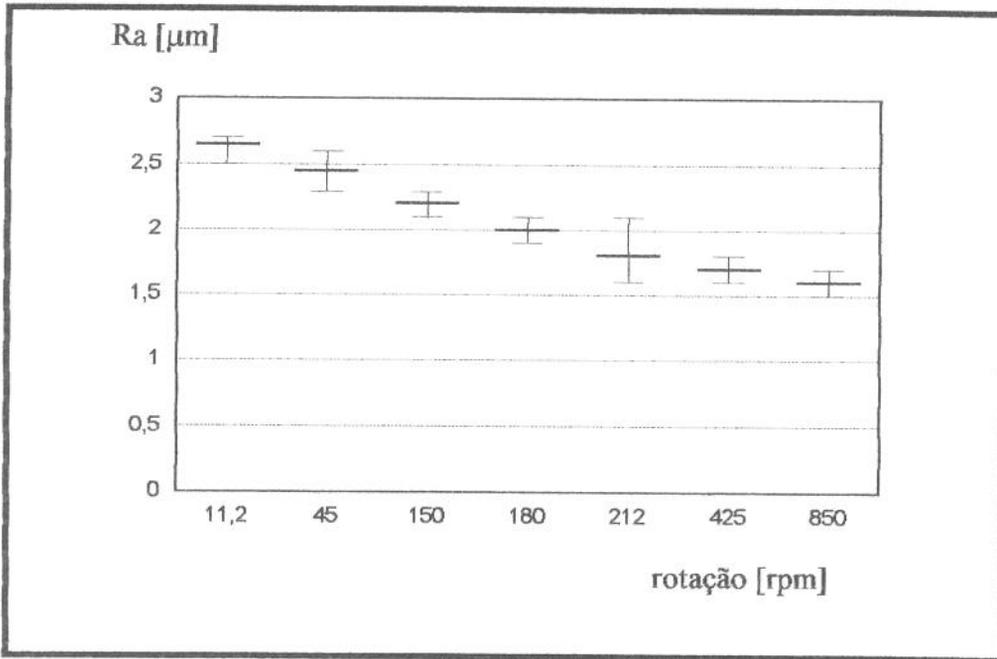
A velocidade de avanço foi mantida constante em função das baixas velocidades de rotação na peça, pois com avanço constante, os tempos de corte seriam muito altos. Foi usado $v_f = 10,8$ mm/min para ficar compatível com o avanço utilizado no ensaio anterior, uma vez que naquele caso, a v_f foi de 10,8 mm/min.

Optou-se pelo método discordante para se investigar o efeito deste movimento, uma vez que, no fresamento convencional, consegue-se melhores resultados (R_a menor) com o sentido concordante.

Tabela 5.1 - Efeito do método discordante

Ensaio	[f] - (mm/volta)	[a_p] - (mm)	[R_a] - (μm)
3	0.12	0,2	1,25 (interpolação)
4	0,12 ($V_f = 10,8$ a 90 RPM)	0,2	2,3 (interpolação)

A figura 5.1 mostra a influência da rotação da peça na rugosidade de superfície.



$\phi = 52$ mm	$l_f = 50$ mm	$n_p = 11,2$ a 850 RPM
$Z = 1$	$v_c = 288$ m/min	$n_f = 1760$ RPM
$\gamma_0 = -6^\circ / \lambda_s = -4^\circ$	$a_p = 0,2$ mm	discordante
pastilha - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$	$v_f = 10,8$ mm/min	Dureza = 60 HRc
		Relação $n_f/n_p = 157,1$ a 2,1

Figura 5.2 - Influência da rotação da peça na rugosidade de superfície

5.2.5 - Ensaio 5

Para as mesmas condições do ensaio anterior se alterou apenas o diâmetro da ferramenta, a fim de se verificar o comportamento da rugosidade da superfície. A velocidade de corte foi alterada em 7% apenas, em função do jogo de polias disponível. A rotação da peça neste caso foi de 180 rpm. Observou-se, que o diâmetro da ferramenta tem um relação direta com a rugosidade da superfície. Com o decréscimo do diâmetro da ferramenta em 117% a rugosidade de superfície decresce em valor de 17%.

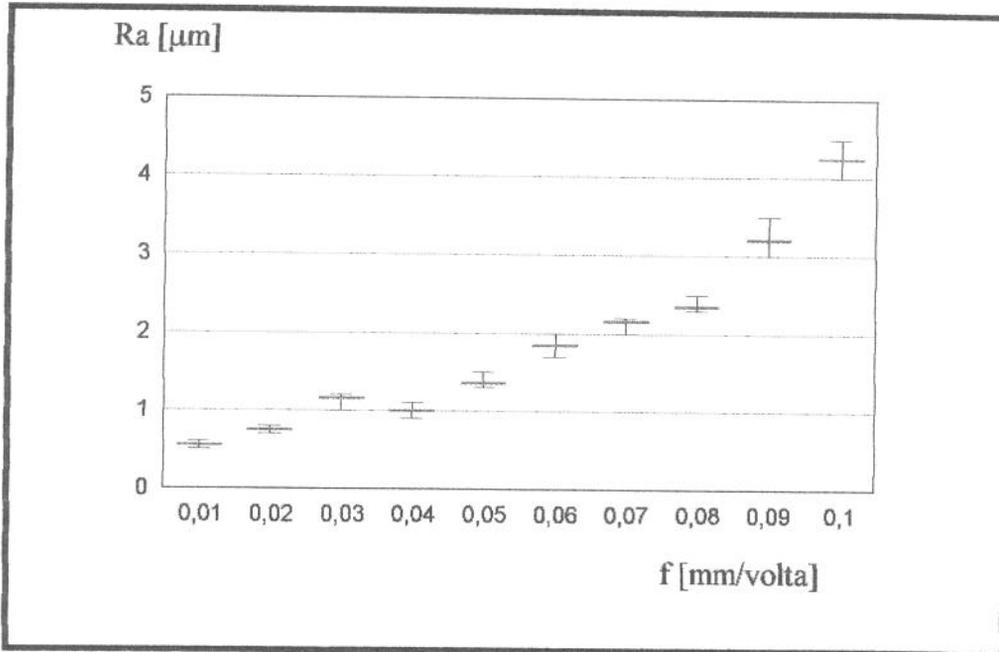
Rotação da peça - [mm]	Diâmetro da ferramenta - [mm]	Rugosidade - Ra [μm]
180	52	2
180	24	1,7

5.2.7 - Ensaio 6

Neste ensaio procurou se utilizar uma profundidade de usinagem menor que 0,1 mm, uma vez que, observou-se no ensaio 3, que a rugosidade é menor quanto menor for esta grandeza (figura 5.1). Assim utilizando-se um $a_p = 0,05$ mm (a peça sofreu uma pré-usinagem para a uniformização geométrica da superfície), procurou-se, mantidos os demais parâmetros do ensaio 5, verificar o comportamento da rugosidade, quando se altera o avanço.

A rotação da peça foi aumentada para 600 rpm, tendo em vista os resultados observados no ensaio 4 (quanto maior a rotação da peça, menor a rugosidade).

Os resultados estão mostrados na figura 5.3. Observou-se desta figura que, à medida que se aumenta o avanço, piora a rugosidade da peça.



$\phi = 24 \text{ mm}$	$l_f = 50 \text{ mm}$	$n_p = 600 \text{ RPM}$
$Z = 1$	$v_c = 309 \text{ m/min}$	$n_r = 4098,5 \text{ RPM}$
$\gamma_0 = -6^\circ / \lambda_s = -4^\circ$	$a_p = 0,05 \text{ mm}$	discordante
pastilha - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$	$f = 0,01 \text{ a } 0,10 \text{ mm/rot.}$	Dureza = 61 HRc
		Relação $n_f/n_p = 6,8$

Figura 5.3 - Influência do avanço na rugosidade de superfície

Capítulo VI : CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Os ensaios de 1 a 6 realizados com várias combinações de avanço, velocidade de corte, rotação da peça, diâmetro da fresa, etc..., procuraram verificar o comportamento da qualidade superficial, aqui caracterizada como R_a , quando se utiliza o processo de fresotorneamento. Estas variações nos parâmetros não tinham como objetivo precípuo o alcance do menor valor de R_a ou da qualidade de trabalho IT e sim o de se verificar as tendências de variação com a alteração dos parâmetros. Pode-se observar destes ensaios que:

- as pastilhas de Si_3N_4 , usadas no primeiro ensaio, tiveram para as mesmas condições de usinagem, um desgaste pronunciado em relação ao desgaste ocorrido nas pastilhas de Al_2O_3/TiC ; este fenômeno se dá devido ao Si_3N_4 reagir quimicamente com o aço em temperaturas acima de $900^\circ C$, temperaturas que certamente foram atingidas no primeiro ensaio, uma vez que o cavaco saiu em forma de micro esferas pré-fundidas pela usinagem, (temperatura de fusão do aço $1538^\circ C$). Embora nos demais ensaios as velocidades de corte utilizadas foram menores, optou-se por utilizar em todos os ensaios a pastilha de cerâmica mista (Al_2O_3/TiC);
 - a utilização de uma ferramenta comercial de fresar com oito dentes mostrou-se inadequada, principalmente devido ao elevado diâmetro desta; para as condições da montagem estabelecida, o ideal seria, para se alcançar baixas rugosidades, se utilizar de ferramentas com diâmetros pequenos com mais de uma pastilha. No presente caso, utilizou-se fresas especialmente projetadas para o fim, com apenas uma pastilha, para não se ter influências de desvios axial;
 - A profundidade de corte a_p mostrou ser um parâmetro de grande importância no fresotorneamento ortogonal. Observou-se uma tendência de piora da rugosidade à medida que a profundidade de corte aumenta (figura 5.1);
 - o fresotorneamento discordante, da mesma maneira que o fresamento convencional, tende a piorar a rugosidade (tabela 5.1);
-

- à medida que, mantido os demais parâmetros constantes, se aumentou a rotação da peça, diminuindo portanto a relação n_f/n_p , diminuiu também a rugosidade (figura 5.2). Esta constatação, para o fresotorneamento ortogonal discordante, contraria os resultados de ensaios citados na literatura (Schulz, H., 1990 - figura 2.2 - item 2.2);
- a diminuição do diâmetro da fresa mostrou ser benéfica ao acabamento superficial, confirmando que fresas de menor diâmetro proporcionam resultados melhores;
- a influência do avanço se faz sentir, de maneira que, à medida que se aumenta o mesmo, há uma piora da rugosidade (figura 5.3);
- embora todos os ensaios tenham sido conduzidos sem fluido de corte, após o término da usinagem era possível a manipulação da peça sem o auxílio de qualquer proteção, sugerindo que a menor porção de calor gerada fica com a peça; todos os corpos de prova apresentaram exatamente a mesma dureza após a usinagem, sendo que, os mesmos mostraram estrutura metalográfica inalterada em relação à inicial. Isto reforça a conclusão anterior;

As conclusões acima são válidas para as condições de ambiente e trabalho utilizadas.

De maneira geral, observou-se que o processo de fresotorneamento ortogonal mostra possuir potencialidades para ser uma alternativa para a usinagem final de peças, especialmente no que se refere à preservação das características de tratamento térmico. Para os casos e condições trabalhadas (peças endurecidas à 60-61 Rc) se obteve sempre a qualidade de trabalho IT5 (exceto ensaios 1 e 2). No caso da rugosidade os melhores resultados se situaram em torno de $R_a = 0,5\mu\text{m}$ (6º ensaio - $a_p = 0,05$ - $f = 0,01$)

Desta forma, o presente trabalho mostra ser viável o aprofundamento das pesquisas e ensaios em fresotorneamento, no sentido de se buscar condições ótimas de trabalho (melhor rigidez do conjunto, parâmetros de usinagem mais adequados, outras ferramentas, dentre outras).

Como sugestão para trabalhos posteriores, pode-se citar:

- pesquisa com outras ferramentas de corte (CBN, por exemplo);
 - pesquisa com outro tipo de fresa (duas arestas cortantes, por exemplo);
 - melhor caracterização entre o fresotorneamento concordante e discordante;
 - utilização de fresotorneamento em operações de desbaste;
 - pesquisa sobre o conjunto cabeçote - máquina ferramenta, para se obter um sistema mais rígido.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andoh, Y., et al; On the Formation of BN by Ion Beam and Vapour Deposition; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research; vol. B33/1988 - pag. 678 - 680.

Apostila SPK - Feldmühle Aktiengesellschaft, 1º Seminário sobre aplicação de cerâmica para usinagem de metais, 1990.

Baldoni, D.H., et al; Ceramics for machining, American Ceramic Society Bulletin, vol. 67/2, 1988, pag.381-383

Battacharyya, S.K.; Jawaid, A; Syalon Ceramics in Metal Cutting, International Journal of Production and Research, vol 19/5/1981, pag. 589 - 594.

Billman, E.R.; et al; Machining with Al₂O₃-SiC-Whisker Cutting tools; American CERAMIC Society BULLETIN; vol. 67/6/1988; pag. 1016-1019.

Boehs, L; Resultados Atraentes com Ferramentas Cerâmicas; Máquinas e Metais - Maio/1987 - pag. 24-27.

Catálogo Sandvik Coromant G1000 : 4 - SPA, 93/94, "Herramientas de tornear"

Costa, D.D.; Análise dos Parâmetros de torneamento de aços endurecidos. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, abril de 1993.

Ferraresi D.; Fundamentos da Usinagem dos Metais, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1ª. Ed, 1989.

Friedel, R.; Novos materiais, Encarte "National Geographic Society" no Jornal O Estado de São Paulo, 05/11/1995, pag 11-12

Gardinier, C.F.; Physical Properties of Superabrasives; American Ceramic Society Bulletin; vol.67/6/1988 - pag. 1006-1009.

Hibbs, L.E.; et al; Borazon and Diamond Compact Tools; High Temperatures - High Pressures; vol. 6/1974 - pag. 409-413

Jack., D. H.; Ceramic Cutting Tool Materials. Material & Design, vol. 7/5/1986 - pg 267-273.

Komanduri, R; Samanta, K.; Ceramics; Metals Handbook; vol. 16/1989; pag. 98 - 103; 9º Ed.

König W., et al; Machining of Hard Materials; Annals of the CIRP; vol.33/2, 1984, pag. 417-427.

König W., et al; Machining hard materials with geometrically defined cutting edges - Field of applications and limitations, Annals of the CIRP, vol.39/1, 1990, pag,61-64

König W., et al; Turning versus grinding - A comparison of surface integrity .Aspects and attainable accuracies, Annals of the CIRP, vol.41/1, 1993, pag,39-43

Lin, W.L., et al; Characterization of Boron Nitride Films Prepared by the Dual Ion Beam Deposition Technique; Materials Science and Engineering, vol. B7/1990 - pag. 107-110.

Marcondes, F.C.; A história do metal duro, Unida Artes Gráficas e Editora Ltda,1990

Nakayama, K.et al; Machining charecteristics of hard materials. Annals of the CIRP, pp. 89-92, vol. 37/1/1988

Narutaki, N. et al; "High-Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools" anais da CIRP, volume 42/1, 1993 - pag. 103-106.

-
- Narutaki, N.; Cutting performance and wear characteristics of an alumina-zircônia ceramic tool in high speed milling., *Annals of the CIRP*, vol.40/1, 1991, pag.49-52
- Satou, M., et al; Nitride Film Formation by Ion and Vapour Deposition; *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*; vol. B7/8/1985 - pag. 910-914.
- Schulz , H.;Scherer, J.; High-Speed Milling, *Industrial & Production Engineering*, vol.13/1, 1989, pag.13-19
- Schulz, H.; High speed turn-milling - A new precision manufacturing technology for the machining of rotationally symmetrical workpieces, *Annals of the CIRP*, vol.39/1, 1990, pag.107-109
- Schultz H.; T. Moriwaki; "High-Speed Machining" *Anais da CIRP*, Volume 41/2/1992 - pag. 637-643.
- Schulz,H.et.al. - Chip formation mechanism in the orthogonal turn-milling process., *Production Engineering* , vol. I /1 (1993).
- Schulz,H.et.al. - Turn milling of hardened steel an alternativa to turning., *Technical University of Darmstadt, Germany*, 1994.
- Silva, A.L. e Mei, P.R., *Aços e ligas especiais*, Eletrometal S/A Metais Especiais, 2ª ed.,1988.
- Sorrel, C.C., Mc Cartney,E.R.; *Engineering Nitrogen Ceramics: Silicon Nitride, β - Sialon an Cubic Boron Nitride*, *Materials Forum*, vol 9/3, 1986, pag. 148-161
- Tönshoff, H.K.; Denkena, B.; Wear of ceramic tools in milling, *Lubrication Engineering*, vol 47/9, 1991 - pag. 772-778
-

Vigneau, J. et al.; Influence of the Microestruature of the Composite Ceramic Tools on Performance When Machining Nickel Alloys. Annal of the CIRP vol. 36/1/1987 - pg.13-16

Wentorf, R.H.; Cubic Form of Boron Nitride; The Journal of Chemical Physics; vol. 26/04/1957 - pag. 956

Wentorf, R.H.; Sintered Superhard Materials; Science; vol. 208/4446/1980 - pag. 872-880

Wise, Mark; Material de palestra proferida em 04/1992 na FEM/UNICAMP.
