

THIAGO FREIRE DE SOUZA

USINAGEM DA LIGA DE NÍQUEL INCONEL 718
COM PASTILHAS DE CERÂMICA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2012

S729u Souza, Thiago Freire de
Usinagem da liga de níquel Inconel 718 com pastilhas de cerâmica /
Thiago Freire de Souza – Guaratinguetá : [s.n], 2012.
60 f. : il.
Bibliografia: f. 59-60

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.
Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

1. Usinagem I. Título

CDU 621.9

USINAGEM DE LIGA DE NÍQUEL INCONEL 718 COM
PASTILHAS DE CERÂMICA


THIAGO FREIRE DE SOUZA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Orientador/ UNESP-FEG



Eng. Renam Pereira Gama
UNESP-FEG



Eng. Renato Araújo Barros
UNESP-FEG

Dezembro de 2012

DADOS CURRICULARES
THIAGO FREIRE DE SOUZA

NASCIMENTO 01.08.1987 – LORENA/SP

FILIAÇÃO José Marcial Rodrigues de Souza
 Maria Aparecida Freire de Souza

2002/2004 Curso Técnico

 Técnico em Mecânica – Colégio Técnico Industrial de
 Guaratinguetá - UNESP

2006/2012 Curso de Graduação

 Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de
 Guaratinguetá - UNESP

Dedico este trabalho, aos meus pais José Marcial e Maria Aparecida, ao meu irmão Rodrigo, a minha amada namorada Najara e minha querida e amada sobrinha Maria Luiza que sempre me deram força para continuar.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a *Deus* que sempre me guiou.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* que sempre me deu suporte e orientação, com seus contatos, sabedoria e paciência, em relação aos caminhos a serem percorridos.

aos meus amados pais *Maria Aparecida e José* que sempre me apoiaram de todas as formas possíveis, me orientando e me guiando para chegar no caminho certo em toda minha vida.

a meu querido irmão *Rodrigo* que sempre me incentivou a seguir esse caminho e persistir até conseguir o desejado.

a minha amada namorada *Najara* amor da minha vida que soube me incentivar e lutar para não desistir no piores momentos.

aos profissionais do *SENAI “Felix Guisard”, Taubaté*, em particular ao *Prof. Julio Cesar dos Santos*, ao *Prof. Msc Elias Alves da Cunha* e ao *Prof. Nikolas, Cleiton* principalmente pelo apoio e suporte na parte prática, comentários e outras necessidades de registro dos testes de usinagem.

a escola *SENAI “Felix Guisard”, Taubaté*, em particular na pessoa dos *Professores Fernando Takao e Flavio Maximo*, Diretor e Coordenador pela disponibilização das máquinas e dos operadores para a realização dos testes práticos de usinagem.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

- SANDVIK – com a doação da pastilha utilizada neste trabalho.
- SECO TOOLS – com as doações dos suportes utilizados nos estudos.
- ESCOLA SENAI “FELIX GUIARD” TAUBATÉ - SP – com a disponibilização do laboratório de metalografia e oficina de usinagem para a execução dos ensaios do trabalho.
- VILLARES METALS – com a doação do INCONEL 718.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o mundo pertence a quem se atreve, e a vida é muito para ser insignificante.”

Charles Chaplin

SOUZA, T. F. de. **Usinagem da liga de níquel Inconel 718 com pastilhas de cerâmica.** 2012. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

A usinagem de superligas resistentes a altas temperaturas como as ligas de níquel, especificamente o Inconel 718, representa um trabalho na qual é muito difícil de se obter melhorias no processo, devido a dificuldade de usinagem em altas velocidades de corte, a utilização nas indústrias dessa liga apresentou grande evolução nos últimos anos, sua aplicação na indústria aeronáutica se difundiu sendo utilizado em palhetas de turbinas, peças de compressor, suportes e elementos de conjunto. Os setores; automotivo, químico, médico e outros também se aproveitaram das ótimas características do Inconel 718 e tem utilizado o material. As ligas resistentes a altas temperaturas apresentam elevada dificuldade de usinagem, fato este associado com as altas forças de corte geradas durante a usinagem que resultam em altas temperaturas. Elevados níveis de temperaturas podem ocasionar deterioração da aresta de corte, com posterior deformação ou quebra, os desgastes mais comuns obtidos na usinagem desses materiais são o desgaste de flanco, a formação de aresta postiça de corte e desgaste tipo entalhe. A parte experimental do trabalho consiste na usinagem da liga a base de níquel Inconel 718 tratado termicamente para endurecimento, utilizando ferramenta cerâmica a base de nitreto de silício da Sandvik (Si_3N_4) com a finalidade de comparar os melhores resultados obtidos na tese de mestrado de SANTOS (2010) que utilizou uma ferramenta de cerâmica também a base de nitreto de silício que foi desenvolvida na tese de doutorado de SOUZA (2005). Os ensaios foram realizados em um torno CNC e foi anotado para cada aresta de corte os resultados obtidos. Foram feitos os testes partindo de uma condição inicial da ferramenta com velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,5 mm/rot e profundidade de corte 0,5 mm, foi diminuída a velocidade de corte para os testes subsequentes com as mesmas condições de avanço e profundidade de corte. A ferramenta apresentou desgaste instantâneo em duas condições de 200 m/min e 100 m/min, quebra prematura com 50 m/min e por ultimo usinou com dificuldade na condição de 30 m/min obtendo um comprimento pequeno de corte em relação ao obtido para a condição de 200 m/min do trabalho de SANTOS (2010).

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem, Torneamento, Superligas de Níquel, Inconel, Ferramentas Cerâmicas, Desgaste.

SOUZA, T. F de. **Machining of Inconel 718 nickel alloy with ceramic tools**. 2012. 60f. Undergraduate Final Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

The machining of super alloys resistant to high temperatures such as nickel alloys, inconel 718 specifically, is a very difficult job to obtain improvements in the process, due to the difficulty of machining at high cutting speeds, the use of these alloys in industries showed great developments in recent years, its application in aeronautical industry spread being used in vane turbo, compressor parts, props and set elements. The automotive, chemical, medical and others also took advantage of the great features of inconel 718 and has used the material. The high temperature resistant alloys have high machining difficulty, a fact that is associated with high cutting forces generated during machining which result in high temperatures. High levels of temperatures can cause deterioration of the cutting edge, with subsequent deformation or breakage, wear most common obtained in machining such materials are flank wear the formation of built-up edge for cutting and notch wear. The experimental part of the work consists in machining of nickel-based alloy Inconel 718 heat treated for hardness, using a tool based ceramic silicon nitride Sandvik (Si_3N_4) in order to compare the best results obtained in the master's thesis of SANTOS (2010) who used a tool ceramics also the basis of silicon nitride which was developed in the doctoral thesis of SOUZA (2005). Assays were performed on a CNC lathe and was noted for each cutting edge results obtained. Tests were made starting from an initial condition of the tool with cutting speed of 200 m/min, feed 0.5 mm and 0.5 mm depth of cut was reduced cutting speed for the subsequent tests with the same conditions of feed and depth of cut. The tool presented wear instant under two 200 m/min and 100 m/min, premature rupture of 50 m/min and finally cut provided with difficulty 30 m/min giving a small length of cut in relation to that obtained for the condition of 200 m/min from the work of SANTOS (2010).

KEYWORDS: Machining, Turning, Nickel Superalloys, Inconel Alloy 718, Ceramic Tool, Wear.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Processos de torneamento (FERRARESI, 1977).....	22
FIGURA 2 – Demonstração dos movimentos: principal, transversal e resultante de avanço no torneamento (FERRARESI, 1977).....	24
FIGURA 3 – Superfícies, arestas e pontas de corte de uma ferramenta de barra (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).	26
FIGURA 4 – Arredondamento e chanframento na ponta de corte da ferramenta (FERRARESI, 1977).....	26
FIGURA 5 – Demonstração dos pontos de referência das arestas de corte de uma ferramenta de torno (FERRARESI, 1977).....	27
FIGURA 6 – Zona de fluxo dentro do cavaco (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).....	29
FIGURA 7 Tipos de forma do cavaco (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).....	31
FIGURA 8 Forças de usinagem em um torneamento e suas componentes (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).....	32
FIGURA 9 – Materiais de corte mais comuns para usinagem de ligas metálicas (MEHROTRA, 1998).....	34
FIGURA 10 – Composição Química Nominal (% peso) e densidade – liga forjada a base de níquel (adaptado de Ezugwu et al, 1999).....	39
FIGURA 11 – Variação da microdureza em função do tempo de envelhecimento em três diferentes temperaturas (adaptada de Shuangqun et al, 2004).....	41
FIGURA 12 – Cargas geradas na aresta de corte: (a) usinagem de aço; (b) usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas, adaptado de Witting (2002).....	43
FIGURA 13 – Perfil de distribuição da temperatura na usinagem de titânio e aço (EZUGWU, et al 1997).....	44

FIGURA 14 – Representação do corpo-de-prova.....	49
FIGURA 15 - Ferramenta de corte utilizada no ensaio.....	51
FIGURA 16 – Forno utilizado para solubilização do INCONEL 718.....	52
FIGURA 17 – Forno utilizado para precipitação do INCONEL 718.....	52
FIGURA 18 – Durômetro digital utilizado para medir a dureza.	53
FIGURA 19 – Estereoscópio utilizado para registrar o desgaste nas ferramentas.....	53
FIGURA 20 – Torno CNC utilizado para o ensaio.....	53
FIGURA 21 – Desgaste de flanco da ferramenta “Vb” x Comprimento de corte “Lc” (SANTOS, 2010).	54
FIGURA 22 – Demonstração das arestas 1 e 2 da ferramenta.....	56
FIGURA 23 – Demonstração das arestas 3 e 4 da ferramenta.....	56
FIGURA 24 – Demonstração das arestas para $V_c = 200\text{m/min}$ (SANTOS 2010).....	56
FIGURA 25 – Demonstração das arestas para $V_c = 300\text{m/min}$ (SANTOS 2010).....	57

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Propriedades relativas do material cerâmico em comparação com o metal duro (adaptada de DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).....	41
QUADRO 2 – Classificação das ligas em relação ao grupo de usinabilidade (adaptada de WITTING, 2002).	41
QUADRO 3 – Composição química nominal da liga INCONEL 718.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

N	- Nitrogênio
Si	- Silício
Ni	- Níquel
Ti	- Titânio
Al	- Alumínio
W	- Tungstênio
Ta	- Tântalo
Co	- Cobalto
TiN	- Nitreto de titânio
TiC	- Carbetto de titânio
Al ₂ O ₃	- Alumina
Si ₃ N ₄	- Nitreto de silício
Al ₂ O ₃	- Óxido de alumínio
TiAlN	- Nitreto de alumínio-titânio
γ	- Fase gama
V _{mxp}	- Velocidade máxima de produção
TiAlN	- Nitreto de titânio e alumínio
ap	- Profundidade de corte
V _c	- Velocidade de corte
f	- Avanço
L _c	- Comprimento de corte

Vb	- Desgaste de flanco
APC	- Aresta postiça de corte
CNC	- Comando Numérico Computadorizado
HRC	- Dureza Rockwell C
SP	- Estado de São Paulo
(n)	- Número de ordem da utilização
ZrO ₂	- Óxido de zircônio
SiO ₂	- Óxido de silício
Y ₂ O ₃	- Óxido de ítrio
MgO	- Óxido de manganês
Ft	- Força ativa
Fc	- Força de corte
Ff	- Força de avanço
Fap	- Força de apoio
Fp	- Força passiva ou de profundidade
CFC	- Cúbica de face centrada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1- Objetivos do Trabalho.....	19
2 REVISÃO LITERARIA.....	20
2.1 Usinagem	20
2.1.1 Histórico e Evolução do Processo de Usinagem.....	20
2.1.2 Operações de Usinagem.....	20
2.1.3 Conceitos Básicos Sobre Movimentos.....	23
2.1.4 Geometria na Cunha Cortante das Ferramentas de Usinagem.....	24
2.1.5 Mecanismos de Formação do Cavaco.....	27
2.1.6 Interface Cavaco Ferramenta.....	29
2.1.7 Controle de Forma do Cavaco.....	30
2.1.8 Forças e Potências de Corte.....	31
2.2 Ferramentas de Corte.....	33
2.2.1 Propriedades das Ferramentas de Corte.....	33
2.2.2 Histórico e Classificação das Ferramentas de Cerâmica.....	35
2.2.3 Propriedades das Ferramentas de Cerâmica a base de Nitreto de Silício.....	36
2.3 Ligas de Níquel.....	37
2.3.1 Características das Ligas a Base de Níquel.....	37
2.3.2 Usinagem das Ligas a Base de Níquel.....	41

2.3.3 Dificuldades de Usinagem das Ligas a Base de Níquel.....	45
2.3.4 Características da Liga Inconel 718.....	47
3. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	49
3.1 MATERIAIS	49
3.1.1 Corpo de Prova INCONEL 718.....	49
3.1.2 Tratamento Térmico do INCONEL 718	50
3.1.3 Ferramentas de Corte.....	50
3.2. EQUIPAMENTOS	51
3.2.1 Forno de Solubilização	51
3.2.2 Forno de Precipitação	51
3.2.3 Durômetro Digital	52
3.2.4 Estereoscópio.....	52
3.2.5 Torno CNC	53
3.3. METODOLOGIA	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

Avanços tecnológicos estão diretamente ligados ao desenvolvimento de materiais metálicos, entre outros aspectos, sendo que é necessário cada dia mais a busca por materiais que apresentem maior durabilidade sobre as condições de operação. O intuito é diminuir custos relacionados a manutenções corretivas ou preventivas, resultando em um aproveitamento de maior eficiência do equipamento.

Muitas pesquisas para desenvolvimento de ligas metálicas, comumente chamadas de “superligas”, tem como estímulo a busca por melhorias de algumas propriedades tais como: aumentar a tenacidade; aumentar a resistência à temperatura, ao desgaste, oxidação e corrosão. Podendo a cada desenvolvimento realizado obter motores com maior eficiência e maior potência, maior eficiência de troca de calor para resfriamento de auto forno, aumentar a desempenho de uma aeronave quando em voo, entre outros. As “superligas” são constituídas a base de níquel, cobalto e ferro, através das quais se divide em uma variedade de ligas.

Segundo Thakur (2009), a constituição química das ligas de níquel apresenta elevados teores de elementos de liga, elementos que originam as propriedades mecânicas e térmicas, que juntamente com a afinidade para reagir com o material da ferramenta resultam em uma demasiada dificuldade de usinagem, visto que é necessária uma alta qualidade das propriedades química e mecânica a altas temperaturas. Classificam-se como materiais de difícil corte, gerando conseqüentemente problemas na usinagem, e obtenção de um bom acabamento superficial. Tais características são desafios dos desenvolvimentos da atualidade.

Segundo Silva (2001), as ligas de níquel são endurecidas através da precipitação do Ni₃ (Al-Ti) fase gama juntamente com a solução de elementos refratários na matriz, sendo que o aumento dessa fase gama esta diretamente ligada com o aumento da resistência a temperaturas mais elevadas, apresentando um limite de 55% para as ligas feitas pelo processo de metalurgia do pó e 70% para as ligas de cristal único. Alteração na superfície e na tensão residual da peça pode acarretar em distorções à peça, por isso é necessário que se tenha o conhecimento da microestrutura da liga, o comportamento da ferramenta de corte e da eficiência dos processos de corte empregados, garantindo assim, um controle dos principais parâmetros de usinagem assegurando a vida da ferramenta e realizando a usinagem em condições satisfatórias.

Em específico a “superliga” chamada INCONEL 718 é à base de níquel, se classificando como uma das mais importantes da atualidade, principalmente pela sua

aplicação na indústria aeronáutica, automobilística e petroquímica, aplicações para a medicina, veículos espaciais, marinha, turbinas e muitos outros. Aplicações nas quais são principalmente utilizadas pelas características do INCONEL 718 de apresentar alta resistência a corrosão e a oxidação a altas temperaturas, apresentar alta fluência, alta resistência a fadiga, baixa condutividade térmica e resistência mecânica a altas temperaturas.

As maiores dificuldades para trabalhar as “superligas” são definidas resumidamente segundo Ezugwu et al (2000) conforme segue:

- A soldabilidade destas ligas na aresta de corte da ferramenta, o que origina uma aresta postiça de corte e compromete a integridade superficial da peça e da ferramenta;
- A baixa condutividade térmica destas ligas ocasiona a concentração da temperatura de corte na ferramenta, gerando elevados gradientes térmicos;
- A presença de carbeto duros e abrasivos na microestrutura destas ligas leva a desgastes excessivos por abrasão, o que pode levar a ferramenta à falha prematura;
- A elevada resistência e dureza a quente destas ligas pode causar a deformação da ferramenta durante a usinagem;
- A matriz destas ligas é austenítica, o que promove um endurecimento rápido da mesma, responsável pelos maiores desgastes da ferramenta durante a usinagem.

1.1 - Objetivos do Trabalho

Os principais objetivos do presente trabalho são:

- Estudar o comportamento em usinagem, especificamente o torneamento, da liga à base de níquel INCONEL 718 com ferramentas a base Si_3N_4 da Sandvik em um comparativo com a ferramenta de cerâmica também a base de Si_3N_4 desenvolvida por SOUZA (2005) e testada por SANTOS (2010).
- Avaliar o aspecto do desgaste das ferramentas de corte.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Usinagem

2.1.1 Histórico e Evolução do Processo de Usinagem

Segundo Nehring (2010), o processo de usinagem é definido de um modo geral como um processo no qual temos a remoção do cavaco por algum esforço de uma determinada ferramenta com o intuito de atribuir à peça uma forma, um acabamento superficial pré-determinado e uma dimensão específica.

Desde milhares de anos atrás já existia a usinagem, por volta dos anos 700 antes de Cristo, onde era utilizada como ferramenta de usinagem a pedra, principalmente utilizada na época para a fabricação de armas, como as facas e ponteiros, utilizadas para a caça e também nas guerras. A partir do ano 700 antes de Cristo a usinagem apresentou uma grande evolução. O ferro foi um material pioneiro na usinagem, todas as ferramentas e armas a princípio eram de ferro. Outros materiais foram sendo descobertos, como o cobre e o ouro.

Após o primeiro contato com a forma de usinar os materiais, algumas melhorias foram implementadas já no processo de fabricação do aço e do ferro, já por volta dos anos 1700 depois de Cristo. O americano F. W. Taylor trouxe novidades para a usinagem quando descobriu o aço rápido, sendo o mesmo responsável por um grande avanço na história da usinagem. Entre os avanços tecnológicos que trouxeram maior facilidade na usinagem, estão as máquinas a vapor, e claro as máquinas elétricas, como tornos, fresadoras, furadeira, mandrilhadoras, retificadoras, centros de usinagem, plainas, etc.

2.1.2 Operações de Usinagem

Segundo Ferraresi (1977), pode-se definir as operações de usinagem como aquelas operações que tem a finalidade de conferir à peça dimensão, acabamento ou forma, quando temos uma mistura das anteriores, existe a formação do cavaco. O cavaco apresenta forma

irregular, é uma porção de material da peça que foi retirada pela ferramenta. Alguns fenômenos são observados quando ocorre a formação de cavaco, tais como: aresta postiça de corte; recalque; craterização na superfície de saída da ferramenta, também é possível observar que o cavaco é formado periodicamente.

Dentre os processos mecânicos de usinagem dos metais é possível descrever como são divididos os grupos e suas subcategorias (FERRARESI, 1977).

- Torneamento: Define-se como um processo mecânico de usinagem que visa obter uma superfície de revolução, através de uma ou mais ferramentas monocortantes. A peça gira em torno do eixo principal de rotação do torno, e ocorre o deslocamento da ferramenta no mesmo plano do eixo principal. Dentro do processo de torneamento tem alguns processos que são os mais utilizados conforme de descreve abaixo.

→ Torneamento retilíneo é um processo de torneamento onde ocorre o deslocamento da ferramenta segundo uma trajetória retilínea, dentre os quais se destacam:

→ Torneamento cilíndrico: é um processo de torneamento onde ocorre o deslocamento da ferramenta segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina, podendo ser um torneamento externo ou interno. Para se obter um entalhe circular na peça, na face perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, é definido como sangramento axial.

→ Torneamento cônico: é um processo de torneamento onde ocorre o deslocamento da ferramenta segundo uma trajetória retilínea inclinada em relação ao eixo principal de rotação da máquina, podendo ser um torneamento externo ou interno.

→ Torneamento radial: é um processo de torneamento onde ocorre o deslocamento da ferramenta segundo uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina.

- Perfilamento: é um processo de torneamento onde ocorre o deslocamento da ferramenta segundo uma trajetória retilínea radial ou axial, de modo a obter uma forma definida e determinada pelo perfil da ferramenta.

- Torneamento curvilíneo: é um processo de torneamento onde ocorre o deslocamento segundo uma trajetória curvilínea.

As operações de torneamento podem ser de desbaste ou de acabamento. Nas operações de usinagem de acabamento é tido como objetivo a obtenção da peça nas medidas finais, também visando determinado acabamento superficial ou ambos. Nas operações de usinagem de desbaste, é tido como objetivo a remoção de material, é uma operação que precede a

operação de acabamento, obtendo uma forma na peça com dimensões próximas e maiores que as dimensões finais (FERRARESI, 1977).

Na Figura 1 são apresentados, segundo Ferraresi (1977), os tipos de torneamento mencionados.

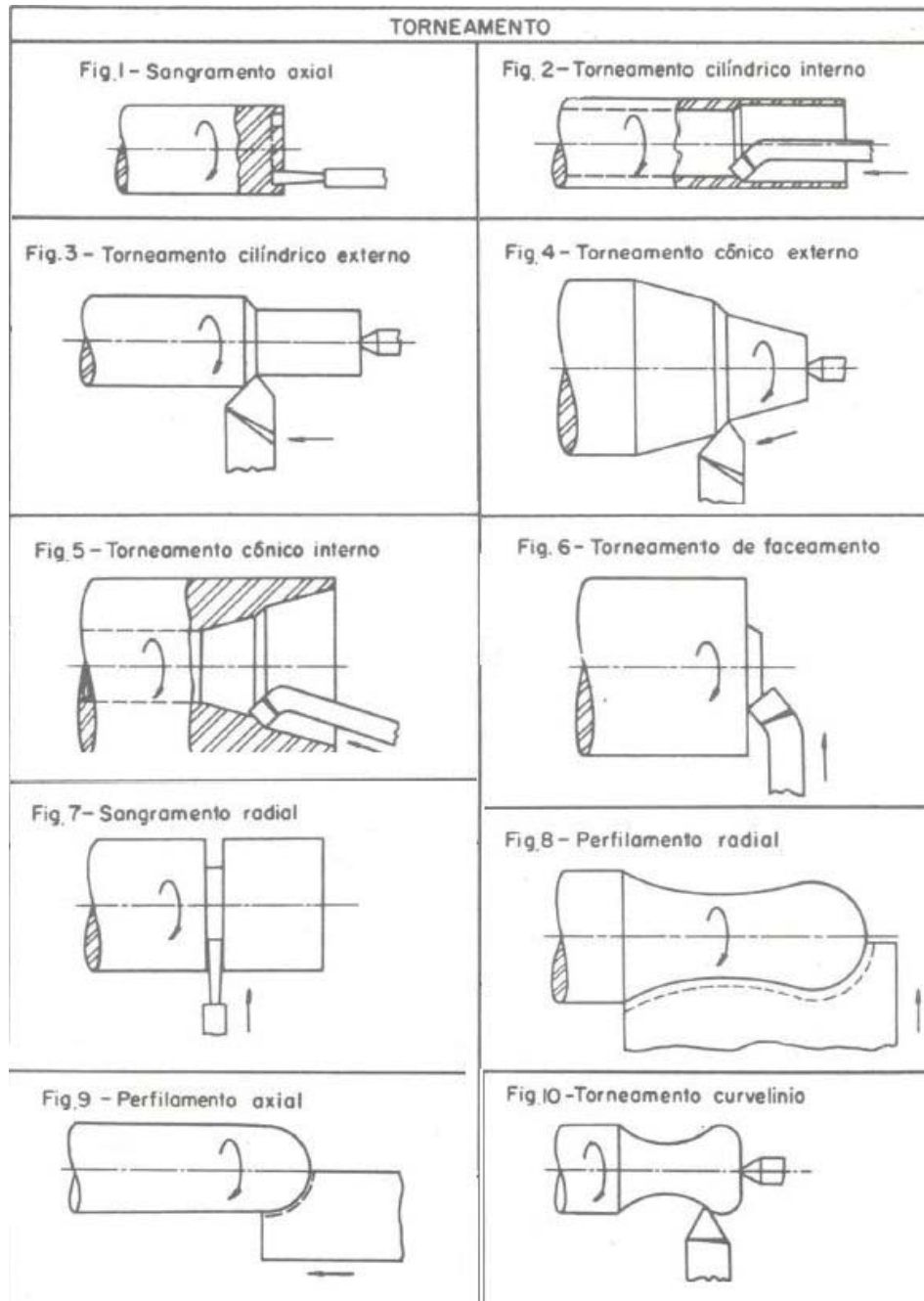


Figura 1 – Processos de torneamento (FERRARESI, 1977).

Para conhecimento, existem outras operações de usinagem tais como aplainamento, furação, alargamento, rebaixamento, mandrilhamento, fresamento, serramento entre outros que não serão descritos com detalhes visto que o mesmo não são o foco do trabalho.

2.1.3 Conceitos Básicos Sobre Movimentos

Para se obter um melhor entendimento sobre ângulos de ferramentas de corte, forças de corte e condições de usinagem, é explicado basicamente conceitos sobre os diferentes movimentos existentes na usinagem, e de algumas relações geométricas comuns na usinagem. Para isso é necessário entender o ponto de referência, que é um ponto genérico da aresta de corte, sendo, na ferramenta de barra, o ponto de referência parte da aresta de corte que fica próxima da ponta da ferramenta (FERRARESI, 1977).

Alguns movimentos entre a peça e a aresta cortante são básicos, sendo movimentos relativos, considerando a peça como parada. Os movimentos mais importantes como os de corte, de avanço efetivo de corte são descritos conforme segue abaixo (FERRARESI, 1977):

- Movimento de corte: é um movimento entre a peça e a ferramenta no qual em um movimento de avanço, resulta de uma única remoção de cavaco que dura apenas uma volta ou um curso.

- Movimento de avanço: é um movimento entre a peça e a ferramenta que associado ao movimento de corte, resulta em uma remoção repetitiva de cavaco, durante um número determinado de revoluções. Pode o movimento de avanço ser resultante de um movimento de avanço principal juntamente com um movimento de avanço lateral

- Movimento efetivo de corte: é resultante da realização simultânea dos movimentos de corte e de avanço.

São demonstradas na Figura 2, segundo Ferraresi (1977), as componentes do movimento de avanço no torneamento de uma peça.

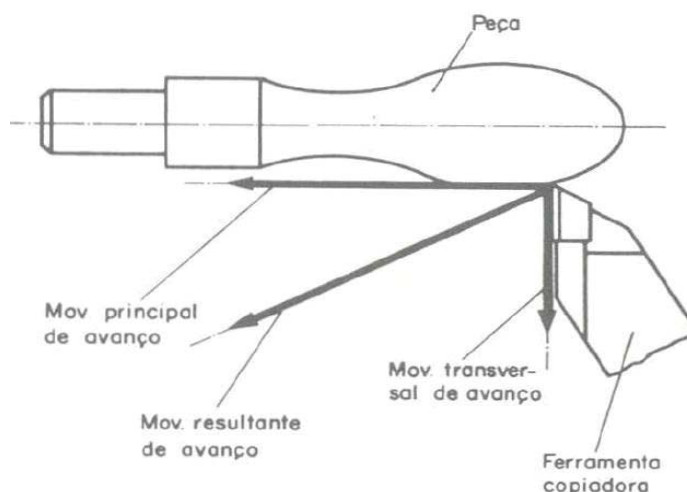


Figura 2 – Demonstração dos movimentos: principal, transversal e resultante de avanço no torneamento. (FERRARESI, 1977).

Alguns movimentos não fazem parte diretamente da formação do cavaco, e podem ser entendidos através de seus próprios nomes. São os movimentos de posicionamento, de profundidade e de ajuste.

Existem alguns outros fatores que se associam ao corte, ao avanço e ao efetivo de corte, são eles: percurso, direção, velocidade, ângulo, profundidade, superfície, comprimento e espessura.

2.1.4 Geometria na Cunha Cortante das Ferramentas de Usinagem

O entendimento dos ângulos de ferramentas de corte e ângulos efetivos (ou de trabalho) é necessário para uma melhor compreensão do processo de torneamento. Algumas normas regem o conceito da técnica de usinagem, sendo definidas com o intuito de ser aplicável para todas as operações de usinagem, os conceitos devem ser apresentados em uma lógica geométrica e os conceitos já existentes devem ser levados em consideração na medida do possível. Foram realizados diversos estudos por pesquisadores e em consequência desses estudos foi se desenvolvendo ao longo dos anos, e em 1966 foi aprovado, o projeto que foi nomeado DIN 6581 com a denominação; Geometria na cunha cortante das ferramentas. Essa

norma distingue a diferença entre os ângulos da ferramenta e os ângulos efetivos (FERRARESI, 1977).

Os ângulos da ferramenta são simplesmente obtidos medindo-se a ferramenta, não variam com a mudança na posição da ferramenta e independem das condições de usinagem e interessam à execução e manutenção da ferramenta. Enquanto os ângulos efetivos se referem à ferramenta em operação e são de grande importância na operação de corte (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

É importante salientar que existem dois sistemas de referência, o primeiro é o sistema de referência da ferramenta que tem aplicação na execução e reparo das ferramentas, o segundo é o sistema efetivo de referência que tem significado na determinação das condições de usinagem. Todos os conceitos para o trabalho se referem a um ponto fixado sobre a aresta cortante, dito como ponto de referência (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

Segundo Ferraresi (1977), os conceitos de superfície de folga, superfície de saída, aresta principal de corte, aresta lateral de corte e de pontas de corte são explicitados conforme segue:

- Superfície de folga ou superfície de incidência: é a superfície da cunha cortante da ferramenta que se defronta com a superfície de corte. Esta superfície pode apresentar um chanfro ou um bisel junto à aresta de corte.

- Superfície de saída: é a superfície da cunha cortante sobre a qual o cavaco se forma, também pode apresentar um chanfro.

- Aresta principal de corte: é a aresta de corte na qual a cunha de corte correspondente indica qual é a direção de avanço no plano de trabalho.

- Aresta lateral de corte: é a aresta de corte na qual a cunha de corte correspondente não indica a direção de avanço no plano de trabalho.

- Ponta de corte: é a ponta na qual acontece o encontro da aresta principal de corte e a aresta lateral de corte de igual superfície de saída. Pode-se fazer na ponta de corte um arredondamento ou um chanframento, dependendo do tipo de aplicação desejada.

É demonstrado na Figura 3, segundo Diniz, Coppini, Marcondes (2000), as superfícies, arestas e pontas de corte de uma ferramenta de barra.

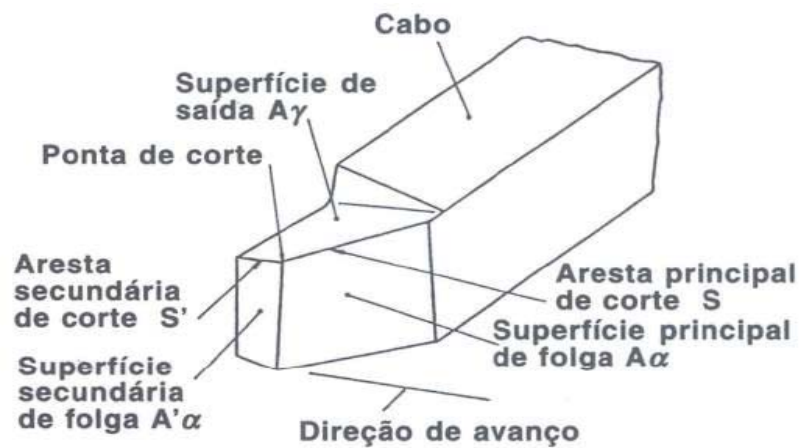


Figura 3 – Superfícies, arestas e pontas de corte de uma ferramenta de barra (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

É demonstrado na Figura 4, segundo Ferraresi (1977), como fica uma ponta de ferramenta com arredondamento e outra com chanframento.

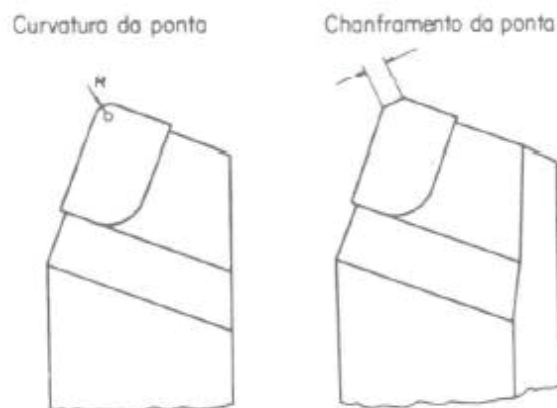


Figura 4 – Arredondamento e chanframento na ponta de corte da ferramenta (FERRARESI, 1977).

No torneamento existem alguns planos de referência que são estudados e determinados de modo a facilitar o entendimento, são eles: plano efetivo de referência; plano de referência

da ferramenta; plano de corte; plano de medida; plano de trabalho no sistema efetivo de referência e o plano de trabalho no sistema de referência da ferramenta (FERRARESI, 1977).

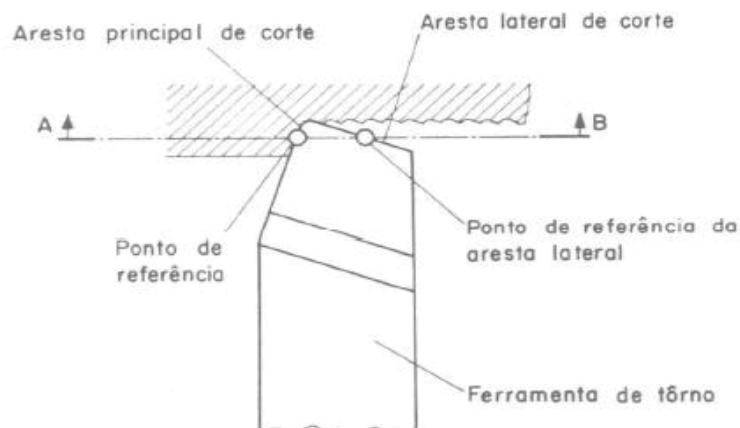


Figura 5 – Demonstração dos pontos de referência das arestas de corte de uma ferramenta de torno. (FERRARESI, 1977).

Para ampliar o entendimento, são mostrados aspectos gerais dos ângulos na cunha cortante, que determinam a posição e a forma da cunha de corte. Existem alguns ângulos na parte de corte no sistema de referência da ferramenta, são chamados de ângulos da ferramenta e se referem ao ponto de corte escolhido. Existem alguns ângulos principais, tais como: ângulo de posição da ferramenta; ângulo de posição da aresta secundária da ferramenta; ângulo de ponta da ferramenta; ângulo de inclinação da ferramenta; ângulo de saída da ferramenta; ângulo de cunha da ferramenta; ângulo de folga da ferramenta. Outros ângulos se relacionam com a parte de corte no sistema de referência da ferramenta, que são os ângulos do sistema efetivo de referência, tais como: ângulo de posição efetivo; ângulo de inclinação efetivo; ângulo de saída efetivo; ângulo de cunha efetivo e o ângulo de folga efetivo (FERRARESI, 1977).

2.1.5 Mecanismos de Formação do Cavaco

As pesquisas sobre o comportamento de formação de cavacos foram iniciadas pelo cientista francês H. Tresca, precisamente no ano de 1873, obteve teorias fundamentais

desenvolvidas nas últimas quatro décadas, embora a concepção de cavaco tenha sido feita por Tresca, que definiu que o material do objeto em trabalho a ser usinado, começa fluindo ao longo da face da ferramenta em um cisalhamento ascendente ao longo de um plano oblíquo como os avanços de uma ferramenta de plaina. Tresca mensurou o comprimento do cavaco e chegou a conclusão que o comprimento do cavaco varia somente de um terço à metade da distância percorrida pela ferramenta. Até os dias de hoje é possível verificar que Tresca estava correto, e que esses tipos de fatores de dimensões relatados são comumente vistos nas indústrias de um modo geral (KRONENBERG, 1966).

Segundo Diniz, Coppini, Marcondes (2000), a formação do cavaco influencia em diversos fatores ligados a usinagem, como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, e outros. Envolvendo também alguns aspectos econômicos e de qualidade da peça, a segurança do operador, a utilização adequada da máquina ferramenta, etc. No corte dos materiais, é envolvido cisalhamento concentrado ao longo do plano de cisalhamento, que consiste a zona primária de cisalhamento. O ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção de corte é chamado ângulo de cisalhamento, quanto maior é a deformação do cavaco, maior é o esforço de corte e menor é o ângulo de cisalhamento, essa característica é melhor apresentável em materiais dúcteis que são materiais susceptíveis a deformação.

Quando o cavaco se forma, é possível observar que sua parte na superfície traseira de onde a ponta de ferramenta esta em contato, é visível a rugosidade do cavaco visto que a deformação não é homogênea, o que acontece devido ao fato de apresentar pontos de baixa resistência ou de concentração de tensão. O mecanismo de formação do cavaco é periódico em que uma deformação plástica aumenta progressivamente até que haja uma ruptura por cisalhamento seguido de um escorregamento da porção do material deformada, enquanto o ciclo se inicia novamente na superfície subsequente do material que esta sendo usinado. Nos materiais dúcteis a região de deformação plástica é maior enquanto em materiais mais frágeis essa região é pequena, havendo a ruptura total do cavaco que pula fora da região de corte, não se atritando com a superfície de saída da ferramenta (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

2.1.6 Interface Cavaco Ferramenta

A teoria de Trent (citado por MACHADO e SILVA, 1994) é feita de modo que na interface cavaco-superfície de saída da ferramenta é configurada a existência de uma zona de aderência, logo após essa se configura uma zona de escorregamento entre o cavaco e a ferramenta.

Quando é usinado um material que forma cavaco contínuo, utilizando ferramenta de aço rápido e metal duro, o movimento do cavaco na zona de aderência ocorre por cisalhamento do material do cavaco. Muito próximo da interface é formada uma zona de cisalhamento intenso, que é também chamada de zona de fluxo, demonstrada na Figura 6. Nessa zona, existe uma camada de material estacionário na interface cavaco-ferramenta, sendo que a velocidade de saída do cavaco aumenta à medida que a espessura é percorrida, apresenta um limite no final da zona de fluxo, se acaba a cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco se estabiliza e fica constante (DINIZ, COPPINI MARCONDES, 2000).

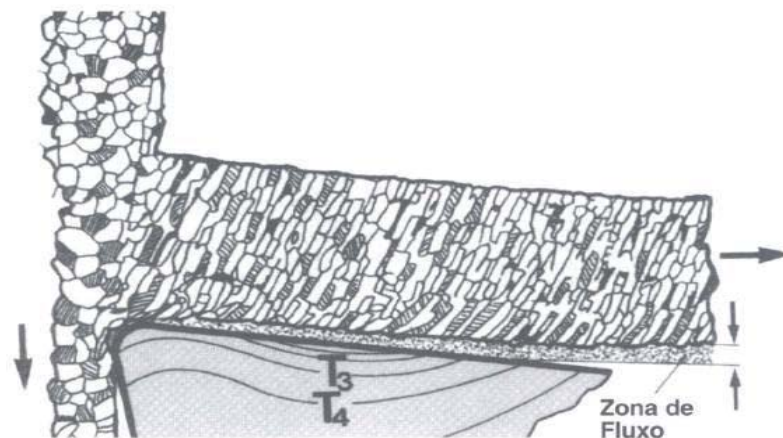


Figura 6 – Zona de fluxo dentro do cavaco (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

Segundo Wright (1979), o par ferramenta-peça que define as condições na interface, que pode ser de escorregamento ou de aderência. Altas velocidades de corte, longos tempos de usinagem e pequenas diferenças entre o material da peça e da ferramenta favorecem as condições de aderência. Condições de pequenos ângulos de saída da ferramenta aumentam a zona de contato da superfície de saída da ferramenta com o cavaco e desfavorecem de modo a

aumentar a zona de aderência, aumentando conseqüentemente as forças de usinagem e a temperatura de corte.

2.1.7 Controle de Forma do Cavaco

A aplicação de métodos e cuidados que compõem o controle da forma dos cavacos é feita levando em consideração alguns principais fatores como: a segurança do operador; possível dano à ferramenta e à peça; manuseio e armazenagem do cavaco; forças de corte, temperatura e vida da ferramenta. Os materiais que apresentam a característica de serem mais frágeis, como o ferro fundido e o latão, têm a forma do cavaco mais curto, o cavaco se lasca com uma maior frequência. O contrário acontece para materiais mais dúcteis que formam cavacos helicoidais e contínuos, tendo como desvantagem fatores como: manuseio; perigo ao operador; perda de tempo produtivo devido à necessidade de parada da máquina para limpeza periódica. Alguns estudos têm sido feitos no sentido de aumentar a capacidade de quebra dos cavacos de materiais dúcteis (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

A melhor classificação dos cavacos existente no que diz respeito às formas e tipos de cavaco podem ser definidos quanto ao tipo e quanto à forma (FERRARESI, 1977).

Quanto ao tipo:

- Cavaco contínuo;
- Cavaco de cisalhamento;
- Cavaco de ruptura.

Quanto à forma:

- Cavaco em fita;
- Cavaco helicoidal;
- Cavaco espiral;
- Cavaco em lascas ou pedaços.

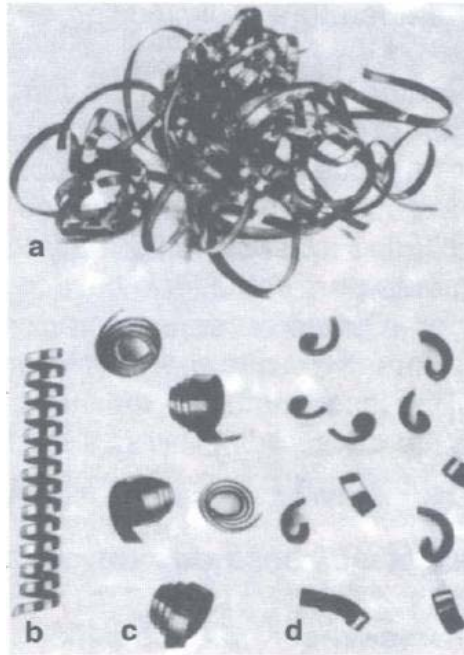


Figura 7 – Tipos de forma do cavaco (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

São demonstrados na Figura 7 os tipos de forma de cavaco, segundo Diniz, Coppini, Marcondes (2000). Os cavacos em forma de fita e em forma helicoidal são os tipos mais perigosos, apresentando risco e desvantagens conforme citado anteriormente.

2.1.8 Forças e Potências de Corte

As forças de usinagem são consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta, sendo que a força total atuante é chamada de força de usinagem (F_u) e atua sobre a cunha cortante durante a usinagem. Diversos parâmetros influenciam na direção e no sentido da força de usinagem, sendo assim, se trabalha com a força de usinagem propriamente dita, e suas componentes são projetadas em diversas direções conhecidas (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

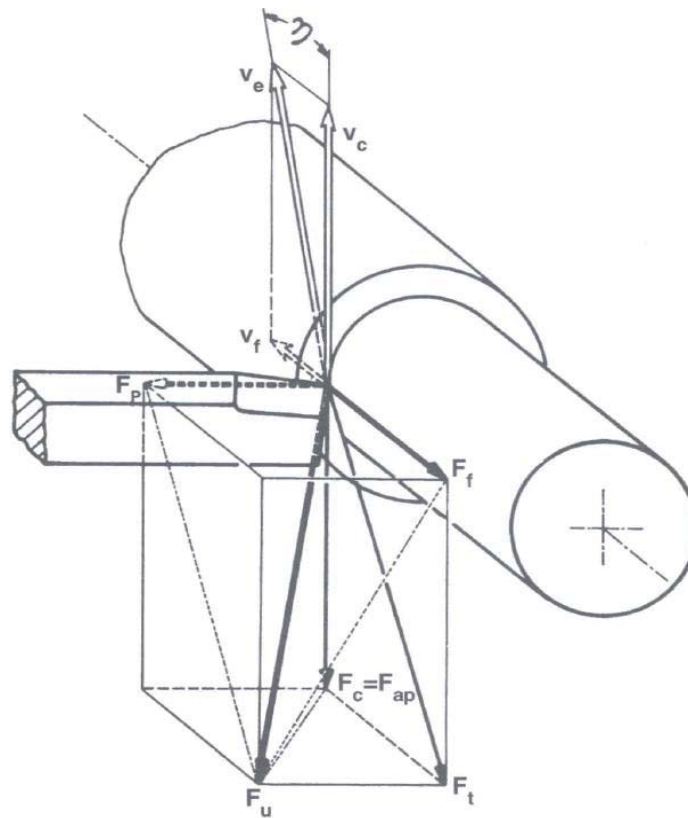


Figura 8 – Forças de usinagem em um torneamento e suas componentes (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

Na Figura 8 são demonstradas algumas forças derivadas da força de usinagem juntamente com suas respectivas descrições (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000):

- Força ativa (F_t) – consiste na componente da força de usinagem no plano de trabalho, contribui para a potência de usinagem, devido sua localização se apresentar no plano de trabalho.

- Força de corte (F_c) – se localiza no plano de trabalho e consiste da projeção da força de usinagem sobre a direção de corte.

- Força de avanço (F_f) – se localiza no plano de trabalho e consiste da projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço.

- Força de apoio (F_{ap}) - se localiza no plano de trabalho e consiste da projeção da força de usinagem sobre a direção perpendicular a direção de avanço.

- Força passiva ou de profundidade (F_p) – se localiza em um plano perpendicular ao plano de trabalho e consiste na componente da força de usinagem neste plano. Devido a sua localização ser perpendicular ao plano de usinagem, a força de profundidade não contribui para a potência de usinagem, e é a responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte, conseqüentemente é também responsável pela dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e de dimensões de pequenos valores.

Segundo Diniz, Coppini, Marcondes (2000), no caso da operação de torneamento, é possível observar que a força de corte é igual à força de apoio, conforme demonstrado na figura 8, o mesmo não acontece em outros tipos de operações como o fresamento. A força de corte depende da pressão específica de trabalho e da área da seção de corte.

Alguns fatores influenciam na pressão específica de corte, tais como: material da peça; material e geometria da ferramenta; seção de corte; velocidade de corte; condições de lubrificação e refrigeração; estado de afiação da ferramenta. Alguns fatores influenciam nas forças de avanço e de profundidade, tais como: raio de ponta da ferramenta; ângulo de posição; ângulo de inclinação. É possível salientar que à medida que o raio da ponta da ferramenta aumenta, tem-se um aumento considerável na força de profundidade e conseqüentemente um decréscimo na força de avanço (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

2.2 Ferramentas de Corte

2.2.1 Propriedades das Ferramentas de Corte

A utilização de um material mais duro para a ferramenta com relação ao material da peça a ser usinada, ou seja, a ferramenta apresenta uma dureza relativa maior do que a da peça, esse modo é um dos tipos de operação mais encontrada entre os processos de fabricação existentes. Para tanto, é associável que, para que seja possível o desenvolvimento e criação de novas ligas estruturais com propriedades melhores no que se diz respeito à dureza, e resistência mecânica em processos de alta temperatura conseqüentemente tem um desenvolvimento com relação à dureza e resistência dos materiais das ferramentas. As ferramentas de corte desempenham um papel fundamental no

aspecto econômico e também no resultado final de acabamento superficial e medidas obtidas na peça (DINIZ, 2008).

O desenvolvimento das ferramentas constitui duplo aperfeiçoamento de duas propriedades que apresentam certa discordância, que são a tenacidade e a dureza. A obtenção de bons resultados é encontrada quando se tem um balanço entre as duas propriedades, motivação a muitos desafios encontrados atualmente. Tal motivação pode ser confirmada visto que é encontrada uma variedade de ferramentas com diversas combinações entre os valores de tenacidade e dureza, sendo obtidas através de diferentes composições químicas, controle nos processos de fabricação, tratamento térmico e tamanho de grãos.

Na Figura 9 são apresentados, segundo Mehrotra (1998), os materiais de cortes mais comuns para a usinagem de ligas metálicas, sendo classificada pela sua resistência a deformação térmica e também pela sua tenacidade à fratura. Cada área correspondente a um tipo de ferramenta representa a faixa na qual essa ferramenta trabalha com relação aos fatores tenacidade e resistência a deformação térmica, é observável que a cerâmica só perde para o diamante com relação a resistência quente, e ainda é melhor do que o mesmo no que diz respeito a resistência a fratura.

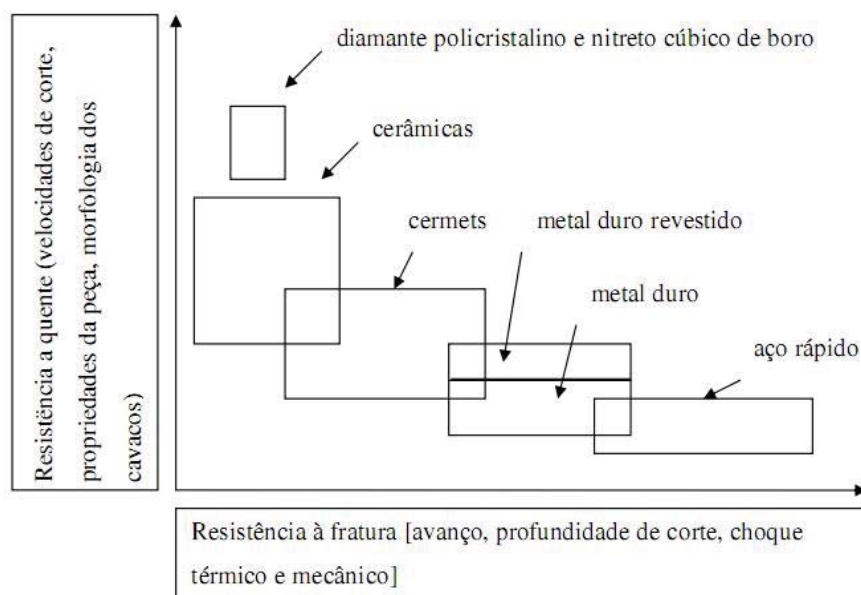


Figura 9 - Materiais de corte mais comuns para usinagem de ligas metálicas (MEHROTRA, 1998).

Segundo Shaw (1994), o que mais influência na temperatura durante a usinagem é a velocidade de corte, portanto quanto maior a velocidade de corte, maior deve ser a resistência à deformação à quente do material utilizado na ferramenta, de modo a proporcionar uma vida conveniente para a pastilha. Também tem a solicitações mecânicas que crescem na ferramenta, relacionadas a fatores como: profundidade de corte; choque térmico; avanço; choque mecânico. Deste modo, o material da ferramenta deve apresentar uma resistência à fratura crescente.

2.2.2 Histórico e Classificação das Ferramentas de Cerâmica

Tem-se registrado por literaturas que o material cerâmico é utilizado como ferramenta de usinagem desde 1950, quando teve o início de sua utilização, apresentando alto percentual de uso por volta de 1980 após susceptíveis desenvolvimentos visando as propriedades mecânicas e químicas da cerâmica. O material cerâmico apresenta propriedades que podem ser muito interessantes para determinadas aplicações específicas de usinagem, tais como: dureza a quente e a frio; é resistente ao desgaste; tem excelente estabilidade química que faz com quem evite a difusão, fato muito importante para usinagens a altas velocidades e temperaturas. Também apresenta algumas propriedades que lhe são desfavoráveis, tais como: baixa condutividade térmica, diminuindo a transferência de calor fazendo com que a região próxima da interface cavaco-ferramenta e peça-ferramenta atinjam temperaturas muito altas; outra característica é a baixa tenacidade, que facilita o trincamento ou quebra da ferramenta, sendo responsável pelo atraso da inserção do mesmo no mercado. Nos últimos anos tem sido feitos grandes esforços de desenvolvimento e melhoria de tenacidade, bons resultados tem ido obtidos (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

Segundo Diniz, Coppini, Marcondes (2000) as ferramenta de cerâmica são classificadas em:

- a) À base de óxido de alumina – se dividem em classes distintas, cerâmicas mistas, alumina reforçada com “whiskers” e cerâmicas puras, também chamadas de cerâmicas brancas, pelo fato de apresentar a cor branca após serem prensadas a frio. Quando é feito o processo prensando a quente, a cor após o processo se torna cinza. A cerâmica ditas puras são constituídas de óxidos, podendo ser de: alumina pura, constituída de

finos grãos de Al_2O_3 sinterizados podendo apresentar algum teor de MgO para inibir o crescimento do grão e para inibir a oxidação do cromo; titânio e níquel que aumentam a resistência mecânica; alumina com baixos percentuais de ZrO_2 que aumenta a tenacidade do material. As cerâmicas mistas contém, além de alumina, ou TiC ou TiN . A alumina classificada como reforçada com “whiskers” é constituída da inclusão de monocristais (“whiskers”) em uma matriz cerâmica de Al_2O_3 .

- b) CERMETS – apresentam uma estrutura semelhante com a do metal duro, constituindo-se de partícula de cerâmica e de metal, por isso o nome, que são ligadas por um aglomerante. As partículas duras são TiC , TiN ou TiCN , e tendo geralmente como elemento de ligação geralmente o Ni . Podendo ser recoberta com TiN , o que reforça o coeficiente de atrito e a tendência a formação da aresta postiça de corte.
- c) À base de nitreto de silício, que é o que se refere o estudo do trabalho – são cristais de Si_3N_4 com uma fase intergranular de SiO_2 que são sinterizados na presença da alumina, chamada de Sialon, e/ou Y_2O_3 e MgO .

2.2.3 Propriedades das Ferramentas de Cerâmica a base de Nitreto de Silício

Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2000), as ferramentas a base de nitreto de silício são ótimos em termos de resistência ao choque térmico e são bons com relação a tenacidade, porem são péssimos com relação a estabilidade química, sendo mais utilizada em materiais frágeis de cavacos curtos como o ferro fundido, aços de alta dureza e ligas de níquel, não causando difusão na superfície de saída da ferramenta. Utilizadas principalmente em desbastes, onde necessita da dureza a quente e resistência ao choque térmico, ou em fresamento onde necessita de resistência ao choque térmico e tenacidade.

Segundo Motaghaci (1996), a ferramenta de nitreto de silício mantém sua dureza estável a temperaturas que podem chegar a ate 1200°C , de importante utilização em usinagens de altas velocidades de corte a seco.

Dentro do grupo de ferramentas a base de nitreto de silício temos as ferramentas chamadas SiAlONs, o termo SiAlONs tem origem devido aos elementos que o formam, que são: Si , Al , O e N e apresentam algumas características um pouco diferente das ferramentas de nitreto de silício, pois o oxigênio faz com que apresente um comportamento intermediário entre as cerâmicas a base de óxido e as covalentes (JACK, 1986).

Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2000), pelo fato do material cerâmico apresentar certa fragilidade, algumas medidas preventivas devem ser tomadas antes do início da operação de usinagem, a fim de evitar a quebra ou o lascamento da aresta postiça de corte, tais como: realizar um chanfro na peça antes da operação para que o primeiro contato da ferramenta com a peça aconteça de modo mais suave; a própria pastilha de cerâmica deve possuir um chanfro na aresta de corte, com uma dimensão variando de 0,05mm a 0,3mm a ângulos variando de 20° a 30°.

É apresentado no Quadro 1, segundo Diniz, Coppini, Marcondes (2000), algumas propriedades de diversos materiais cerâmicos diferentes, quando comparados ao metal duro.

Quadro 1– Propriedades relativas do material cerâmico em comparação com o metal duro, (adaptada de DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

	Tenacidade	Dureza a Quente	Resistência ao Choque Térmico	Estabilidade Química (Fe)	Estabilidade Química (Ni)
Cerâmica Pura	2	2	1	5	5
Cerâmica Mista	1	3	2	4	4
Cerâmica com Whiskers	4	3	3	2	3
Sialon	3	5	4	1	2
Metal Duro	5	1	5	3	1

2.3 Ligas de Níquel

2.3.1 Características das Ligas a Base de Níquel

As superligas a base de níquel estão entre os materiais selecionados nos projetos para aplicação de longos períodos em atmosferas com alto índice de corrosão e oxidação, a temperaturas superiores a 650°C, sendo o segundo maior demandante de nióbio, perdendo somente para a indústria do aço (MENDES, 2005).

Segundo Lopez de Lacalle et al, (1998), o custo relacionado a peças de ligas de níquel que necessitam de etapas de usinagem durante o processo de fabricação é alto, maior do que

processos convencionais de usinagem, principalmente com relação ao custo hora/máquina, visando esse fato, é buscado a diminuição do tempo efetivo de usinagem, conseqüentemente aumentando o uso efetivo da ferramenta. Segundo Vilella (1988), a redução destes tempos de usinagem pode ser feita com a escolha correta de fatores como: ferramenta; avanço; profundidade de corte, de acordo com a capacidade da máquina juntamente com a ferramenta; utilização adequada do fluido de corte quando necessário entre outros. Com relação a velocidade de corte é possível destacar sua capacidade de aumentar a taxa de remoção do cavaco também reduzindo o tempo de usinagem.

Por outro lado, tal aumento na velocidade de corte tem direta influência negativa na vida da ferramenta, principalmente no torneamento de superligas, aumentando o tempo de produção devido ao maior número necessário de trocas de ferramenta. Segundo Diniz (2008), a velocidade para a qual os tempos de usinagem e de troca de ferramenta somados são mínimos consiste na velocidade máxima de produção ($V_{m\text{xp}}$), chegando a um equilíbrio entre os efeitos positivos e negativos.

Segundo Di Ramo et al, (2001) a necessidade da busca pelo amplo conhecimento das particularidades do processo se associa diretamente com a crescente necessidade devido a importância de materiais não ferrosos entre as indústrias. Tais desafios são enfrentados pela engenharia de fabricação, obtendo como resultado a introdução de materiais mais precisos, de menor peso, de maior confiabilidade operacional, de menor tamanho e peças de baixo custo.

Para exemplificar a importância das ligas a base de níquel, em um processo de fabricação de um motor para uma aeronave, dentre o total de materiais utilizado, uma faixa de 45 a 50% de materiais são base de ligas de níquel, por qualquer que seja o processo de obtenção do mesmo, devido principalmente ao fato de ser resistente a corrosão e à fadiga a temperaturas superiores a 650 °C.

Na Figura 10 é apresentado, segundo Ezugwu et al. (1999), as ligas a base de níquel, juntamente com suas respectivas percentagens dos elementos de liga que as constituem. Alguns elementos tendem a melhorar a microestrutura ou a fase da liga, na proporção adequada.

Liga	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Cb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	B	Zr	outros	densidade (g.cm ⁻³)
Astrolloy	55.1	15.0	17.0	5.25	—	—	—	4.0	3.5	—	—	—	0.06	0.030	—	—	—
D-979	45.0	15.0	—	4.0	4.0	—	—	1.0	3.0	27.0	—	—	0.05	0.010	—	—	—
Hastelloy alloy X	47.3	22.0	1.5	9.0	0.6	—	—	—	—	18.0	0.50	0.50	0.10	—	—	—	8.22
Inconel alloy 600	76.6	15.8	—	—	—	—	—	—	—	7.2	0.20	0.20	0.04	—	—	—	8.33
Inconel alloy 601	60.7	23.0	—	—	—	—	—	1.35	—	14.1	0.50	0.25	0.05	—	—	—	8.04
Inconel alloy 625	61.6	22.0	—	9.0	—	—	4.0	0.2	0.2	3.0	0.15	0.30	0.05	—	—	—	8.44
Inconel alloy 706	41.5	16.0	0.5	0.5	—	—	2.9	0.2	1.75	40.0	0.18	0.18	0.03	—	—	—	8.08
Inconel alloy 718	53.0	18.6	—	3.1	—	—	5.0	0.4	0.9	18.5	0.20	0.30	0.04	—	—	—	8.19
Inconel alloy X-750	73.0	15.0	—	—	—	—	0.9	0.8	2.5	6.8	0.70	0.30	0.04	—	—	—	8.30
IN-102	67.9	15.0	—	3.0	3.0	—	3.0	0.4	0.6	7.0	—	—	0.06	0.005	0.03	0.02 Mg	8.55
IN-587	47.2	28.5	20.0	—	—	—	0.7	1.2	2.3	—	—	—	0.05	0.003	0.05	—	8.08
IN-597	48.4	24.5	20.0	1.5	—	—	1.0	1.5	3.0	—	—	—	0.05	0.012	0.05	0.02 Mg	8.04
IN-853	74.6	20.0	—	—	—	—	—	1.5	2.5	—	—	—	0.05	0.007	0.07	1.3 Y ₂ O ₃	8.09
M-252	55.2	20.0	10.0	10.0	—	—	—	1.0	2.6	—	0.50	0.50	0.15	0.005	—	—	8.25
Nimonic alloy 75	78.8	20.0	—	—	—	—	—	—	0.4	—	0.10	0.70	0.01	—	—	—	8.37
Nimonic alloy 80A	74.7	19.5	1.1	—	—	—	—	1.3	2.5	—	0.10	0.70	0.06	—	—	—	8.22
Nimonic alloy 90	57.4	19.5	18.0	—	—	—	—	1.4	2.4	—	0.50	0.70	0.07	—	—	—	8.18
Nimonic alloy 105	53.5	14.5	20.0	5.0	—	—	—	1.2	4.5	—	0.50	0.70	0.20	—	—	—	7.99
Nimonic alloy 115	57.3	15.0	15.0	3.5	—	—	—	5.0	4.0	—	—	—	0.15	—	—	—	7.85
Nimonic alloy PE.11	39.0	18.0	1.0	5.25	—	—	—	0.85	2.35	33.5	—	—	0.05	—	—	—	8.02
Nimonic alloy PE.16	43.5	16.5	1.0	3.3	—	—	—	1.2	1.2	33.0	0.10	0.15	0.05	0.020	—	—	8.02
Nimonic alloy PK.33	55.9	18.5	14.0	7.0	—	—	—	2.0	2.0	0.25	0.10	0.15	0.05	0.030	—	—	8.21
Nimonic alloy 120	63.8	12.5	10.0	5.7	—	—	—	4.5	3.5	—	—	—	0.04	—	—	—	7.95
Nimonic alloy 942	49.5	12.5	1.0	6.0	—	—	—	0.6	3.9	27.5	—	—	0.03	—	—	—	8.12
Pyromet 860	43.0	12.6	4.0	6.0	—	—	—	1.25	3.0	30.0	0.05	0.05	0.05	0.010	—	—	8.23
RA-333	45.0	25.5	3.0	3.0	3.0	—	—	—	—	18.0	1.50	1.20	0.05	—	—	—	8.25
Rene' 41	55.3	19.0	11.0	10.0	—	—	—	1.5	3.1	—	—	—	0.09	0.005	—	—	8.25
Rene' 95	61.3	14.0	8.0	3.5	3.5	3.5	—	3.5	2.5	—	—	—	0.15	0.010	0.05	—	8.23
TD nickel	98.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0 ThO ₂	8.90
TD nic	78.0	20.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0 ThO ₂	8.41
Unimet 500	53.6	18.0	18.5	4.0	—	—	—	2.9	5.9	—	—	—	0.08	0.006	0.05	—	8.02
Unimet 520	56.9	19.0	12.0	6.0	1.0	—	—	2.0	3.0	—	—	—	0.05	0.005	—	—	8.22
Unimet 700	53.4	15.0	18.5	5.2	—	—	—	4.3	3.5	—	—	—	0.08	0.030	—	—	7.91
Unimet 710	54.9	18.0	15.0	3.0	1.5	—	—	2.5	5.0	—	—	—	0.07	0.020	—	—	8.08
Unitemp AF2-1DA	59.5	12.0	10.0	3.0	6.0	1.5	—	4.6	3.0	—	—	—	0.32	0.015	0.10	—	7.99
Waspaloy	58.3	19.5	13.5	4.3	—	—	—	1.3	3.0	—	—	—	0.08	0.006	0.06	—	8.19

Figura 10 - Composição Química Nominal (% peso) e densidade – liga forjada a base de níquel (adaptado de Ezugwu et al, 1999).

A matriz das ligas a base de níquel é austenítica e continua com estrutura cúbica de fase centrada (CFC) que é chamada de fase gama (γ), que na maioria das vezes, contém um alto teor de elementos em solução como cobalto, molibdênio e tungstênio. A adição de elementos como alumínio e titânio em iguais proporções possibilita a precipitação de um elevado volume da fase primária γ , tal precipitação ocorre de forma coerente com a matriz austenítica. De acordo com Santos (1993), os nitretos e os carbonitretos se formam durante a solidificação e não se alteram durante o restante do processo, aparecem principalmente pela dificuldade de eliminação do nitrogênio durante o processo de fabricação das ligas de níquel. Apesar da baixa fração volumétrica do nitrogênio ocorre a formação de nitreto de titânio (TiN) devido a alta afinidade de um pelo o outro.

De acordo com Shuangqun et al (2004), são utilizadas técnicas de tratamento térmico para a formação da fase primária gama (γ), nos contornos de grãos elevando a tensão de ruptura do material. Em relação ao aspecto estrutural durante o processamento das ligas de níquel alguns tipos de carbetos apresentam diferentes comportamentos, dentre os quais são explicados conforme segue:

- ➔ **Carbetos tipo MC:** são estáveis, os carbetos são dissolvidos completamente em temperaturas superiores a 1250 °C, a precipitação pode ocorrer no resfriamento, por um trabalho a quente ou através de um envelhecimento isotérmico na faixa de 700 °C a 800 °C. A sigla “M” esta relacionada com o nióbio ou com o titânio.
- ➔ **Carbetos do tipo M_6C e $M_{23}C_6$:** se precipitam durante a solidificação a baixas temperaturas ou sobtensões combinadas, preferencialmente nos contornos de grãos. A sigla “M” esta relacionada com o cromo.

Ainda segundo Shuangqun et al, (2004), para superligas, alterações significativas na microdureza ocorrem com a alteração da temperatura de envelhecimento. Porém para intervalos de tempo diferentes utilizando uma mesma temperatura, a alteração acontece de modo bem menos significativo, observando que esses materiais mantêm as propriedades mesmo durante longos períodos de trabalho. Na Figura 11, adaptada de Shuangqun et al (2004), é demonstrado como varia a microdureza em relação ao tempo em horas para três diferentes temperaturas de tratamento.

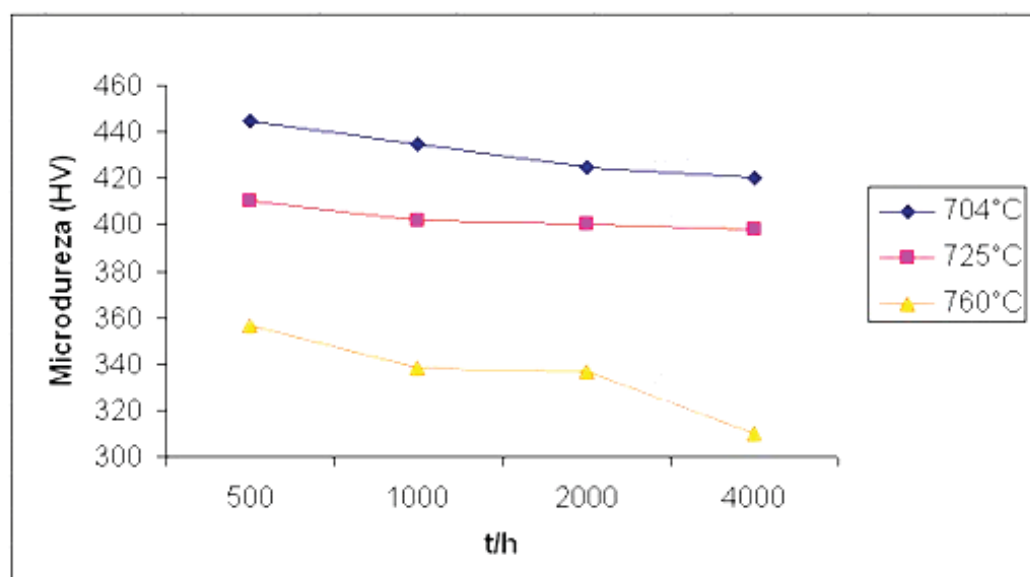


Figura 11 – Variação da microdureza em função do tempo de envelhecimento em três diferentes temperaturas (adaptada de Shuangqun et al, 2004).

2.3.2 Usinagem das Ligas a Base de Níquel

Para melhor entendimento sobre os conceitos de usinagem de ligas a base de níquel é necessário a introdução do termo usinabilidade. Segundo Weingaertner et al, (1994), a usinabilidade pode ser definida pela composição dos elementos de liga e pelo estado da estrutura do material, diretamente relacionado com o grau de dificuldade encontrada de se usinar o material. É normalmente analisada com relação a quatro critérios sendo eles: vida da ferramenta; forças de corte; formação de cavacos e qualidade superficial. A usinabilidade exerce uma grande influência quando se fala de custo final de produção e produtividade, servindo como indicador para que seja dada atenção não só aos desenvolvimentos relacionados às propriedades mecânicas, química e física, mas também ao comportamento do material quando submetido a algum tipo de processo de fabricação, objetivando que os materiais possam, através das técnicas existentes, sofrer operações de processamento do ponto de vista econômico e prático.

É relacionado no Quadro 2, adaptada de Witting (2002), as superligas de níquel com a usinabilidade, o qual classifica as superligas em grupos de acordo com sua estrutura e composição, onde o grupo 1 se refere a ligas de fácil remoção de cavaco, o grupo 3 se relaciona a ligas de média dificuldade de remoção de cavaco, já o grupo 5 representa as ligas de difícil remoção de cavaco. A tendência de compactação a frio e a alta resistência da estrutura são fatores cruciais para a determinação da vida da ferramenta.

Quadro 2- Classificação das ligas em relação ao grupo de usinabilidade (adaptada de WITTING, 2002).

Grupo	1	2	3	4	5
Exemplos de ligas	Ligas de Ni-Cu do grupo principal	Ligas não temperáveis	Ligas temperáveis	Ligas fundidas de alta resistência ao calor	
	Monel 400	Hastelloy B	Inconel 718	Nimonic 90	
	Monel 401	Hastelloy X	Inconel X750	Rene 41	
	Monel 404	Inconel 600	Waspalloy	Udimet 500	
	Monel 405	Inconel 601	---	Udimet 700	
	---	Nimoic80A	---	---	

Segundo Showdhury et al (1998), os materiais como as ligas de níquel são resistentes a altas temperaturas, apresentam uma condutividade térmica pequena, fazendo com que quando em um processo de usinagem com remoção de cavaco, apresentam uma concentração de calor na região de corte e temperaturas mais elevadas, o controle de formação do cavaco e sua quebra se tornam mais difíceis.

Em relação à carga de trabalho, durante a remoção do cavaco, as superligas apresentam diferenças em relação a usinagem de um material comum como o aço por exemplo. Segundo Witting (2002), é necessário ferramentas especiais para a usinagem de superligas devido a sua estrutura especial. É demonstrado na Figura 12, adaptada de Witting (2002), uma comparação da formação dos cavacos em relação a zona de contato, entre um torneamento de um aço e um torneamento de um material resistente a alta temperatura.

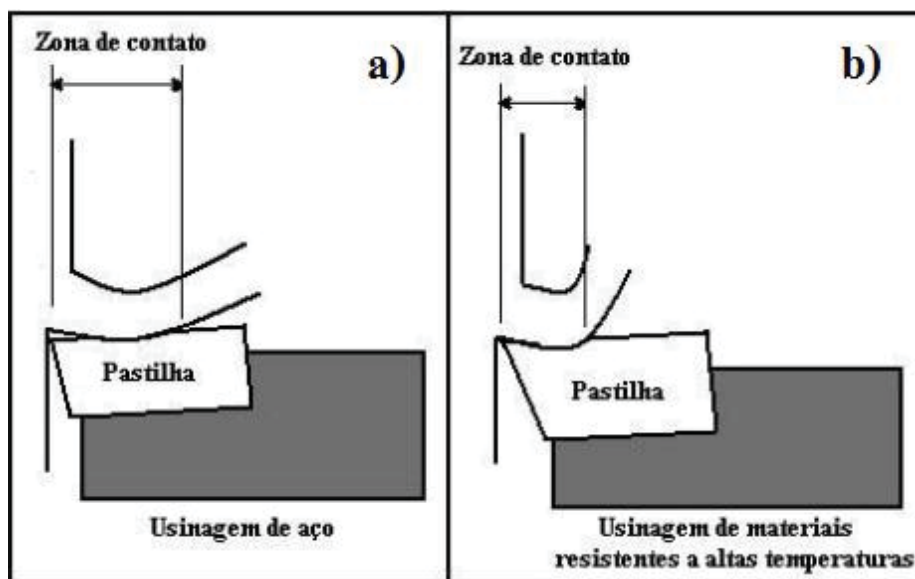


Figura 12 - Cargas geradas na aresta de corte: (a) usinagem de aço; (b) usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas, adaptado de Witting (2002).

Segundo Witting (2002), para a usinagem de um material como o aço que apresenta maior facilidade de usinagem, a área de contato de aresta de corte da ferramenta com o material da peça é maior e mais estável, os cavacos são arrancados da peça com um raio relativamente grande, conseqüentemente recebe uma força menor de corte. Em contradição, na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas que apresentam grandes dificuldades de usinagem, a área de contato da aresta de corte é menor, a ação da força de corte faz com que a deformação ocorra diretamente na aresta de corte, sendo transformada a energia necessária para a deformação da estrutura e cisalhamento dos cavacos diretamente para a aresta principal de corte. Segundo Choudhury et al, (1998), o controle de formação e de quebra dos cavacos se torna de alta dificuldade, visto que os materiais resistentes a altas temperaturas apresentam uma condutividade térmica menor, aumentando a temperatura e a concentração de calor na região de corte durante a formação do cavaco.

Com a finalidade de complementar no ponto de vista prático as informações a respeito do comportamento durante a usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas, é apresentado a seguir um exemplo, segundo Ezugwu et al (1997), da distribuição do calor na usinagem de uma liga de titânio ($TiAl_6V_4$), a Figura 13 que segue demonstra que por volta de 80% do calor gerado não pode ser removido com o fluxo do cavaco, calor que ficou retido na

ferramenta. A curva de distribuição de temperatura do aço é demonstrada para comparação, podendo verificar que o mesmo apresenta uma absorção de 50% na ferramenta.

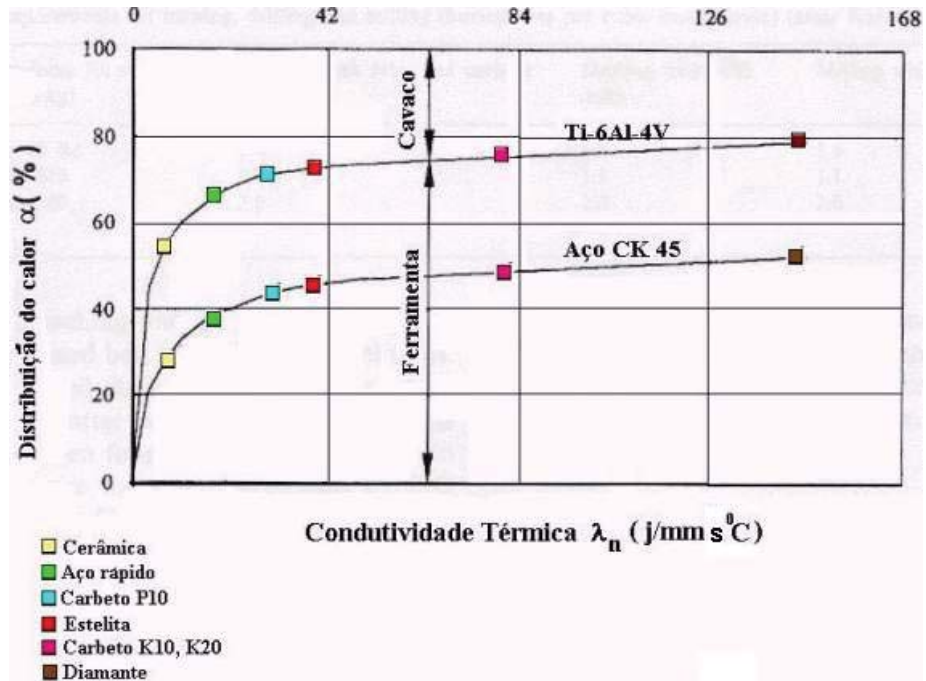


Figura 13 – Perfil de distribuição da temperatura na usinagem de titânio e aço (EZUGWU, et al 1997).

Segundo Witting (2002), convencionalmente é feito a usinagem das ligas resistentes a altas temperaturas através de uma ferramenta de metal duro, da classe K, que em virtude das sobrecargas térmicas e dinâmicas elevadas apresenta uma vida útil curta. As velocidades de corte ficam entre 30 e 60 m/min dependendo do tipo de liga, porém as arestas de corte que apresentam cantos vivos possibilitam um fácil cisalhamento do material, o que reduz a tendência de encruamento do material.

Um revestimento adequado na ferramenta de corte pode aumentar sua vida útil, para metal duro existem algumas classes de revestimentos tais como: óxido de alumínio (Al_2O_3); nitreto de titânio (TiN); carbetto de titânio (TiC); nitreto de alumínio-titânio (TiAlN).

Segundo Witting (2002), o revestimentos mais resistente a oxidação é o Al_2O_3 porém sua dureza é pequena. O revestimento TiC apresenta a maior dureza, que se reduz a altas temperaturas. O revestimentos mais indicado para usinagem de ligas a base de níquel é o TiAlN, devido ao equilíbrio dos fatores dureza com resistência ao desgaste por calor.

2.3.3 Dificuldades na Usinagem das Ligas a Base de Níquel

A demanda pela usinagem das superligas com velocidades de corte e taxas de remoção de cavacos maiores tem sofrido um crescente aumento, tal demanda é decorrente da alta dificuldade encontrada para usinar esses materiais. O foco das melhorias é, conseqüentemente, o aumento da produtividade e a diminuição dos custos relacionados a usinagem (KITAGAWA, et al 1997).

Segundo Thakur et al (2009), os tipos de ligas a base de níquel utilizados na indústria aeroespacial estão dentro dos materiais classificados como de maior dificuldade de usinagem, as ligas a base de níquel apresentam como propriedade significativa, naturalmente visada nos processos de desenvolvimento no material, a manutenção da alta resistência mecânica e química a altas temperaturas. As forças de corte das ligas a base de níquel são bastante superiores as forças de corte de um aço, também apresentam uma área de contato menor da ferramenta com a peça, originando elevadas tensões na interface cavaco-ferramenta.

Segundo Witting et al (2002), até a década passada, a usinagem das ligas resistentes a altas temperaturas significava grandes desgastes das ferramentas e pequenas taxas de remoção de cavacos. Metal duro com granulações muito finas de cerâmica de corte avançadas e também de materiais de corte de nitreto de boro policristalino tem sido utilizado de forma discreta, havendo a expectativa com relação a: aumento da eficiência; redução significativa nos tempos de usinagem; ganhos na forma da peça.

Materiais aeroespaciais, dentre os quais se encaixam as ligas de níquel e de titânio, apresentam grandes dificuldades de usinabilidade devido às suas ótimas qualidades químicas e mecânicas em altas temperaturas, conforme já mencionado, as ferramentas utilizadas para usinar tais ligas devem possuir adequada dureza a quente devido as altas temperaturas geradas pelas altas velocidades de corte. Algumas falhas típicas são observadas quando se usina essas ligas, tais como: desgaste de flanco; desgaste de cratera; falhas catastróficas, e outros, causando um excessivo número de paradas da máquina para troca da ferramenta e também para o acerto dos parâmetros da máquina, conseqüentemente o tempo improdutivo é maior em relação a usinagem de outros materiais (EZUGWU et al, 2003).

Dentro dos processos de fabricação que envolve operações de usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas é comum que seja feito inicialmente o desbaste da superfície da

peça preferencialmente utilizando ferramentas que apresentem arestas arredondadas, arredondamento que aumenta o perímetro de contato, entre peça e ferramenta, e distribui os esforços e previne danos localizados, tendo em vista que a exigência com relação à integridade da superfície é mínima. O desbaste é feito até que a peça apresente dimensões próximas das finais, a usinagem é então interrompida e a peça é levada para tratamento térmico, de modo a obter a dureza e a estrutura desejada para o material, por último a peça retorna a área de usinagem onde é feito o acabamento, onde o compromisso com a integridade da superfície é maior. A utilização de pequenos arredondamentos nas arestas agudas das ferramentas de corte melhora o acabamento superficial, porém deixam a ferramenta mais frágil e susceptível à lascamentos.

Na operação de acabamento são eliminadas as imperfeições devido a distorções do tratamento térmico e obtendo a superfície e as dimensões desejadas na peça. Geometria de corte mais positiva deve ser utilizada nas operações de acabamento sempre que possível, pois além de remover o cavaco de maneira mais fácil diminuindo o encruamento da superfície, também auxiliam na diminuição do fenômeno da aresta postiça de corte. WITTING (2002).

A garantia da vida adequada da ferramenta, juntamente com a garantia de superfície acabada da liga resistente a altas temperaturas, com as propriedades desejadas podem ser feitas em conjunto, devendo se ter o controle dos principais parâmetros de usinagem, tais como: escolha correta do material e da geometria da ferramenta de corte; velocidades de corte e de avanço; profundidade de corte; método de usinagem e outros.

As operações de usinagem induzem efeitos que afetam alguns fatores estruturais e superficiais do material da peça, tais como: rugosidade superficial; modificações na dureza e na estrutura do material devido a usinagem em altas temperaturas; macro e micro trincas; tensões residuais de tração e de compressão; alterações químicas devido a altas temperaturas de trabalho, o que provoca difusão e oxidação entre os materiais da peça e da ferramenta. Tais efeitos são críticos para as superligas de níquel, tendo em vista que o material é utilizado em situações que de grande exigência técnica, o acabamento superficial fora do desejado pode ocasionar danos como fratura ou trinca por tensão de corrosão, fadiga e fluência, afetando naturalmente sua expectativa de vida em serviço. (EZUQWU et al, 1997; EZUQWU et al, 1999; VIGNEAU 1997).

Segundo Witting (2002), durante o torneamento, na zona de contato entre peça e ferramenta é formada elevadas pressões e temperaturas, quando se usina aços cerca de 75% do calor é retirado pelo próprio cavaco. Na usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas, o

calor que se retira pelo cavaco é pequeno, isso ocorre devido à baixa condutibilidade térmica das ligas. Elevadas temperaturas de usinagem de ligas, acima de 650 °C, podem ocasionar tensões indesejáveis na estrutura das peças. A velocidade de corte é um fator decisivo quando se fala de temperaturas e energia de usinagem, estudos têm sido feitos para tentar aumentar a média de utilização da velocidade de corte (na média de 60 m/min), a usinagem é ainda mais dificultada pelo encruamento da liga e pela formação da aresta postiça de corte, pela tenacidade da liga e pela formação desordenada de cavaco em forma de fitas e espirais.

Ao se tratar termicamente as ligas modificando suas propriedades, a usinagem é ainda mais dificultada, carbeto abrasivos precipitados são formados ou outros tipos de partículas de segunda fase. Para as ligas reforçadas por óxidos dispersos, partículas grandes e duras passam a fazer parte da estrutura da liga, tais partículas causam o rápido desgaste das arestas de corte da ferramenta, ocasionando um endurecimento superficial (baixa usinabilidade) durante a usinagem que aumenta com a profundidade de corte facilitando o aparecimento da aresta postiça de corte.

Segundo Ezugwu et al (2003), uma alta pressão térmica e mecânica é ocasionada devido à baixa usinabilidade das ligas de níquel, levando a deformações plásticas e acelerados desgaste da ferramenta, falhas típicas são observadas como: desgaste de flanco; desgaste de cratera; falha catastrófica e outros. Para adequada usinagem de tais ligas a ferramenta deve conter uma boa resistência a quente devido ao fato de trabalhar em altas temperaturas geradas durante a usinagem em altas velocidades de corte.

2.3.4 Características da Liga Inconel 718

A liga Inconel 718 é utilizada em ambientes onde temos como condições de operação a tendência da corrosão e oxidação do material, assim como da fadiga e o trabalho a temperaturas acima de 650°C. A mais importante das ligas a base de níquel é a Inconel 718, e apresenta em sua estrutura cerca de 5 a 5,5% de nióbio, o Brasil detém cerca de 90% das jazidas mundiais do nióbio, que é um material nobre e é utilizado para melhorar as características de resistência a fratura da liga, e também ajuda no aspecto intergranular, formando grãos menores e melhor distribuídos que são capazes de aumentar a capacidade de carga em utilização.

A liga Inconel 718 foi inicialmente desenvolvida com a finalidade de atender *turbofans* de aeronaves sendo estendida sua utilização para parafusos e eixos de rotor, formando atualmente a espinha dorsal de uma turbina de aeronave. Também tem sido utilizada para outros fins como a indústria nuclear, criogênica e petroquímica e em turbinas para geração de energia.

A demanda por sua utilização esta garantida, visto que sua maior utilização está nos fabricantes de motores de aeronaves, e é previsto uma crescente produção dos mesmos, foi criada uma expectativa de produção para entrega de 6 mil jatos comerciais de grande porte para os próximos 10 anos, os fabricantes dos motores de aeronaves tem como meta o desenvolvimento de deficiências atuais que existem como ruído e consumo exagerado de combustível, fatores decisivos para a escolha de uma determinada aeronave, tais desenvolvimentos visam o aumento da velocidade de rotação, que acarreta também no aumento da temperatura de operação, e também no aumento do coeficiente *by-pass*. Tais progressos somente são possíveis com as melhorias que têm sido obtidas nas tecnologias de fabricação das ligas a base de níquel, especialmente a liga Inconel 718.

Turbinas terrestres para geração de eletricidade estão em alta e se expandindo, sua eficiência é alta, cerca de 56 a 58%, e o aumento da temperatura de trabalho é propício para a utilização do Inconel 718. A empresa “*General Electric*” recentemente solucionou problemas associados a materiais expostos a condições de altas temperaturas com a substituição desses materiais por ligas a base de níquel do tipo Inconel 718 . Outros grupos industriais tem tido iniciativas para projetar sistemas de resfriamentos mais eficientes, que sejam possíveis dispensar a utilização das superligas.

Deste modo, a liga Inconel 718 é operável em condições de altas temperaturas e baixa densidade, que são pré-requisitos básicos para sua utilização em motores de aeronaves, podendo trabalhar a temperaturas que cheguem até a 85% da sua temperatura de fusão, temperatura na qual impõe um limitante natural para sua operação.

3. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1 Materiais

3.1.1 Corpo de Prova INCONEL 718

O material utilizado como corpo de prova na realização do ensaio foi a liga a base de níquel INCONEL 718, para fins aeronáuticos, que foi cedido pela Empresa Villares Metals, demonstrado na figura 14, tendo inicialmente a forma cilíndrica de comprimento de 300 mm e diâmetro externo de 80 mm, com dureza média inicial de 24 HRC. Para a medição da dureza foi utilizado um durômetro digital Future Tech modelo LC-200RB do SENAI de Taubaté – SP mostrado na Figura 17.



Figura 14 - Representação do corpo-de-prova

A composição química do INCONEL 718, segundo o site da Villares Metals, é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 - Composição química nominal da liga INCONEL 718.

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Fe</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>Nb</i>	<i>Mo</i>
0,03 % máx.	0,1 % máx.	0,1 % máx.	18,5 %	53 %	Rest.	1,0 %	0,5 %	5,1 %	3,0 %

3.1.2 Tratamento Térmico do INCONEL 718

A liga de níquel INCONEL 718 foi posteriormente submetida a tratamentos térmicos de solubilização seguido de precipitação, com a finalidade de aumentar sua dureza.

Para a realização do tratamento térmico de solubilização foi utilizado um forno da Faculdade de Tecnologia em Metalurgia do SENAI de Osasco “Nadir Dias de Figueiredo”, o forno é resistivo fabricado pela Brasimet, com capacidade para até 1200 °C mostrado na Figura 16. O tratamento térmico consistiu na permanência do INCONEL 718 por 3 horas a uma temperatura de 980 °C com posterior resfriamento a ar.

Para a realização do tratamento térmico de precipitação foi utilizado um forno também da Faculdade de Tecnologia em Metalurgia do SENAI de Osasco “Nadir Dias de Figueiredo”, o forno é resistivo fabricado pela Jung, com capacidade para até 1000 °C, mostrado na Figura 17. O tratamento térmico consistiu na permanência do INCONEL 718 por 8 horas a uma temperatura de 720 °C seguido de resfriamento lento dentro do próprio forno por 16 horas.

Após a realização dos tratamentos térmicos foi utilizado o mesmo durômetro digital Future Tech modelo LC-200RB do SENAI de Taubaté – SP mostrado na Figura 18, a dureza média final obtida foi de 46 HRC.

3.1.3 Ferramentas de Corte

Para o ensaio foi utilizado a pastilha de cerâmica à base de nitreto de silício (Si_3N_4) da SANDVIK de especificação técnica SNG 120408 T02520-6190 mostrada na Figura 15. A pastilha foi montada no suporte da SECO TOOLS de especificação CSBNR 2525M 12-4.

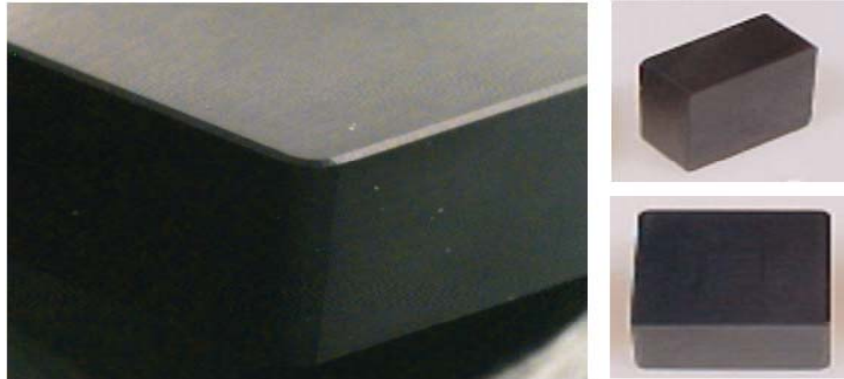


Figura 15– Ferramenta de corte utilizada no ensaio.

3.2. Equipamentos

3.2.1 Forno para Solubilização

Para a realização do tratamento térmico de solubilização foi utilizado um forno da Faculdade de Tecnologia em Metalurgia do SENAI de Osasco “Nadir Dias de Figueiredo”, o forno é resistivo e o fabricante é a Brasimet, com capacidade para até 1200 °C mostrado na Figura 16.

3.2.2 Forno para Precipitação

Para a realização do tratamento térmico de precipitação foi utilizado um forno da Faculdade de Tecnologia em Metalurgia do SENAI de Osasco “Nadir Dias de Figueiredo”, o forno é resistivo e o fabricante é a Jung, com capacidade para até 1000 °C mostrado na Figura 17.



Figura 16 – Forno utilizado para solubilização do INCONEL 718.



Figura 17 – Forno utilizado para precipitação do INCONEL 718.

3.2.3 Durômetro Digital

Para a medição da dureza foi utilizado um durômetro digital Future Tech modelo LC-200RB do SENAI de Taubaté – SP, mostrado na Figura 18.

3.2.4 Estereoscópio

Para a medição e análise das ferramentas de corte foi utilizado um estereoscópio Olympus SZ-TZ, ampliação de 25x do SENAI de Taubaté–SP, mostrado na Figura 19.



Figura 18 – Duromêtro digital utilizado para medir a dureza.



Figura 19 – Estereoscópio utilizado para registrar o desgaste nas ferramentas.

3.2.5 Torno CNC

Para os ensaios de usinagem foi utilizado um torno CNC Hardinge – Ergomat GS 200 / 66 – 30 KW, do SENAI de Taubaté, mostrado na Figura 20.



Figura 20 – Torno CNC utilizado para o ensaio.

3.3 Metodologia

Foram realizados ensaios de torneamento cilíndrico externo, partindo de um parâmetro inicial referente ao melhor resultado obtido na tese de mestrado de, Santos (2010), que consistiu na usinagem do mesmo material INCONEL 718 termicamente tratados juntos e que apresentaram a mesma dureza média final de 46 HRC. A diferença foi a utilização da ferramenta de corte, no trabalho de, Santos (2010), onde foram utilizadas pastilhas também a base de nitreto de silício desenvolvidas no trabalho de obtenção do título de doutor de SOUZA (2005).

Na Figura 21 são apresentados os desgastes obtidos nos ensaios de Santos (2010), bem como os parâmetros utilizados nos ensaios, e que serviram como parâmetro inicial para realização do trabalho.

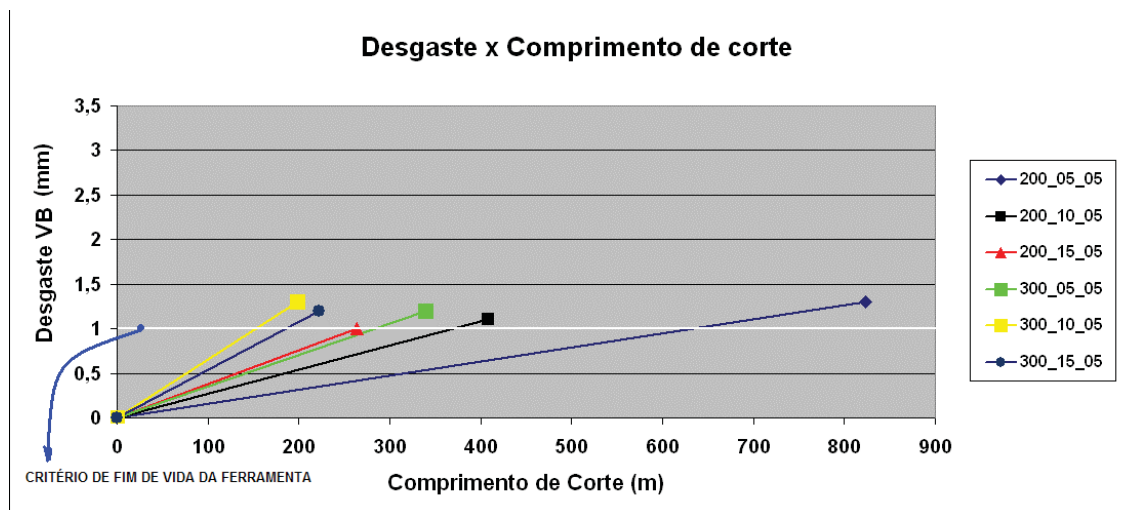


Figura 21 - Desgaste de flanco da ferramenta “Vb” x Comprimento de corte “Lc” (SANTOS, 2010).

É possível verificar que o maior comprimento de corte de aproximadamente 820 m, obtido por Santos (2010), foi para a velocidade de corte de 200 m/min, profundidade de corte de 0,5 mm e um avanço de 0,05 mm/rotação eo que resultou em um desgaste de flanco de 1,3 mm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O torno foi configurado nos parâmetros iguais ao melhor resultado obtido por SANTOS (2010) com velocidade de corte de 200 m/min, profundidade de corte de 0,5 mm e um avanço de 0,05 mm/rotação, foi realizado o chanframento, com outra ferramenta, da região de desbaste para evitar o choque mecânico. Foi dado início ao teste, a aresta da ferramenta apresentou desgaste instantâneo, não sendo possível nem estimar um comprimento de corte para a aresta.

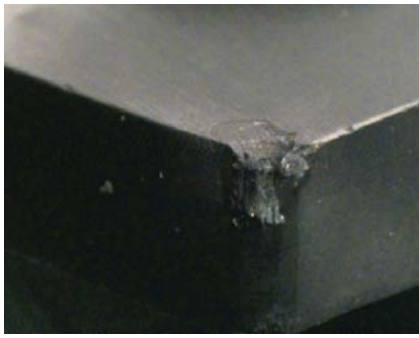
Em seguida foi diminuída a velocidade de corte pela metade, obtendo os parâmetros de usinagem com velocidade de corte de 100 m/min, profundidade de corte de 0,5 mm e um avanço de 0,05 mm/rotação. Foi dado início ao teste, a aresta da ferramenta apresentou novamente desgaste instantâneo, não sendo possível nem estimar um comprimento de corte para a aresta.

Novamente foi diminuída a velocidade de corte pela metade, obtendo os parâmetros de usinagem com velocidade de corte de 50 m/min, profundidade de corte de 0,5 mm e um avanço de 0,05 mm/rotação. Foi dado início ao teste, a aresta da ferramenta apresentou quebra prematura, não sendo possível nem estimar um comprimento de corte para a aresta.

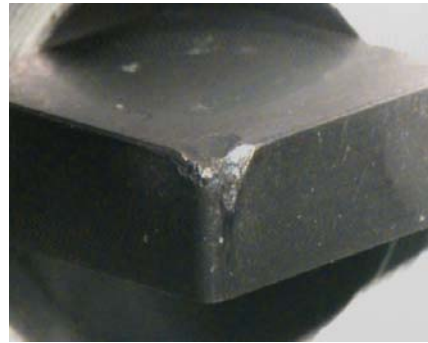
Por ultimo foi diminuída mais um pouco a velocidade de corte, obtendo os parâmetros de usinagem com velocidade de corte de 30 m/min, profundidade de corte de 0,5 mm e um avanço de 0,05 mm/rotação. Foi dado início ao teste, a aresta da ferramenta apresentou um comprimento de corte de 325 metros, com um respectivo desgaste de flanco de 1,2 mm tal resultado obtido não é mensurável para uma comparação com os resultados obtidos no trabalho de Santos (2010).

É demonstrado nas Figuras 22 e 23 como ficaram as arestas das ferramentas após a usinagem, com seus respectivos parâmetros de corte utilizados.

Nas Figuras 24 e 25 (Santos, 2010), são apresentadas as arestas das ferramentas relativas aos parâmetros apresentados na figura 21 com a finalidade de serem comparadas com as arestas da ferramenta comercial testada.

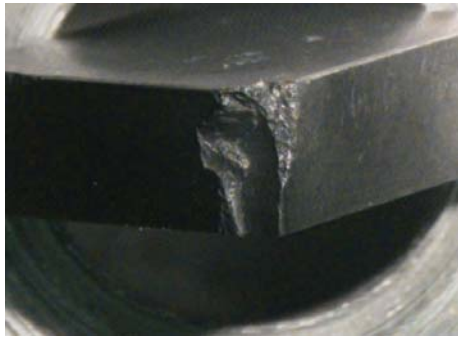


Condição - 200-05-05

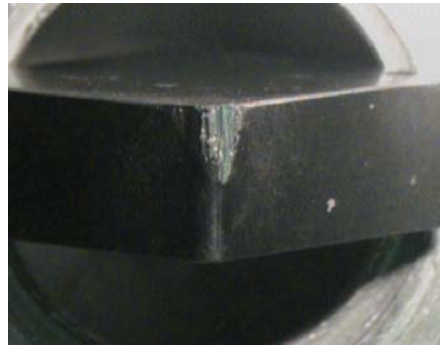


Condição - 100-05-05

Figura 22 – Demonstração das arestas 1 e 2 da ferramenta.

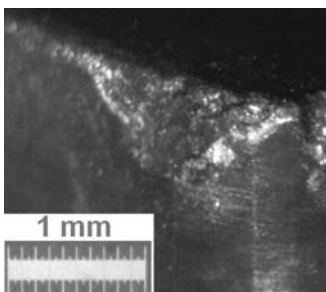


Condição - 50-05-05

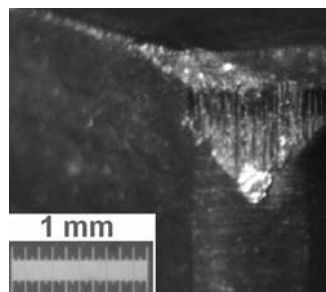


Condição - 30-05-05

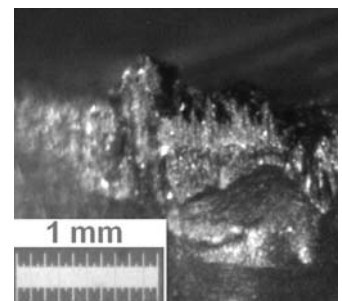
Figura 23 – Demonstração das arestas 3 e 4 da ferramenta.



Condição 200-05-05

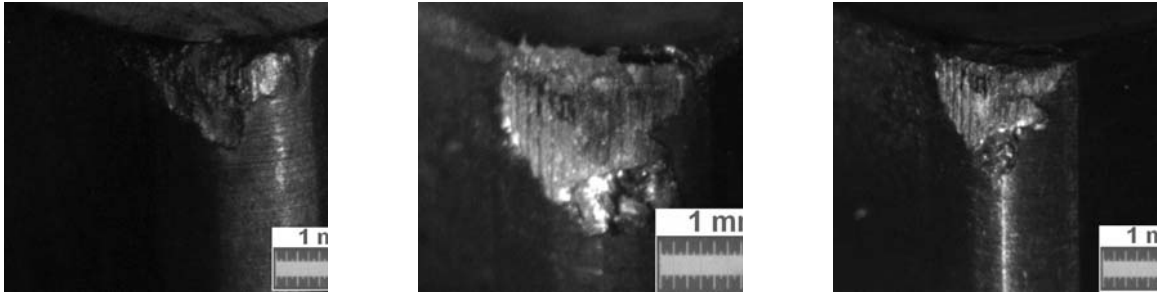


Condição 200-10-05



Condição 200-15-05

Figura 24 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para $V_c = 200\text{m/min}$ (SANTOS 2010).



Condição - 300-05-05

Condição - 300-10-05

Condição - 300-15-05

Figura 25 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para $V_c = 300\text{m/min}$ (SANTOS 2010).

5. CONCLUSÕES

Através da visualização das figuras 22 e 23 é possível verificar que o desempenho obtido da ferramenta, em termos de vida, não foi satisfatório, mesmo com a redução da velocidade de corte. Era esperado um desempenho similar em relação ao apresentado por Santos (2010) quando utilizando os mesmos parâmetros, o qual obteve seu melhor resultado para V_c de 200 m/min.

Em termos de acabamento superficial, não foi possível realizar uma avaliação devido às falhas que ocorreram, sendo que nos parâmetros com V_c de 200 m/min, 100 m/min a ferramenta apresentou desgaste instantâneo, para V_c de 50 m/min ocorreu quebra prematura e por ultimo para V_c de 30 m/min resultando que o aspecto superficial obtido foi visualmente ruim, devido a pouca resistência da ferramenta para tais parâmetros, não sendo viável a utilização do rugosímetro, o comprimento de corte obtido foi pequeno para a V_c de 30m/min, tal V_c também é muito pequena para ser mensurável perto do parâmetro de referência utilizado de 200 m/min.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHOUDHURY, I. A.; BARADIE, M. A. Machinability of Nickel-base Super Alloys: A General Review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 77, p. 278 – 287, 1998.

DINIZ, A. E., COPPINI, N. L. E MARCONDES, F. C. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6º edição Editora M.M, São Paulo, 262f, 2008.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Jornal of Materials Processing Technology**, v.134,(2), p. 233 – 253, 2003.

EZUGWU, E. O, WANG, Z. M., Titanium alloys and their machinability, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 68, p.262 - 274, 1997.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M.; MACHADO A. R. The machinability of nickel-based alloys: a review. **Jornal of Materials Processing Technology**, v. 86, p. 1 - 16, 1999.

JACK D., Advanced Ceramics as Metals Cutting Tool Materials. **Chemistry and Industry**, 1986, 646.

KITAGAWA, T., KUBO, A., MAEKAWA, K. **Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718** and Ti-6Al-6V-2Sn. *Wear*, v. 202, p. 142 - 148. 1997.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M ; COELHO, R.T. ; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher, São Paulo, 371f, 2009.

MEHROTRA, P. K. Applications of ceramic cutting tools, **Key Engineering Materials** Vols. 138- 140, Trans Tech Publications, Suíça, 1998.

MENDES, M. W. D. **Obtenção de pós de Nb a partir da redução aluminotermica com ignição por plasma**. 2005, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-PB.

SANTOS, I. A. **Caracterização de uma super liga de Níquel sob temperaturas elevadas**. 1993, 68f. Dissertação (Mestrado em Concentração em reatores nucleares de potência e tecnologia do combustível nuclear) – Universidade de São Paulo, SP.

SHAW, M. C. Tool life, Ceramic cutting tools- Materials, development and performance, **Noyes Publications**, University of Florida, EUA, 1994.

SHUANGQUN, Z.; XIE, X.; SMITH, G. D.; PATEL, S. J. Gamma prime coarsening and age-hardening behaviors in a new nickel base alloys. **Materials Letters**. p. 1784 - 1787, 2004.

SILVA, L. R. et al. Estudo da geometria de corte para torneamento de Inconel. **Máquinas e Metais**, v. 37 (427), p. 32 – 55, 2001.

SILVA, O.M.M., “**Processamento e caracterização do nitreto de silício aditivado com carbonato de ítrio e concentrado de terras raras**”, 2000, 169f Tese de Doutorado, FEG–UNESP, SP

SOUZA, J.V. C. **Desenvolvimento de pastilhas cerâmicas a base de Si₃N₄ para aplicações tribológicas**. 2005, 134f. Tese de Doutorado, FEG–UNESP, SP.

THAKUR, D.G; RAMAMOORTHY, B; VIJAYARAGHAVAN, L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning., **Materials and Design** 30 (2009) 1718–1725.

VIGNEAU, J. Obtendo alta produtividade na usinagem de ligas de titânio e superligas. **Máquinas e Metais**, v. 32 (380), p. 16 – 32, 1997.

VILELLA, R. C. (1988). “**Metodologia prática visando à otimização das condições de usinagem em células de fabricação**” Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. 105p. Dissertação de mestrado.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B.; BARBA JUNIOR, D. J.; KISH, M. Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu. **Máquinas e Metais**, p.82-89, Maio 1994.

WITTING, H. Torneamento de superligas. **Máquinas e metais**, v. 38 (440), p 156 – 165, 2002.