

CELSO BORTOLINI JUNIOR

LUIS FERNANDO DE OLIVEIRA

EFEITO DA APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE NA
USINAGEM DA SUPERLIGA NIMONIC 80A

Guaratinguetá

2013

CELSO BORTOLINI JUNIOR
LUIS FERNANDO DE OLIVEIRA

**EFEITO DA APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE NA
USINAGEM DA SUPERLIGA NIMONIC 80A**

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

Orientador: Prof. Dr Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2013

B739e Bortolini Junior, Celso
Efeito da aplicação do fluido de corte na usinagem da
superliga Nimonic 80A / Celso Bortolini Junior, Luis Fernando
de Oliveira . – Guaratinguetá : [s.n], 2013
76 f. : il.
Bibliografia : f. 72-76

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais –
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de
Guaratinguetá, 2013
Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

1. Usinagem 2. Níquel 3. Oliveira, Luis Fernando de I
.Título.

CDU 621.9

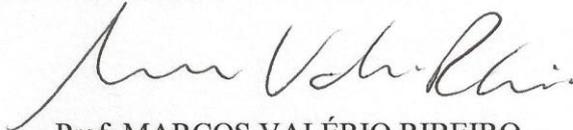
EFEITO DA APLICAÇÃO FLUIDO DE CORTE NA USINAGEM DA
SUPERLIGA NIMONIC 80 A

Celso Bortolini Junior

Luis Fernando de Oliveira

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “**GRADUADO**
EM ENGENHARIA DE MATERIAIS”

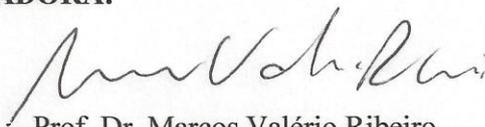
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS



Prof. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

UNESP-FEG



Eng. Renann Pereira Gama

Engenheiro de Materiais

UNESP-FEG

Dezembro 2013

DADOS CURRICULARES
CELSO BORTOLINI JUNIOR

NASCIMENTO 19.12.1990 – CATANDUVA/SP

FILIAÇÃO Celso Bortolini
Oneide Teresinha Paludo Bortolini

2009/2013 Curso de Graduação
Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista “
Júlio de Mesquita Filho” *campus* de Guaratinguetá

DADOS CURRICULARES

LUIS FERNANDO DE OLIVEIRA

NASCIMENTO 27.03.1987 – LORENA/SP

FILIAÇÃO Antônio Lopes de Oliveira
Maria Leni dos Remédios Oliveira

2010/2014 Curso de Graduação
Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista “
Júlio de Mesquita Filho” *campus* de Guaratinguetá

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecemos a Deus pela saúde, força e fé para que este presente trabalho fosse concluído.

ao nosso orientador *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro*, pela compreensão, incentivo e conhecimento passado durante todo o período de estudo.

aos técnicos do departamento de engenharia de materiais e tecnologia pela colaboração e realização dos ensaios mecânicos que contribuíram para conclusão deste trabalho.

às nossas famílias pelo total apoio nos momentos difíceis e que nunca deixaram de acreditar em nossa capacidade.

à empresa VILLARES METALS S.A pelo fornecimento dos corpos de provas necessários para realização do presente trabalho.

BORTOLINI, C. Jr.; OLIVEIRA, L.F. **Efeito da Aplicação do Fluido de Corte na Usinagem da Superliga NIMONIC 80 A**. 2013. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

As ligas de níquel possuem uma composição química com elevado teor de elementos de liga, os quais são responsáveis por suas propriedades mecânicas e térmicas e também os principais causadores de problemas durante a usinagem, dificultando o processo. O objetivo deste trabalho é o estudo da usinagem por torneamento cilíndrico externo da liga a base de níquel Nimonic 80A, buscando a otimização da usinagem desta liga, buscando descobrir a condição ótima de uso de fluido lubrificante, aumentando a produtividade sem a necessidade de investimentos em novos meios de produção. Além disto, os resultados deste trabalho devem oferecer informações mais detalhadas a respeito do comportamento desta liga em relação a usinagem por torneamento. Os ensaios de usinagem foram realizados em um corpo de prova da liga, considerando os parâmetros de usinagem: velocidade de corte (75 e 90 m/min), profundidade de usinagem (0,8 mm) e avanços (0,15 e 0,18 mm/v). Os ensaios foram realizados em um torno CNC e ferramentas com pastilha de metal duro. Após cada etapa do torneamento foram realizadas as medidas do comprimento de corte, do desgaste das ferramentas (através de uma lupa (8x)) e a rugosidade das peças (avaliada em cada fase do processo), com o auxílio de um rugosímetro portátil. Por meio de microscopia óptica, foi possível observar o desgaste das ferramentas de corte para cada condição avaliada. Os valores de rugosidade, R_a e R_y , para as condições avaliadas foram sempre superiores aos valores teóricos. Após análise dos resultados, foi possível concluir que o melhor desempenho para esta faixa de trabalho testada foi obtido para $a_p=0,8\text{mm}$; $f=0,15\text{mm/volta}$ e $v_c=75\text{m/min}$, o que resultou em um maior comprimento de corte (1811 m).

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. Níquel. Fluido de corte. Superligas.

BORTOLINI, C. Jr.; OLIVEIRA, L.F. **Effect of the application of cutting fluid in the machining of superalloy NIMONIC 80 A**. 2013. 76f. Completion of course work – College of engineering Campus Guaratinguetá, Paulista State University, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

The nickel alloys have a chemical composition with high tenor of alloy elements which are responsible for the material's mechanical and thermal properties, but also are the main causative of problems during the machining, making the process difficult. The objective of this work is the study of the machining by external cylindrical turning of the nickel based alloy Nimonic 80A, seeking the machining optimization of this alloy, seeking the best condition of lubricant fluid use, providing real increases of productivity without the need of investments in new production means. Besides, the results of this work should offer more detailed information regarding the behavior of this alloy in relation to machining by turning. The machining experiences were accomplished in a specimen of the nickel alloy, considering the machining parameters: cutting speed (75 and 90 m/min), cutting depth (0,8 mm) and feed rate (0,15 and 0,18 mm/v). The valuations were accomplished in a CNC lathe and tools with of hard metal inserts. After each stage of the turning the measures of the cutting length were accomplished, of the waste of the tools through a magnifying glass (8x) and the roughness of the specimen evaluated in each phase of the process, with the aid of a portable roughness meter. Through light optical microscopy it was possible to observe the wear of the cutting tools for each appraised condition. The roughness values, Ra and Ry, for the appraised conditions were always superiors to the theoretical values. After analysis of the results it was possible to end that, the best acting for this work strip tested it was obtained for $a_p=0,8\text{mm}$: $f=0,15\text{mm/rev}$ and $VC=75\text{m/min}$, what resulted in a larger cutting length (1811 m).

KEY-WORDS: Machining. Nickel. Fluid of cutting. Superalloys.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Diagramas esquemáticos da cunha de corte, adaptada de (TRENT, 1991).....	30
Figura 3.2 - Zona de escorregamento e Zona de aderência da interface cavaco-ferramenta, adaptada de (TRENT, 1991).....	31
Figura 3.3 - Zona de fluxo do cavaco, (BAHIA, A.L.H.2010).....	32
Figura 3.4 - (a) Fontes de geração de calor na formação do cavaco e (b) distribuição de temperatura em uma ferramenta de metal duro, (BAHIA, 2010).....	36
Figura 3.5 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte, adaptada de (DEARNLEY; TRENT, 1982).....	37
Figura 3.6 - Desgaste de cratera em uma ferramenta de metal duro sem recobrimento na usinagem do Nimonic 80A – $v_c = 90$ m/min., $f = 0,18$ mm/rot. e $a_p = 1,6$ mm (FARIA, 2007).....	38
Figura 3.7 - Desgaste de flanco na ferramenta de metal duro SNMG 120412 na usinagem da liga de níquel C-263 - $v_c = 68$ m/min., $f = 0,127$ mm/rot. e $a_p = 1,27$ mm, adaptada de (EZUGWU ET AL., 2004).....	39
Figura 3.8 - Desgaste por abrasão na ferramenta de metal duro H10A $v_c = 90$ m/min, $a_p = 0,8$ mm e $f = 0,15$ mm/rot (FARIA, 2007).	42
Figura 3.9 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (ISO 3685, 1993).....	44
Figura 3.10 Esquema que mostra um Sistema de Lubrificação de Mínima Quantidade de Fluido (HEISEL ET AL., 1998).....	49
Figura 4.1 Representação do corpo de prova para uso nas operações de torneamento.....	51
Figura 4.2 Representação do ensaio de torneamento cilíndrico externo, (CUNHA, 2004).....	52
Figura 4.3 Torno CNC Romi CENTUR 30S.....	53
Figura 4.4 Rugosímetro Mahr – modelo MarSurf M300 + RD18.....	54
Figura 4.5 Microscópio Mahr, modelo MarVision MM 200.....	55
Figura 4.6 Microscópio Zeiss, modelo Stemi 2000.....	55

Figura 4.7	Microdurômetro Wilson® Instruments, modelo 401 MVD.....	56
Figura 4.8	Microscópio NIKON, modelo EPIPHOT 200.....	56
Figura 4.9	Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss, modelo EVO LS15.....	57
Figura 4.10	EDS Oxford-Instruments, modelo INCA x-act.....	57
Figura 5.1	Cavaco gerado no primeiro passe da ferramenta para os parâmetros 75-15-8.....	63
Figura 5.2	Cavaco gerado no último passe da ferramenta para os parâmetros 75-15-8.....	63
Figura 5.3	Desgaste das ferramentas (a) parâmetro 75-15-8 (b) parâmetro 90-15-8.....	64
Figura 5.4	Ferramenta utilizada para os parâmetros 75-18-8.....	65
Figura 5.5	MEV da ferramenta utilizada com os parâmetros 75-18-8.....	66
Figura 5.6	MEV da ferramenta utilizada com os parâmetros 75-18-8 utilizando EDS e mapeamento em cores.....	67
Figura 5.7	Desgaste da ferramenta para o parâmetro 75-15-8.....	69
Figura 5.8	(a) Cavaco gerado no primeiro passo da ferramenta nos parâmetros 75-15-8 e (b) Cavaco gerado pelo ultimo passo da ferramenta nos parâmetros 75-15-8.....	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1	Valores para Tensão de Ruptura, tensão de escoamento e alongamento de algumas superligas.....	27
Quadro 3.2	Valores para Condutividade Térmica, Coeficiente de Expansão Térmica e Resistividade Elétrica de algumas superligas à base de Níquel.....	28
Quadro 4.1	Composição química nominal das superligas de níquel (CARTECH, 2013).....	52
Quadro 4.2	Valores dos parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios.....	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1	Vida da ferramenta para os parâmetros 75-15-8 e 75-18-8.....	62
Gráfico 5.2	Vida da ferramenta para os parâmetros 90-15-8 e 90-18-8.....	62
Gráfico 5.3	Vida da ferramenta “comparação entre as velocidades de corte”.....	63
Gráfico 5.4	Rugosidade média (Ra).....	66
Gráfico 5.5	Rugosidade x Comprimento usinado.....	69
Gráfico 5.6	Vida da ferramenta x velocidades de corte.....	70
Gráfico 5.7	Comparativo entre a rugosidade e as velocidades de corte.....	71
Gráfico 5.8	Comparativo entre rugosidade e velocidade.....	72
Gráfico 5.9	Vida da ferramenta x velocidade.....	72
Gráfico 5.10	Comparativo entre rugosidade e comprimento usinado.....	73

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

γ	Fase Gama
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
a _p	Profundidade de usinagem (mm)
B	Boro
C	Carbono
CFC	Cúbica de Face Centrada
CNC	Controle Numérico Computadorizado
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
<i>Cut-off</i>	Comprimento ou módulo de medida
f	Avanço (mm/volta)
Fe	Ferro
Lc	Comprimento de corte (m)
Mn	Manganês
Mo	Molibidênio
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
°C	Grau centígrado
P	Fósforo
PVD	Deposição Física à Vapor
Ra	Rugosidade média (μm)
Ry	Rugosidade máxima (μm)
Si	Silício
Ti	Titânio
TiC	Carbeto de titânio
TiN	Nitreto de Titânio
VB	Desgaste de flanco (mm)
v _c	Velocidade de corte (m/min)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	USINAGEM DE SUPERLIGA À BASE DE NÍQUEL	19
3.2	COMPOSIÇÃO DA SUPERLIGA À BASE DE NÍQUEL	22
3.3	ELEMENTOS DE LIGA E MICROESTRUTURA DAS SUPERLIGAS À BASE DE NÍQUEL	25
3.4	FORMAÇÃO DO CAVACO	26
3.4.1	Mecanismo de formação do cavaco	26
3.4.2	Interface cavaco-ferramenta	28
3.4.3	Classificação dos cavacos	30
3.4.3.1	Tipos de Cavaco	31
3.4.3.2	Formas de Cavaco	32
3.4.4	Temperatura de usinagem	33
3.4.5	Avarias e desgaste da ferramenta	34
3.5	FERRAMENTAS DE CORTE	43
3.5.1	Seleção da ferramenta	43
3.5.2	Utilização da lubrificação durante o processo de Usinagem	44
3.5.3	Vida da ferramenta	47
4	MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1	MATERIAL	49
4.2	CORPOS DE PROVA	49
4.3	ENSAIOS DE USINAGEM	50
4.4	EQUIPAMENTOS ADICIONAIS	52
4.5	METODOLOGIA APLICADA AOS ENSAIOS	55
4.5.1	Análise da superfície usinada	56
4.5.2	Análise do desgaste da ferramenta	56
4.5.3	Análise da matéria-prima	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1	LUBRIFICAÇÃO ABUNDANTE	58

5.1.1	Vida da ferramenta	58
5.1.2	Rugosidade	62
5.2	LUBRIFICAÇÃO MQF	66
5.2.1	Vida da ferramenta	66
5.2.2	Rugosidade	68
6	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos materiais metálicos está intimamente associado aos avanços tecnológicos, assim como o aumento da competitividade das empresas no mercado mundial faz com que elas busquem processos de menores custos com grande produtividade e produtos de alta qualidade.

Assim, há uma crescente busca por processos de usinagem que promovam, por exemplo, grande capacidade de remoção de cavaco, menor avaria e desgaste da ferramenta e materiais que possuam maior resistência ao desgaste e à oxidação e corrosão. Aços inoxidáveis e aços ligados têm sido uma resposta eficiente até então, porém a exigência de temperaturas de operação cada vez maiores, maiores potências e motores mais eficientes, impulsionaram o desenvolvimento das ligas refratárias ou “superligas”.

As ligas à base de níquel têm um papel extremamente importante na indústria aeronáutica, automobilística, marinha e agora também em veículos espaciais, aviões experimentais e reatores nucleares. Sua crescente aplicação é devido ao seu desempenho em altas temperaturas, mantendo propriedades como alta resistência mecânica, alta resistência à fluidez, alta resistência à fadiga e boa resistência à corrosão (EZUGWU et.al., 1999; SILVA et. al., 2001).

A indústria aeronáutica e aeroespacial diante das mudanças ocorridas nos últimos anos, no transporte aéreo e no desenvolvimento de novos produtos, exige disponibilidade de novos materiais com ampla quantidade de informações sobre eles, suficientes para seus processamentos (HEINZ et al. 2000).

A crescente importância dos metais não ferrosos nas indústrias, acelera a necessidade de um conhecimento mais profundo das particularidades de processo destes materiais. A introdução de componentes mais leves, com maior precisão e confiabilidade operacional, menores tamanhos de peças e baixo custo, tem sido um desafio à engenharia de fabricação (DI RAIMO e PORTO, 2001).

Dentre os materiais que atendem ao requisito resistência mecânica e à corrosão em temperaturas elevadas está a superliga à base de níquel *Nimonic 80A*. As ligas de níquel possuem uma composição química com elevado teor de elementos de liga, os quais são responsáveis por suas propriedades mecânicas e térmicas, porém estas características dificultam demasiadamente sua usinagem, levando a ocorrência de alguns problemas durante o processo (SILVA et. al., 2001).

As ligas de níquel possuem uma composição química com elevado teor de elementos de liga os quais são responsáveis por suas propriedades mecânicas e térmicas, porém estas características dificultam demasiadamente sua usinagem, levando a ocorrência alguns problemas durante o processo (SILVA et. al., 2001).

O termo “superligas” descreve uma ampla variedade de ligas a base de níquel, cobalto e ferro, desenvolvidas especificamente para aplicações que exigem propriedades químicas e mecânicas excepcionais a elevadas temperaturas.

As ligas de níquel são endurecidas pela precipitação de $Ni_3(Al-Ti)$ fase (gama) e pela solução de elementos refratários na matriz, e a resistência mais alta à temperatura é obtida pelo aumento da fração de volume desta fase. Os materiais avançados incluem 55 % de fase (gama) para as ligas de metalurgia do pó e 70 % para as ligas de cristal único (SILVA et. al, 2001).

De acordo com Ezugwu, Bonney e Yamane (2003), as principais dificuldades encontradas na usinagem destas ligas podem ser resumidas como:

- Elevada resistência e dureza à quente, causando deformação na ferramenta durante a usinagem;
- A matriz austenítica de liga de níquel promove um rápido endurecimento, fator de maiores causas do desgaste severo da ferramenta durante o processo;
- Presença de carbeto duros e abrasivos na microestrutura destas ligas leva a excessivos desgastes por abrasão, podendo levar a ferramenta à falha prematura;
- A baixa condutividade térmica destas ligas leva à concentração da temperatura de corte (aproximadamente 1000°C) na ferramenta, causando elevados gradientes térmicos;
- A soldabilidade do material da peça na aresta de corte da ferramenta forma uma aresta postiça de corte, comprometendo a integridade superficial da peça, assim como a ferramenta de corte.

É importante salientar que a alteração na superfície, tal como a tensão residual induzida durante a usinagem, pode resultar em distorções desfavoráveis à peça. Por esta razão, cuidados especiais devem ser tomados para assegurar a vida da ferramenta, a integridade superficial da peça usinada e o controle dos principais parâmetros de usinagem (SILVA et. al., 2001).

As ferramentas usadas para usinagem destas ligas devem possuir, portanto, adequada dureza a quente devido às altas temperaturas geradas em condições de altas velocidades de corte. As falhas típicas observadas quando se usina estas ligas são: desgaste de flanco, desgaste de cratera, falha catastrófica, entre outras, o que causa um grande número de paradas para a troca da ferramenta e acerto da máquina, aumentando consideravelmente os chamados tempos improdutivos de operação.

Portanto, para se obter condições de usinagem satisfatórias, é necessário que se tenha um bom entendimento da microestrutura dos materiais envolvidos, dos efeitos sobre o comportamento das ferramentas de corte e sobre a eficiência dos processos de usinagem empregados (VIGNEAU, 1997).

2 OBJETIVOS

A presente dissertação visa levantar dados a respeito da influência dos parâmetros de corte, do modo de aplicação do fluido lubrificante e do recobrimento das ferramentas no processo de torneamento. Assim espera-se apresentar informações suficientes para promover a otimização da usinagem da superliga à base de níquel em questão.

A seguir são descritos os principais objetivos desta dissertação:

- Estudar a formação dos cavacos quando da usinagem por torneamento da superliga à base de níquel (Nimonic 80A), com enfoque na caracterização dos cavacos obtidos na usinagem por torneamento sob diversas condições de corte.
- Buscar uma relação entre as deformações dos cavacos e a rugosidade apresentada pela superfície da peça.
- Estudar a influência da técnica de utilização de mínimas quantidades de fluido (MQF), para a otimização dos processos da usinagem por torneamento da superliga à base de níquel (Nimonic 80A), fazendo uma comparação com a utilização de fluido abundante;
- Estudar a influência de ferramentas de corte com recobrimento no processo de usinagem da superliga à base de níquel (Nimonic 80A), relacionado às diferentes velocidades de corte e avanços.
- Apresentar subsídios para se promover a otimização da usinagem desta superliga obtendo o máximo proveito das ferramentas e condições de corte.

As rugosidades obtidas (R_a e R_y), os desgastes apresentados (VB) e suas respectivas progressões em relação ao tempo e ao comprimento de corte alcançado são as variáveis de resposta a serem analisadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 USINAGEM DE SUPERLIGA À BASE DE NÍQUEL

Durante o processamento mecânico de materiais metálicos, tão importantes quanto às propriedades de resistência mecânica e resistência à corrosão, são as propriedades da fabricação, como a soldabilidade e a usinabilidade. Produtos planos, por exemplo, frequentemente, passam por operações de soldagem ou estampagem na fabricação do produto final. Nesse caso, as propriedades de soldabilidade e estampabilidade são essenciais. Produtos não planos como barras, por outro lado, frequentemente, passam por operações de usinagem.

De acordo com a escolha certa do material a ser usinado, assim como as ferramentas, fluidos de corte, equipamentos e condições de usinagem, é possível a obtenção de vantagens econômicas consideráveis; além disso, podem ser obtidos grandes aumentos de produtividade (BAKER, 1981; CHANDRASEKARAN, 1994; EZUGWU, 1990). Então os custos e o tempo de produção podem ser significativamente reduzidos através da escolha certa dos parâmetros durante o processo.

Assim como os aços inoxidáveis austeníticos as superligas à base de níquel apresentam rápido encruamento quando deformadas. Durante a usinagem ocorrem elevadas pressões na peça que está sendo trabalhada, que produzem um efeito de endurecimento que age de forma a dificultar a usinagem, podendo causar distorções em componentes delgados.

Indústrias que fabricam componentes de motores com superligas à base de níquel e também de aços inoxidáveis especiais (válvulas automotivas), ligas de titânio (turbinas aeronáuticas), caracterizam-se por apresentarem um custo elevado na fabricação das peças usinadas, principalmente em relação ao custo hora/máquina, por este motivo é interessante diminuir os tempos de usinagem das peças e aumentar o uso efetivo das ferramentas, pois o custo/hora nestas indústrias é mais elevado do que nas indústrias convencionais (LÓPEZ DE LACALLE et. at., 1998).

As superligas à base de níquel podem ser trabalhadas através das mesmas técnicas utilizadas nas ligas à base de ferro. Porém, certos requisitos são impostos devido à alta resistência destas ligas, sua tendência ao endurecimento quando trabalhada e à perda de corte da ferramenta em algumas condições (ASM HANDBOOK, 1990).

Inicialmente, o objetivo das máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) era solucionar a usinagem de peças de grande complexidade, mas, com o tempo, vieram a

auxiliar na redução de tempos improdutivos, no posicionamento e retirada da ferramenta. Assim, a utilização destas máquinas só é economicamente viável quando se garante o emprego eficiente destes equipamentos e ferramentas durante o processo de usinagem, ou seja, é necessário extrair dos mesmos o máximo rendimento possível para garantir o retorno dos investimentos efetuados. A eficiência do processo de usinagem depende da utilização de dados de corte otimizados, atualizados e adequados às condições reais de trabalho (RIBEIRO, 2003).

A usinabilidade pode ser definida como o grau de dificuldade de usinagem de um determinado material. A usinabilidade de metais é, normalmente, analisada com relação a quatro critérios: qualidade superficial, formação de cavacos, vida da ferramenta e forças de corte (Weingaertner, 1994). Nesse aspecto, a usinabilidade tem forte influência sobre a produtividade e o custo final de produção e serve como parâmetro para reforçar a necessidade da preocupação não só de materiais com propriedades mecânicas, físicas e químicas superiores, mas também com o comportamento destes materiais quando submetidos a algum tipo de processo de fabricação. A ideia é que eles sejam passíveis de sofrer operações de processamento pelas técnicas existentes. Tanto do ponto de vista prático quanto econômico.

Na usinagem de metais, o prejuízo produzido na região superficial é muito diferente para cada material. Esse prejuízo na região superficial consiste na deformação plástica, sendo resultado da interação entre a ponta de ferramenta e a superfície da peça. A região da ponta inclui a aresta de corte, o quebra cavaco e a superfície de folga da ferramenta (Jeelani e Ramakrishnan, 1985).

A resistência do material de uma peça aumenta quando este é deformado plasticamente. O crescimento da resistência depende da taxa de deformação e da capacidade de encruamento (KOPAC e BAHOR, 1999). Materiais com alta taxa de encruamento requerem muita energia para formação do cavaco (valor alto da pressão específica de corte – baixa usinabilidade).

A baixa usinabilidade das superligas à base de níquel impõe uma extrema tensão térmica e mecânica à aresta de corte, levando a deformações plásticas e acelerados desgastes das ferramentas de corte. As falhas típicas observadas quando se usina estas ligas são: desgaste de flanco, desgaste de cratera, falha catastrófica, entre outras. As ferramentas usadas para a usinagem destas ligas devem possuir adequada dureza a quente devido às altas temperaturas geradas a condições de alta velocidade de corte (EZUGWU, 2003).

Durante o processo de usinagem de ligas à base de níquel ocorrem altas tensões na interface peça-ferramenta e na interface ferramenta-cavaco, que geram um efeito de

encruamento no material dificultando a usinagem podendo causar distorções em componentes de menor espessura. Para se obter um melhor resultado quanto a estabilidade dimensional da peça, o melhor processo seria desbastar o material até próximo a sua dimensão final e em seguida proceder com um alívio de tensões e com a operação de acabamento até a dimensão final da peça. O processo de alívio de tensões não gera grandes efeitos no material quando se diz respeito as suas dimensões, porém quando se trata das suas propriedades mecânicas tal processo pode afetá-las significativamente, por exemplo, eliminando tensões de tração na superfície da peça que, além de poderem causar distorções ainda são responsáveis pela redução do limite de fadiga do material.

O tamanho do grão tem pequeno efeito direto na usinagem das ligas à base de níquel. Em geral, a microestrutura afeta a usinagem de duas maneiras (ASM HANDBOOK, 1990).

As falhas nas peças usinadas ocorrem por fluência, fadiga e/ou por corrosão sob tensão. Tais falhas começam por pequenas trincas na superfície das peças e são propagadas para o centro ocorrendo quebra súbita. Estas falhas dependem da ferramenta usada, da força da ferramenta na superfície, do tipo de corte (ortogonal ou plano) e da temperatura do cavaco. A superfície usinada do material contém tensões residuais, onde sua grandeza e natureza dependem dos parâmetros de corte adotados.

No torneamento, na zona de contato entre a ferramenta e a peça, criam-se elevadas pressões e temperaturas. Na usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas, devido à sua reduzida condutibilidade térmica, a condução de calor para o cavaco ocorre em pequena escala (WITTING, 2002).

Dessa forma, essas ligas só podem ser usinadas com velocidades reduzidas, sendo que sua usinagem é dificultada pelo encruamento e formação de aresta postiça de corte. Além disto, devem ser consideradas a elevada tenacidade do material e a formação desordenada de cavacos em forma de fita e espiral.

Quase todos os processos de manufatura e alteração metalúrgica feitos para melhorar o desempenho e as propriedades em temperaturas elevadas, tornam mais difíceis a usinagem dessas ligas. Quando a resistência a altas temperaturas é aumentada, a liga torna-se mais dura e refratária com relação à temperatura de corte. Como resultado, isto gera o aumento do esforço na aresta de corte, podendo causar quebras, lascamentos e deformações (GAMA,2011).

A usinagem convencional das ligas resistentes a altas temperaturas é feita com ferramenta de metal duro, classe K, com tempos de vida útil relativamente pequenos, em virtude das sobrecargas térmica e mecânica. Arestas de corte com cantos vivos possibilitam o

cisalhamento fácil dos cavacos, reduzindo a tendência ao encruamento do material (Witting, 2002).

A ferramenta de corte com revestimento adequado pode ter sua vida útil aumentada. O mercado dispõe de classes de metal duro com revestimentos à base de óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de titânio (TiN), carbeto de titânio (TiC), além de revestimento de nitreto de alumínio-titânio ($TiAlN$). Comparando-se diferentes revestimentos com o metal duro, o óxido de alumínio é o mais resistente contra a oxidação, porém sua dureza é reduzida. O carbeto de titânio apresenta elevada dureza, a qual é reduzida em elevadas temperaturas. A relação equilibrada entre dureza e resistência ao desgaste por calor torna o nitreto de alumínio-titânio o material mais indicado como revestimento, para usinagem de superligas à base de níquel.

Tanto as ferramentas de metal duro recobertas através de deposição física de vapor (PVD) quanto por deposição química de vapor (CVD) são utilizadas na usinagem de superligas à base de níquel. Ferramentas de metal duro com multicamadas trabalham melhor, em termos de vida da ferramenta, do que aquelas com uma simples camada (EZUGWU, 2000; JAWAID, 1999).

A formação de cavaco influencia diversos fatores ligados a usinagem, tais como: desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado durante a usinagem, penetração do fluido de corte, dentre outros. Dessa forma, estão envolvidos aspectos econômicos, qualidade da peça, segurança do operador, utilização correta da máquina-ferramenta, etc. (DINIZ, COPPINI e MARCONDES, 1999). Com isto, a morfologia micro e macroestrutural final do cavaco podem revelar indícios das dificuldades encontradas no processo de corte.

3.2 COMPOSIÇÃO DA SUPERLIGA À BASE DE NÍQUEL

As superligas à base de níquel abrangem uma ampla faixa de composições químicas e esta composição está associada à algumas de suas propriedades como a resistência mecânica e a fluência em um amplo intervalo de temperaturas.

Geralmente as composições químicas nominais das ligas à base de níquel ficam na faixa de 38 a 76% em peso de Níquel, até 27% em peso de cromo (Cr) e 20% em

peso de cobalto (Co) (Kalpakjan, 1991). Também encontramos elementos como o Tungstênio (W), Tântalo (Ta) e Molibdênio (Mo) em menores proporções que melhoram a resistência mecânica e a oxidação da liga.

Como nas superligas à base de níquel temos uma adição de diversos elementos de liga em proporções elevadas, existem algumas propriedades importantes que são prejudicadas durante o processo de usinagem, devido a essas adições como, por exemplo, a condutividade térmica.

Para o níquel puro a condutividade térmica é da ordem de 90,7 W/m.K, superior a vários elementos como por exemplo o ferro que é da ordem de 80,3 W/m.K. Já no caso das superligas à base de níquel a condutividade térmica passa a ser da ordem de 10% a do níquel puro.

Uma condição ótima para usinagem de superligas à base de níquel é de se obter a diminuição dos gradientes de temperatura, mas para isto a superliga deve possuir condutividade térmica elevada fazendo com que a dissipação de calor durante o processo de usinagem não fique totalmente concentrada na ferramenta havendo portanto uma melhor distribuição de dissipação do calor durante o processo e assim reduzir o riscos de falhas dos componentes devido fadiga térmica e desgaste das ferramentas o que acarretaria em diversos problemas.

No Quadro 3.1 são apresentados os valores das tensões de ruptura e tensões de escoamento assim como o alongamento pra diversas faixas de temperaturas de várias ligas à base de níquel.

Quadro 3.1: Valores para Tensão de Ruptura, tensão de escoamento e alongamento de algumas superligas.

Liga	Forma	Tensão de Ruptura			Tensão de Escoamento			Alongamento %		
		21 °C	540 °C	760 °C	21 °C	540 °C	760 °C	21 °C	540 °C	760 °C
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa			
Inconel 718	Barra	1435	1275	950	1185	1065	740	21	18	25
Inconel X-750	Barra	1200	1050	...	815	725	...	27	26	...
Nimonic 80A	Barra	1000	875	600	620	530	505	39	37	17
Nimonic 90	Barra	1235	1075	655	810	725	540	33	28	12
Nimonic 105	Barra	1180	1130	930	830	775	740	16	22	25
Nimonic 115	Barra	1240	1090	1085	865	795	800	27	18	24
Nimonic 263	Chapa	970	800	650	580	485	460	39	42	21
Nimonic 942	Barra	1405	1300	900	1060	970	860	37	26	42
Pyromet 860	Barra	1295	1255	910	835	840	835	22	15	18
René 41	Barra	1420	1400	1105	1060	1020	940	14	14	11
Udimet	Barra	1310	1185	...	930	830	...	30	26	...
Pyromet A31 ^(a)	Barra	1200	1083	804	760	655	692	30	...	...

Fonte: (adaptado de METALS HANDBOOK, 1998).

No Quadro 3.2, tem-se os valores obtidos da literatura para a Condutividade Térmica, Coeficiente de Expansão Térmica e Resistividade Elétrica para algumas variações de ligas à base de Níquel, em destaque para a liga NIMONIC 80 A.

Quadro 3.2 – Valores para Condutividade Térmica, Coeficiente de Expansão Térmica e Resistividade Elétrica de algumas superligas à base de Níquel.

Liga	Forma	Condutividade Térmica			Coeficiente médio de expansão térmica $10^{-6}/K$		Resistividade Elétrica $n\Omega.m$
		21 °C	538 °C	871 °C	538 °C	871 °C	
		W/m.K	W/m.K	W/m.K			
Inconel 718	Barra	11,4	19,6	24,9	14,4	...	1250
Inconel X-750	Barra	12,0	18,9	23,6	14,6	16,8	1220
Nimonic 80A	Barra	8,7	15,9	22,5	13,9	15,5	1240
Nimonic 81	Barra	10,8	19,2	25,1	14,2	17,5	1270
Nimonic 90	Barra	9,8	17,0	...	13,9	16,2	1180
Nimonic 105	Barra	10,8	18,6	24,0	13,9	16,0	1310
Nimonic 115	Barra	10,7	17,6	22,6	13,3	16,4	1390
Nimonic 263	Chapa	11,7	20,4	26,2	13,7	16,2	1150
Nimonic 942	Barra	...	...	...	14,7	16,5	...
Pyromet 860	Barra	...	...	...	15,4	16,4	...
René 41	Barra	9,0	18,0	23,1	13,5	15,6	1308
Pyromet A31 ^(a)	Barra	13	19,8	23,2	14,0	14,8	1220

Fonte: Adaptado de (METALS HANDBOOK, 1998) e (a) (SAE J775, 2004).

3.3 ELEMENTOS DE LIGA E MICROESTRUTURA DAS SUPERLIGAS À BASE DE NÍQUEL

A microestrutura de uma superliga de níquel é constituída basicamente por uma matriz austenítica e sua estrutura cristalina é cúbica de face centrada (CFC), que faz este tipo de material apresentar excelentes propriedades como resistência à tração, resistência à fluência em elevadas temperaturas.

Os diversos elementos adicionados nas superligas à base de níquel agem de forma melhorar as suas propriedades e/ou características. O cromo presente na liga reage com o meio ambiente formando óxido de cromo (Cr_2O_3), esta reação gera uma camada protetora que impede a difusão de outros elementos como oxigênio, enxofre e nitrogênio para dentro da

matriz austenítica de níquel. Alguns autores dizem que em torno de 15 a 30% em peso de cromo é adicionado na matriz de modo a assegurar o mecanismo de proteção das ligas à base de níquel (Simms e Hagel, 1972 ; Ezugwu et. al., 2003).

O molibdênio adicionado age para formar uma solução sólida que reforça a liga em temperaturas elevadas, já o cobalto garante a redução de carbeto uma vez que a solubilidade do carbono no cobalto é boa.

A adição de nióbio (Nb) na liga reduz a sensibilidade à quebra, mas pode causar a segregação de células, conseqüentemente, ele é adicionado em quantidades de modo a prevenir este efeito indesejável (Zitnansky, 1998).

O alumínio é adicionado para que haja um endurecimento da liga por precipitação através da formação de um composto metálico (Ni_3Al), também conhecido como fase gama linha (γ') sendo que, o titânio pode substituir o alumínio.

3.4 FORMAÇÃO DO CAVACO

De acordo com Diniz et al. (2010), diversos fatores do processo de usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte dentre outros são influenciados pela formação do cavaco. Assim é de extrema importância conhecer e saber identificar os fenômenos que ocorrem na formação do cavaco a fim de melhorar a qualidade da peça, o tempo de vida da ferramenta e a otimização da máquina ferramenta.

No processo de usinagem, o movimento relativo entre a peça e a ferramenta e os fenômenos que ocorrem na região de corte dependem de vários fatores, tais como: parâmetros de corte, material que está sendo usinado, temperatura de corte, material e geometria da ferramenta e presença ou não de fluidos de corte.

3.4.1 Mecanismo de formação do cavaco

O processo de formação do cavaco pode ser dividido esquematicamente em quatro partes:

- Deformação elástica (recalque);
- Deformação plástica;
- Ruptura (parcial ou completa) e

- Escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta.

A formação do cavaco em condições normais de trabalho com ferramentas de metal duro ou aço rápido é um fenômeno periódico mesmo quando da formação do cavaco contínuo. Com o auxílio da Figura 3.11 pode-se entender melhor o formação do cavaco e cada uma de suas quatro etapas.

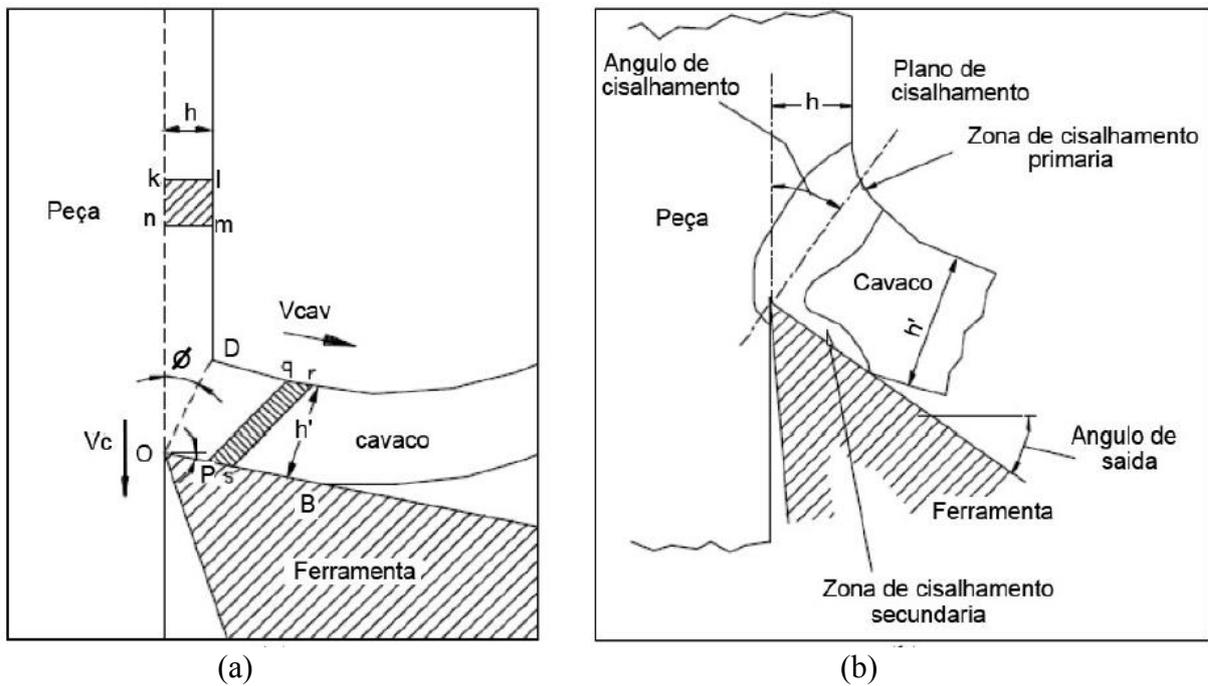
1ª etapa: A ação da ferramenta recalca o volume $klmn$ e o metal começa a sofrer deformações elásticas, ver Figura 3.11 (a).

2ª etapa: Prosseguindo, o material da peça atinge o limite de escoamento e se deforma plasticamente. As deformações plásticas prosseguem e as tensões se elevam e ultrapassam o limite de resistência do material, promovendo a sua ruptura.

3ª etapa: A ruptura se inicia com a trinca no ponto O podendo prosseguir até o ponto D . A região destes campos de tensões e deformações plásticas, chamada de zona de cisalhamento primária, é simplificada e representada na Figura por um plano definido pela linha OD . A extensão da trinca iniciada no ponto O é que vai determinar a classe do cavaco.

4ª etapa: Após o volume $klmn$ passar pela zona de cisalhamento primário, já deformado plasticamente, passa-se para um novo formato $pqrs$, e se movimenta sobre a superfície de saída da ferramenta, definindo-se a região da zona de cisalhamento secundária, representada na Figura 3.11 (a) pelo plano OB mostrado. Na Figura 3.11 (b) são apresentadas as zonas de cisalhamento primário e secundário.

Figura 3.1 – Diagramas esquemáticos da cunha de corte.



h – espessura calculada do cavaco

h' – espessura do cavaco

$klmn$ – volume de material livre de deformação

$pqrs$ – volume de material deformado

primário

vc – velocidade de corte

$vcav$ – velocidade do cavaco

OD – plano de cisalhamento primário

\emptyset – ângulo de cisalhamento do plano

Fonte: Adaptado de (Trent, 1991).

3.4.2 Interface cavaco-ferramenta

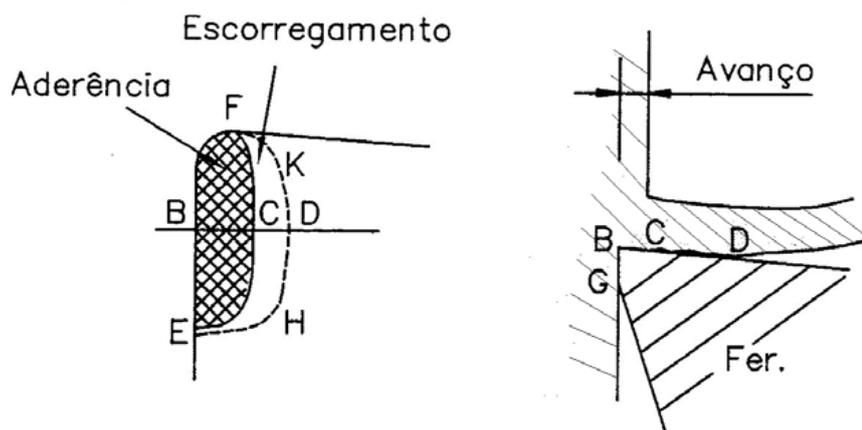
Dentre vários problemas que podem ser encontrados na usinagem um dos principais é saber quais fenômenos efetivamente ocorrem na região da interface cavaco-ferramenta, uma vez que sua visualização não é possível devido à presença do material removido durante o processo de usinagem e também pela tampa protetora que o equipamento possui a fim de evitar acidentes ou vazamento de fluido.

De acordo com Trent (1991), as condições em que acontece o escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída têm forte influencia em todo o processo, particularmente, no mecanismo de formação do cavaco, força de usinagem, calor gerado durante o corte, e

consequentemente na temperatura de corte, mecanismos e taxa de desgaste das ferramentas de corte. Com isso, é de extrema importância entender como o trabalho se desenvolve, ou seja, conhecer como ocorre o movimento do cavaco ao longo da superfície de saída da ferramenta.

Atualmente uma das teorias mais aceitas nos meios científicos é a da existência de uma região delimitada entre o cavaco e a ferramenta denominada zona de aderência. Nas proximidades da zona de aderência existe uma região chamada zona de escorregamento, ambas as zonas são indicadas na Figura 3.2 sendo que a linha BC representa a zona de aderência e a linha CD representa a zona de escorregamento (Trent, 1991).

Figura 3.2: Zona de escorregamento e Zona de aderência da interface cavaco-ferramenta.



Fonte: Adaptado de (Trent, 1991).

Em certas situações, pode-se suprimir a zona de aderência, prevalecendo apenas a zona de escorregamento.

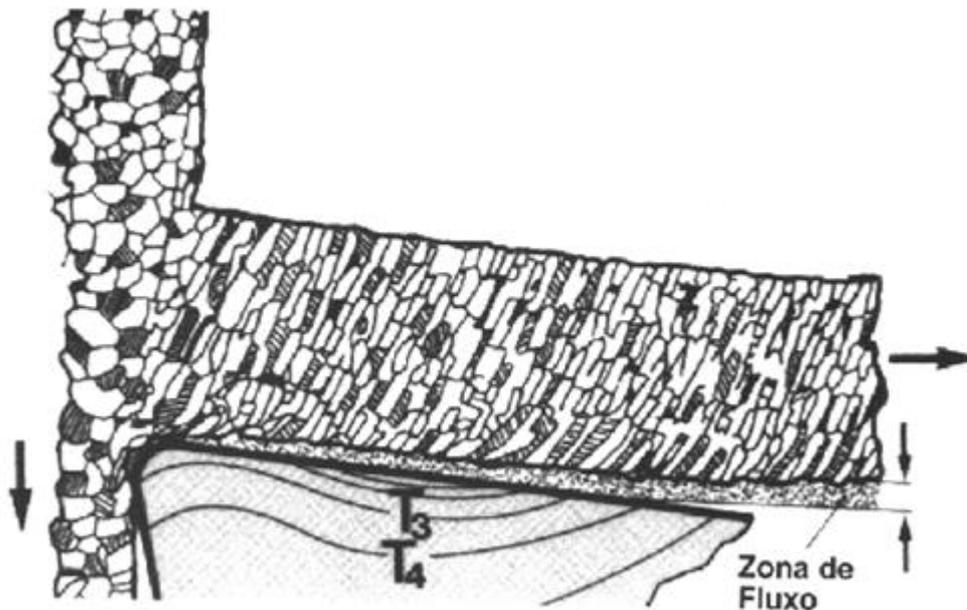
Pode ocorrer também a existência de uma aresta postiça de corte (APC), sendo este um fenômeno que pode ocorrer a baixas velocidades de corte.

A presença da APC vai alterar completamente a geometria da cunha cortante, com efeitos em todo o processo de usinagem, como na força e temperatura de corte, desgaste das ferramentas e acabamento superficial (Machado; Silva, 1999).

O movimento do cavaco na zona de aderência ocorre por cisalhamento do material. Bem próximo à interface é formada uma zona de cisalhamento intenso que é chamada zona de fluxo, mostrada na Figura 3.3. Considera-se que exista uma camada estacionária de material na interface cavaco-ferramenta e a velocidade do cavaco aumenta à medida que se percorre

sua espessura, até que se chegue ao fim da zona de fluxo, onde termina o cisalhamento e o fluxo do cavaco se torna constante. Esta zona de fluxo possui de 0,01 a 0,08 mm, assim, depois dessa espessura a velocidade de saída do cavaco se estabiliza.

Figura 3.3: Zona de fluxo do cavaco



Fonte: (Bahia, A.L.H.2010)

Segundo Wright et al. (1979) apud Lanna (2004), as condições na interface de escorregamento ou aderência dependem do par ferramenta-peça, do tempo de usinagem e da velocidade de corte. As condições de aderência são favorecidas por altas velocidades de corte, longos tempos de usinagem e pequenas diferenças entre o material da peça e da ferramenta. Quanto menor o ângulo de saída da ferramenta, maior o comprimento de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, com isso maior será a zona de aderência e quanto maior a zona de aderência, maiores serão as temperaturas e as forças de usinagem.

3.4.3 Classificação dos cavacos

Os cavacos podem implicar em diversos problemas práticos no processo de usinagem como, por exemplo: segurança do operador, possibilidade de dano à ferramenta ou a peça, dificuldade no manuseio e armazenagem do cavaco, forças de corte, temperatura e vida útil da ferramenta.

Apesar de ser um subproduto da usinagem, o cavaco gerado pode relatar a causa de problemas durante a usinagem já mencionados anteriormente e ser ao mesmo tempo um indicativo de problemas, relativos tanto a qualidade do material usinado quanto às condições da ferramenta de corte utilizada.

Diversos pesquisadores propuseram suas classificações, porém uma das mais utilizadas e de maior facilidade do ponto de vista didático é a que subdivide os cavacos em três tipos: cavaco contínuo, de cisalhamento e de ruptura (Ferraresi, 1977).

3.4.3.1 Tipos de Cavaco

a) Cavaco contínuo: é caracterizado por seu grande comprimento, independente da forma. Ocorre normalmente na usinagem de metais dúcteis, sob pequenos e médios avanços, com altas velocidades de corte (geralmente acima de 60 m/min) e grandes ângulos de saída da ferramenta. É formado quando o material é recalcado ao chegar à aresta de corte, sem que ocorra o rompimento deste, deslizando, assim, pela superfície de saída da ferramenta, ou seja, formando lamelas justapostas numa disposição contínua sendo que a distinção das lamelas não é nítida.

b) Cavaco de cisalhamento: ocorre principalmente quando a trinca, ao propagar-se pelo plano de cisalhamento, provoca a ruptura total do cavaco, que, em seguida, é soldado devido à pressão e temperatura. O resultado final é um cavaco que se apresenta constituído de lamelas justapostas bem distintas. Este cavaco se forma quando há uma diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento.

c) Cavaco de ruptura: este tipo de cavaco é muito comum na usinagem de metais frágeis, como o ferro fundido cinzento. Este cavaco ocorre também na usinagem de alguns metais menos frágeis a baixas velocidades de corte, grandes avanços e com ângulo de saída baixo, nulo ou negativo. O cavaco apresenta-se constituído de fragmentos que são arrancados da peça usinada, ou seja, há uma ruptura completa do material em grupos lamelares (na região de cisalhamento) que permanecem separados.

O cavaco contínuo, além de oferecer risco ao operador, pode emaranhar-se ao redor da peça ou ferramenta, dificultando a operação e a lubri-refrigeração tornando a superfície

usinada menos atrativa. Além disso, há o alto coeficiente volumétrico do cavaco contínuo em relação aos outros tipos.

O cavaco parcialmente contínuo, também pode apresentar problemas, como a geração de vibrações, que podem acarretar danos como ondulações na superfície usinada, desgaste excessivo da ferramenta, e até mesmo efeitos nocivos como desbalanceamento rotativo nos principais mancais do torno.

A ocorrência do cavaco contínuo pode ser evitada, ou ao menos minimizada adotando-se alterações nos parâmetros de corte, dentre as quais são:

- Diminuição do ângulo de saída e de inclinação da ferramenta utilizando quase sempre valores negativos;
- Maximizar o avanço e a profundidade de corte;
- Diminuição da velocidade de corte;
- Uso de quebra cavaco.

Dentre as opções de minimização de formação de cavaco contínuo, a mais comumente adotada em processos cujos parâmetros de corte propiciam a formação do cavaco contínuo, é o uso de quebra-cavacos na superfície de saída da ferramenta, pois, além de proporcionar uma solução simples e rápida para o problema, o uso de quebra-cavaco dispensa a necessidade de alterações nos parâmetros de usinagem.

3.4.3.2 Formas de Cavaco

Além da classificação quanto ao tipo de cavaco, classificam-se também os cavacos contínuos e cavacos de ruptura quanto a sua forma. Assim têm-se quatro formas diferentes de cavacos:

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

O cavaco em fita normalmente é evitado por apresentar diversos riscos à segurança do operador, ocupar muito espaço, dificultar a lubri-refrigeração, podendo também causar danos à superfície da peça e à superfície da ferramenta. A forma helicoidal é bastante desejada devido à conveniência desta forma de cavaco se soltar para fora do sistema peça-ferramenta evitando assim danos maiores. O cavaco em lascas normalmente é preferido quando há pouco espaço disponível, ou quando o cavaco deve ser removido devido à ação do fluido lubri-refrigerante.

Durante o processo de usinagem, quando se identifica de início a ocorrência de uma forma de cavaco prejudicial ao processo pode-se conseguir uma mudança em seu formato sob diferentes maneiras, como, por exemplo:

- Alterando as condições de usinagem;
- Dando uma forma particular à superfície de saída da ferramenta;
- Colocando elementos adicionais na superfície de saída.

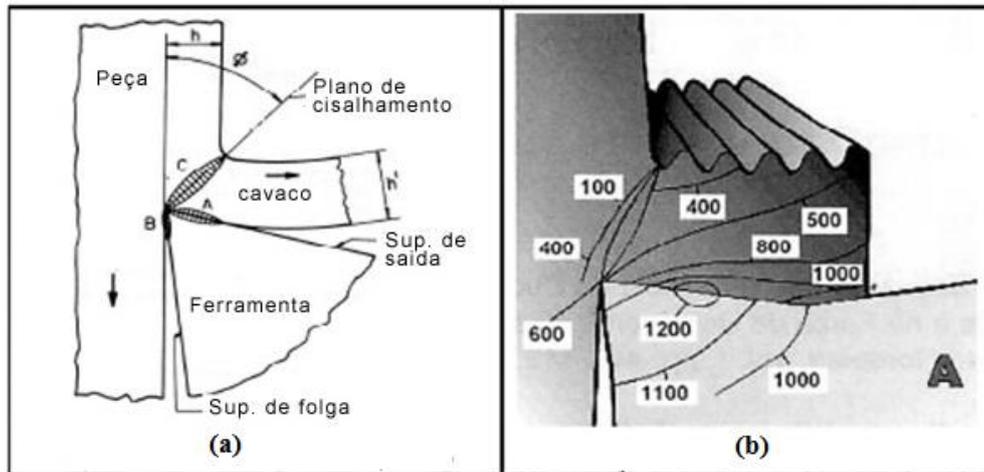
Toda via o processo de modificações nas condições de usinagem com o intuito de se obter uma forma adequada de cavaco devem ser evitadas tanto quanto possível, uma vez que a velocidade de corte e o avanço devem ser determinados de acordo com as condições econômicas de usinagem.

3.4.4 Temperatura de usinagem

O processo de usinagem gera uma grande quantidade de calor, efeito que pode provocar diversas dificuldades no processo, podendo colocar em risco o operador e comprometer a geometria e a dimensão da peça, bem como as propriedades do material que está sendo trabalhado e causar problemas econômicos.

Praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em energia térmica. As fontes geradoras de calor no processo de usinagem, mostradas na Figura 3.4, são a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento primário (região C), o atrito do cavaco com a ferramenta (região A) e o atrito da ferramenta com a peça (região B), de acordo com Diniz et al. (2010).

Figura 3.4 – (a) Fontes de geração de calor na formação do cavaco e (b) distribuição de temperatura em uma ferramenta de metal duro.



Fonte: (Bahia, 2010)

O calor é dissipado através do cavaco, da peça, da ferramenta e do fluido de corte. O percentual do calor gerado que é dissipado por cada um dos meios citados varia com os diversos parâmetros de usinagem.

As altas temperaturas na superfície de saída facilitam a ativação dos mecanismos de desgaste da ferramenta como difusão, abrasão e diminuição de resistência. A temperatura na superfície de folga causa mudanças na microestrutura, tensões residuais e nas propriedades do material da peça, afetando também o desgaste de flanco e falha da ferramenta mesmo que prematuramente (Ackroyd et al., 2001).

O calor que vai para a peça pode resultar em dilatação térmica da mesma, acarretando dificuldades na obtenção de tolerâncias apertadas, além de se correr o risco de danificação da estrutura superficial do material. A porcentagem do calor total que é dissipado pelo cavaco aumenta com o aumento da velocidade de corte. Em velocidades de corte muito altas, a maior parte do calor é carregada pelo cavaco, uma pequena quantia pela peça e uma quantidade menor ainda pela ferramenta (Diniz et al., 2010).

3.4.5 Avarias e desgaste da ferramenta

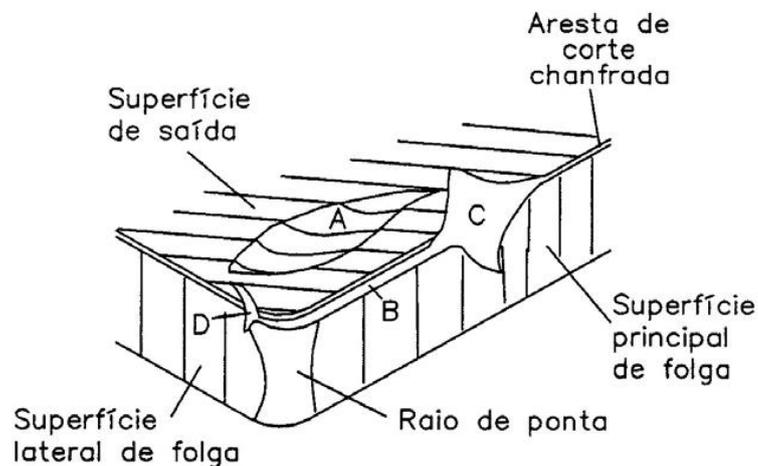
Ao se usar um material podem ocorrer varios tipos de desgastes e avarias nas ferramentas podendo ser observado mais de um único tipo. Assim torna-se importante distinguir desgaste de avaria:

1) Desgaste: é definido como sendo a perda progressiva e ininterrupta de partículas da ferramenta devido à ação do corte durante a usinagem.

2) Avaria: são as demais ocorrências quando não enquadradas na definição de desgaste.

Ferraresi (1977) define avaria como sendo as quebras, trincas, sulcos distribuídos em forma de pente e as deformações plásticas que ocorrem no gume cortante durante a usinagem. Na Figura 3.5 estão apresentadas as principais áreas onde ocorre o desgaste.

Figura 3.5 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.



Fonte: Adaptado de (Dearnley; Trent, 1982).

Na Figura 3.5 pode-se diferenciar ao menos dois tipos ou formas de desgaste na ferramenta:

- **Desgaste de cratera (K_T):** localizado na área A da Figura 3.5, ocorre na superfície de saída da ferramenta, devido ao atrito entre o cavaco e a ferramenta. Este desgaste é menos comum em alguns processos de usinagem, principalmente quando se utilizam ferramentas de metal duro com cobertura, ferramentas cerâmicas e quando o material a ser usinado é frágil. O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste frontal. De acordo com Miranda (1997), diversos pesquisadores afirmam ser o mecanismo de difusão o principal causador do desgaste de cratera. Na Figura 3.6 é apresentada a craterização da superfície de saída da ferramenta de metal duro H10A, resultado do contato cavaco/ferramenta na usinagem do Nimonic 80A.

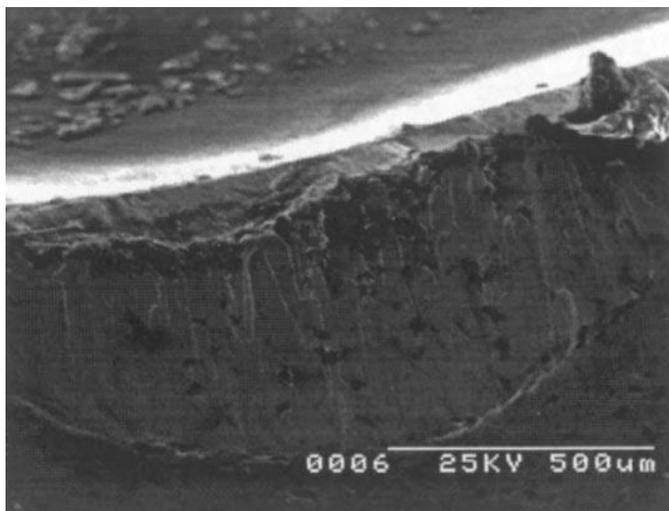
Figura 3.6 - Desgaste de cratera em uma ferramenta de metal duro sem recobrimento na usinagem da Nimonic 80A – $v_c = 90$ m/min., $f = 0,18$ mm/rot. e $a_p = 1,6$ mm.



Fonte: (Faria, 2007).

• **Desgaste de flanco (V_B):** localizado na área B da Figura 3.5, ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre a peça e a ferramenta. É o tipo de desgaste mais comum no processo de usinagem, sendo capaz de alterar as dimensões da peça e comprometer o seu acabamento superficial uma vez que a geometria da aresta de corte é modificada. Este desgaste está fortemente relacionado com o aumento da velocidade de corte. Na Figura 3.7 pode ser visto o desgaste de flanco gerado durante a usinagem da liga de níquel C-263 com ferramenta de metal dura recoberta SNMG 120412.

Figura 3.7 - Desgaste de flanco na ferramenta de metal duro SNMG 120412 na usinagem da liga de níquel C-263 - $v_c = 68$ m/min., $f = 0,127$ mm/rot. e $a_p = 1,27$ mm.



Fonte: (Ezugwu et al., 2004).

Conhecidos os desgastes mencionados anteriormente, desgastes que normalmente são decorrentes da usinagem de ligas de níquel, deve-se lembrar que as propriedades do material de corte são de fundamentais no que diz respeito à vida e ao desgaste da ferramenta assim como os parâmetros adotados para o processo de usinagem. Existem vários mecanismos de desgaste, resultados de processos físicos e químicos durante a operação de usinagem.

Além dos desgastes, podem ocorrer avarias em uma ferramenta de usinagem devido a: deformação plástica da aresta de corte, martelamento dos cavacos, lascamento, trincas e quebra. A deformação plástica da aresta de corte é causada pela elevada pressão aplicada à ponta da ferramenta, aliada à alta temperatura, causando a deformação da aresta. O martelamento ocorre quando a parte da aresta de corte que não está em uso é danificada pelo martelamento de cavacos, a provável causa é o desvio dos cavacos contra a aresta de corte. O lascamento consiste na retirada, durante o processo de corte, de pequenas partículas da ferramenta. A evolução do desgaste pode levar à quebra da ferramenta, embora ela também possa acontecer devido a outros fatores como: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, corte interrompido, etc. (Diniz et al., 2010). As trincas são causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos, como acontece no corte interrompido.

Os desgastes das ferramentas podem ser causados por vários fenômenos. Os principais mecanismos causadores do desgaste da ferramenta são: aresta postiça de corte, difusão, aderência, abrasão mecânica e oxidação (Diniz et al., 2010).

• **Aresta Postiça de Corte (APC):** É uma camada de cavaco que adere à aresta de corte, na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, ou seja, a APC é constituída de partículas do material que está sendo usinado e que se acumulam na superfície de saída da ferramenta. A APC altera as relações geométricas da ferramenta e conseqüentemente a formação do cavaco, fazendo o papel da aresta de corte, e esse efeito é possível devido ao forte encruamento das partículas aderidas do material que formam a APC.

Segundo Diniz et al. (2010), em baixas velocidades de corte, a parte inferior do cavaco em contato com a ferramenta, sob a pressão de corte na zona de aderência, mantém esse contato sem movimento relativo por um espaço de tempo suficiente para se soldar à ferramenta, separando-se de outras porções de cavaco e permanecendo presa à superfície de saída. Com o posterior fluxo de mais cavaco sobre essa camada já presa à ferramenta, ela se deforma e se encrua, aumentando sua resistência mecânica e funcionando como aresta de corte. A aresta postiça de corte tende a crescer gradualmente, até que em um determinado momento rompe-se bruscamente, causando uma perturbação dinâmica. O rompimento da aresta postiça de corte causa um desgaste de flanco muito grande e prejudica sensivelmente o acabamento da peça.

• **Difusão:** Este mecanismo é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na região de corte, ou seja, envolve a transferência de átomos de um material para outro e é fortemente dependente da temperatura e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo. A área desgastada, quando observada no microscópio, é lisa.

Na usinagem, as velocidades relativas entre ferramenta e peça ou entre cavaco e ferramenta são altas e o tempo de contato entre estes materiais é muito pequeno. Isto praticamente levaria o mecanismo de difusão a ser desprezível, se não fosse a existência de uma zona de aderência na interface cavaco-ferramenta (Trent, 1991).

A saturação desta zona não é estável e se renova periodicamente, garantindo o fluxo difusivo. Este mecanismo de desgaste poderá atuar tanto na superfície de saída como na superfície de folga, e a taxa de desgaste irá aumentar com o aumento da velocidade de corte e do avanço (Diniz et al., 2008).

A difusão é responsável principalmente pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte, pois é na superfície de saída da ferramenta que se tem às condições necessárias para a difusão, isto é, alta temperatura (devido às altas velocidades e à zona de aderência) e o

tempo de contato cavaco-ferramenta devido à zona de aderência, onde a velocidade de saída do cavaco é zero (Diniz et al., 1999).

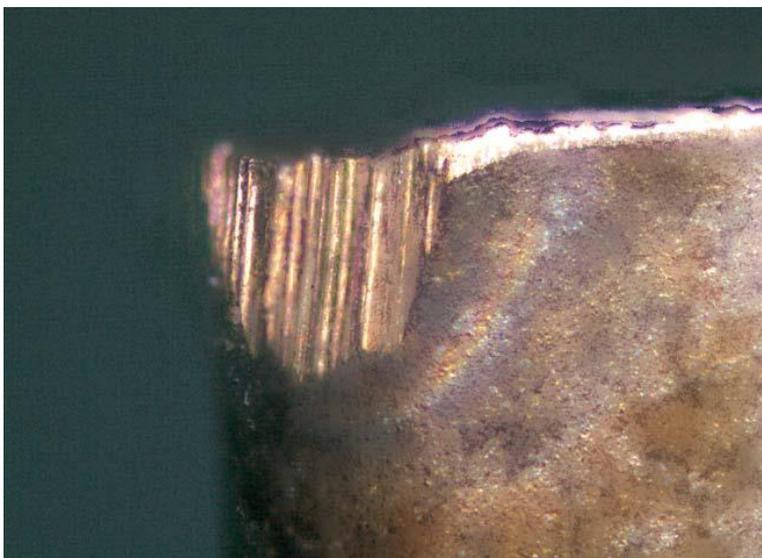
• **Aderência (Attrition):** Este mecanismo ocorre geralmente em baixas velocidades de corte em que o fluxo de material sobre a superfície de saída torna-se irregular. A aresta postiça de corte pode aparecer e o contato com a ferramenta torna-se menos contínuo. Sob estas condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto com o fluxo de material.

Este tipo de desgaste pode ser diminuído com a utilização de fluido de corte (lubrificante) adequado e o recobrimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito. Este fenômeno é responsável tanto pelo desgaste de cratera, quanto pelo desgaste de flanco. Microscopicamente as áreas que sofreram o desgaste por aderência apresentam um aspecto áspero.

• **Abrasão:** O desgaste abrasivo envolve a perda de material por micro-sulcamento, micro-corte ou micro-lascamento causado por partículas de elevada dureza relativa. Estas partículas podem estar contidas no material da peça na forma de óxidos, carbonetos e carbonitretos ou podem principalmente ser partículas da própria ferramenta que são arrancadas por attrition, por exemplo. Na Figura 3.8 é apresentado um desgaste por abrasão observado por Faria (2007) na usinagem da liga de níquel Nimonic 80A com lubrificação abundante, utilizando ferramenta de metal duro sem recobrimento H10A. Este tipo de desgaste é relativamente comum principalmente em ferramentas sem recobrimento, devido às altas temperaturas alcançadas e a ação abrasiva da matriz austenítica e dos carbeto presentes na liga de níquel.

A região desgastada é caracterizada pela presença de inúmeros sulcos abrasivos paralelos à direção de fluxo do material.

Figura 3.8 - Desgaste por abrasão na ferramenta de metal duro H10A $v_c = 90$ m/min, $a_p = 0,8$ mm e $f = 0,15$ mm/rot.



Fonte: (Faria, 2007)

• **Oxidação:** Mesmo que o processo de usinagem ocorra em condições normais de corte, o aquecimento da ferramenta será uma realidade. Assim, as altas temperaturas do processo e a presença de ar e água contida nos fluidos de corte facilitam a oxidação para a maioria dos metais. Na prática, hoje grande parte dos fluidos de corte contém elementos que impedem a oxidação tanto da ferramenta quando da peça usinada e, portanto desviando o olhar dos fluidos como a causa da oxidação. Toda via, caso não se tome os devidos cuidados na armazenagem dos fluidos os mesmos podem se tornar ácidos e provocar oxidação/corrosão na ferramenta.

König e Schemmel (1975), apud Sales (1999), classificam o desgaste por oxidação como um mecanismo de desgaste. Segundo eles, a formação de óxidos é dependente da liga do material da ferramenta e da temperatura de aquecimento. Para materiais de aço ferramenta e de aço rápido, a oxidação praticamente não tem importância, já que a sua resistência a quente é ultrapassada antes que a superfície apresente uma oxidação mais acentuada. Para as ferramentas de metal duro, compostas a base de carbeto de tungstênio e de cobalto, a oxidação inicia-se na faixa de temperatura entre 700 e 800 °C. A adição de óxido de titânio e outros carbonetos dificultam a oxidação.

A região de oxidação normalmente se processa na zona de escorregamento da superfície de saída da ferramenta e na parte inferior da superfície de folga, nos limites do desgaste de flanco. São formados óxidos complexos de tungstênio, cobalto e ferro, que em

decorrência da sua expansão volumétrica em relação ao carbetto de tungstênio, formam elevações na superfície da ferramenta, facilitando o lascamento e a quebra da aresta de corte.

No desgaste por oxidação, detritos podem ser removidos da camada de óxido formada. A oxidação que ocorre sob condições de contato em escorregamento é muito mais rápida do que em condições estáticas e o óxido formado pode crescer no tempo de minutos durante o desgaste por escorregamento. Evidências experimentais sugerem que sob certas condições uma apreciável quantidade de óxido destaca-se como partículas resultando na ocorrência de um desgaste abrasivo posterior.

Todos os mecanismos ou processos de desgaste mencionados podem ser observados na prática. Mas, certamente, um prevalecerá sobre os demais, dependendo principalmente do material da peça, da ferramenta, da operação de usinagem, das condições de corte, da geometria da ferramenta de corte e do emprego de fluido de corte.

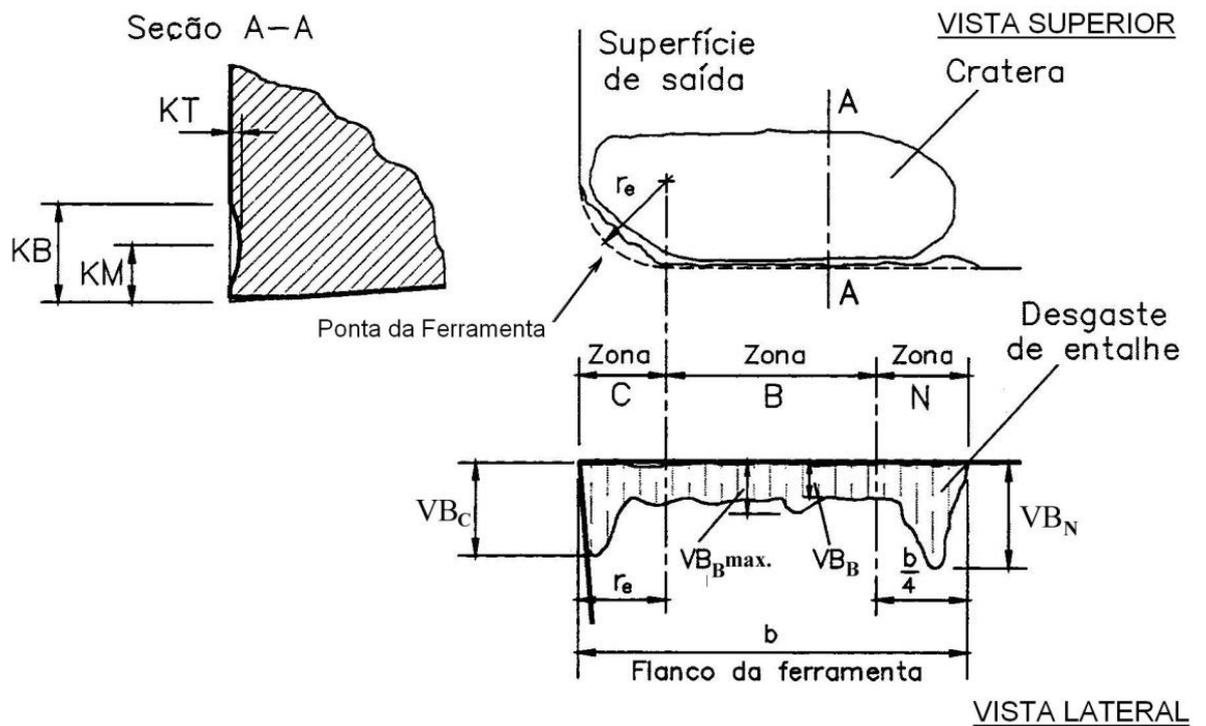
Segundo Diniz et al. (2010) a separação quantitativa da contribuição de cada um desses fenômenos para a formação do desgaste é praticamente impossível, mas pode-se visualizar um quadro qualitativo da importância de cada componente nas diferentes velocidades de corte. Em velocidades de corte baixas, o desgaste é relativamente elevado por causa do cisalhamento da aresta postiça de corte e da aderência. Em velocidades de corte maiores, o desgaste é causado principalmente pelos fatores cuja intensidade depende da temperatura de corte, como a abrasão, a difusão e a oxidação.

Em resumo o desgaste de flanco é causado principalmente por abrasão (em altas velocidades de corte), por aderência e pelo cisalhamento da APC. O desgaste de cratera ocorre principalmente por difusão, mas também por aderência e o desgaste de entalhe por oxidação (Diniz et al. 2010).

Na Figura 3.9 pode-se observar os parâmetros utilizados pela ISO 3685 (1993) para quantificar esses desgastes. Os principais desgastes são:

- Profundidade de cratera (KT);
- Desgaste de flanco médio (VB_B);
- Desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax});
- Desgaste de entalhe (VB_N).

Figura 3.9 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte



Fonte: (ISO 3685, 1993).

O critério de fim de vida recomendado pela ISO 3685 (1993) para ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmico é:

- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3$ mm (desgaste regular);
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{Bmax.} = 0,6$ mm;
- Profundidade da cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$ onde f é avanço em mm/rot.;
- Falha catastrófica.

A norma ainda recomenda que quando o desgaste de entalhe predomine como no caso da usinagem de ligas de Ni com metal duro ou cerâmicas, deve-se adotar um valor de $VB_N = 1,0$ mm como critério de fim de vida. Desta forma, quando qualquer um dos limites de desgaste for ultrapassado, recomenda-se a afiação ou substituição da ferramenta de corte.

3.5 FERRAMENTAS DE CORTE

A necessidade do uso de ferramentas pelo homem é visto desde a pré-história, para sua sobrevivência seja na construção de objetos ou na caça de animais. As ferramentas eram feitas de madeira ou pedra e futuramente por metais e cerâmicas. De um modo geral as ferramentas tem um papel extremamente importante na evolução humana, pois auxiliaram o homem a se adaptar as adversidades do meio ambiente.

Com o rápido avanço tecnológico na área de Ciência dos Materiais e consequentemente a rápida evolução dos materiais aplicados à equipamentos modernos, e que cada vez mais é necessário a utilização de peças com geometria complexas para determinadas aplicações, tem-se exigido muitos dos processos de fabricação em especial o de usinagem. Com isto, pesquisadores e empresas fabricantes de ferramentas tem se empenhado cada dia mais no desenvolvimento de novos materiais. Os fabricantes de tornos CNC por sua vez acompanham essa evolução com máquinas cada vez mais rápidas e eficientes, bem como a disponibilidade de programas CAD/CAM. Materiais para ferramentas de corte, como o diamante sintético policristalino (PCD), nitreto cúbico de boro (CBN), metal duro e as ferramentas cerâmicas abriram novas possibilidades de usinagem.

3.5.1 Seleção da ferramenta

Para a escolha correta da ferramenta a ser utilizada no processo de usinagem deve-se considerar os seguintes parâmetros:

- Material a ser usinado;
- Processo de usinagem;
- Condição da máquina-ferramenta;
- Forma e dimensões da ferramenta;
- Custo do material da ferramenta;
- Condições de usinagem;
- Condições de operação.

Qualquer que seja o material da ferramenta é necessário que o mesmo apresente quatro características principais:

- Dureza a quente: dependendo do tipo de operação, a temperatura da ferramenta não poderá exceder a uma temperatura de 1000 °C;
- Resistência ao desgaste: principalmente no que se refere ao desgaste por abrasão, isto é, resistência ao atrito. Diretamente relacionada à dureza a quente do material;
- Tenacidade – representa a maior quantidade de energia necessária para romper o material;
- Estabilidade química: não deve ser reativo para evitar o desgaste por difusão (Diniz, et. Al. 2010).

3.5.2 Utilização da lubrificação durante o processo de Usinagem

Uma vez que a temperatura representa um dos principais motivos de falha da ferramenta durante o processo de usinagem, é sensato que a atenção seja focada no sentido de minimizar ou mesmo eliminar as altas temperaturas geradas nas interfaces ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Isso pode ser conseguido através do uso de fluido abundante, obtendo-se uma melhor usinabilidade a velocidades mais baixas, quando as temperaturas na zona de corte são relativamente menores. O fluido refrigerante age como lubrificante, minimizando o atrito e reduzindo o componente de forças e conseqüentemente a taxa de desgaste da ferramenta. Em altas velocidades de usinagem o refrigerante tem ação insignificante na interface ferramenta-peça ou ferramenta-cavaco na qual estão sob condições de “aprisionamento”. O fluido refrigerante tende a se vaporizar devido às altas temperaturas geradas na aresta da ferramenta. A efetividade do fluido refrigerante é restrita pela perda de suas propriedades refrigerantes na película que se encontra em ebulição. A temperatura desta película em um fluido convencional fica em torno de 350 °C (Paul; Chattopadhyay, 1995).

Segundo Ezugwu et. al. (2003), a aplicação de refrigeração convencional não é o caminho para a melhoria das condições de usinagem de superligas uma vez que o refrigerante é incapaz de alcançar a zona de corte devido à formação de uma manta de vapor impedindo a penetração de refrigerante na zona de alta temperatura. O fluxo de cavaco pode ainda impedir o acesso de refrigeração na zona de corte. A administração de refrigeração diretamente na zona de corte é necessária para assegurar uma eficiente e econômica usinagem das superligas. Altas pressões de refrigerante, refrigeração criogênica e Mínima Quantidade de Fluido - MQF

são técnicas utilizadas para se atingir este objetivo. Embora sistemas a altas pressões sejam eficientes durante a usinagem, problemas associados com o descarte de refrigerante e a névoa gerada, bem como a dificuldade de retenção do refrigerante pressurizado na máquina sem vazamentos devem ser considerados.

Refrigerantes a base de água são preferidos em torneamento a altas velocidades, fresamento e retificação por causa de seu grande poder refrigerante. Eles podem ser óleos solúveis ou soluções químicas. Fluido de corte do tipo névoa é adequado para as operações simples de torneamento de todas as ligas (ASM handbook, 1990).

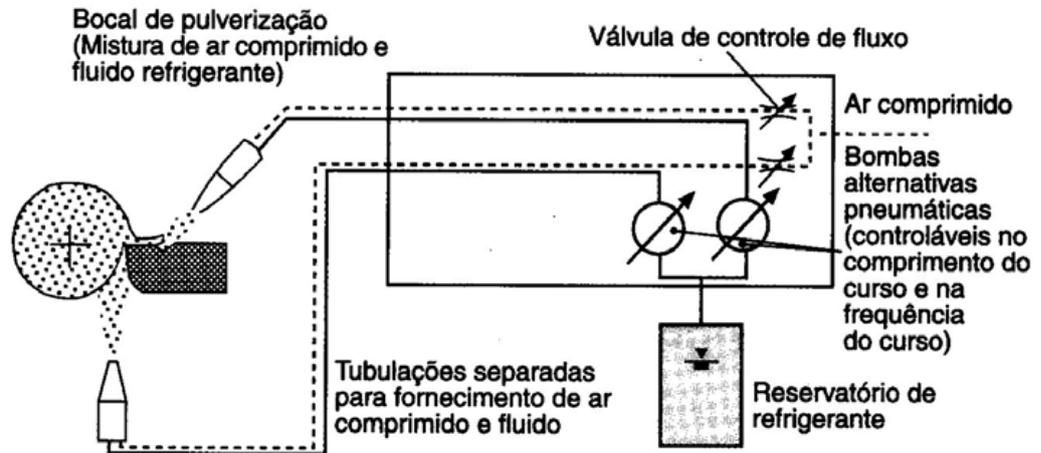
O uso de MQF é uma tecnologia desenvolvida que consiste na administração de pequenas quantidades de lubrificante na interface cavaco-ferramenta durante a usinagem. Nesta técnica são utilizados cerca de 6 a 70 ml/h de refrigerante/lubrificante contra 300 a 4000 ml/min. utilizados em usinagem convencional com lubrificação abundante (Derflinger et. al., 1999). A técnica de MQF envolve a aplicação de uma pequena quantidade de água e óleo solúvel, empregado através de ar comprimido que impulsiona a solução por meio de um jato pulverizado na aresta de corte da ferramenta. Esta técnica tem demonstrado sucesso em processos de retificação, fresamento e torneamento (Brinksmeier et. al., 1999).

Esta melhoria na usinabilidade pode ser atribuída à capacidade do óleo lubrificante, em forma de vapor, ser capaz de penetrar na interface ferramenta-peça e, deste modo, reduzir o atrito e as componentes das forças geradas durante a usinagem. A redução da temperatura na zona de corte através do uso do MQF é obtida devido à evaporação contrariamente à condução, observada nas aplicações com fluido abundante ou a altas pressões. O fino spray de óleo durante o processo de lubrificação da zona de corte é ainda vaporizado pelas altas temperaturas geradas. Uma quantidade significativa de calor é absorvida pelo efeito da evaporação do lubrificante, deste modo contribuindo para uma considerável redução da temperatura na zona de corte. Uma eficiente refrigeração poderá deste modo, ser obtida se um lubrificante com elevada entalpia de evaporação for utilizado. Água é uma boa escolha, mas a desvantagem é que causa a oxidação do equipamento. A principal desvantagem do uso do MQF é a geração de névoa, que pode vir a causar riscos à saúde do operador. Estes riscos podem ser minimizados através de eficientes sistemas de exaustão. Os resultados que estão sendo obtidos com o MQF são animadores, mas necessitam de uma maior pesquisa capaz de explorar todo o potencial desta tecnologia. As investigações deverão incluir o efeito das taxas de mistura ar-óleo, pressões ideais para o refrigerante de modo a aumentar a vida da ferramenta e a integridade dos componentes produzidos com este sistema (Ezugwu et. al., 2003).

Como afirma Brockhoff e Walter (1998) e Heisel et al. (1998) existem principalmente três tipos diferentes de sistemas de mínima quantidade de fluido. De um lado estão os sistemas de pulverização de baixa pressão, onde o refrigerante é aspirado por uma corrente de ar e levado à superfície ativa com uma mistura. Esses sistemas se distinguem por um fluxo volumétrico de refrigerante de aproximadamente 0,5 a 10 l/h. Eles são usados principalmente para a refrigeração com emulsões, produzem uma otimização notável e somente podem ser dosados grosseiramente. O segundo tipo de sistema usa bombas dosadoras com alimentação pulsatória de uma quantidade definida de lubrificante para a superfície ativa, sem ar. As taxas de fluxos são ajustáveis numa faixa entre 0,1 e 1,0 ml por ciclo, com até 260 ciclos por minuto. Estes sistemas são utilizados principalmente em processos intermitentes. O terceiro e mais usado tipo de sistema de refrigeração de quantidade mínima de fluido é o de pressão, em que o refrigerante é bombeado para o bocal através de uma tubulação de suprimento em separado. No bocal ele é misturado com ar comprimido fornecido separadamente, de forma que as quantidades de ar e lubrificante podem ser ajustadas independentemente. Este tipo de sistema é uma alternativa particularmente interessante, porque combina a funcionalidade da refrigeração com um consumo extremamente baixo, na faixa 5 a 100 ml/h. Ao mesmo tempo, a mistura coaxial de fluido refrigerante e ar no bocal previne enormemente a nebulosidade. Os ensaios realizados neste trabalho se referem ao emprego da técnica do sistema de refrigeração de quantidade mínima por pressão e fluido abundante.

Heisel et al. (1998) apresentam um diagrama esquemático de um sistema de refrigeração de quantidade mínima com o princípio de pressão descrito e os seus componentes ilustrados na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Esquema que mostra e um Sistema de Lubrificação de Mínima Quantidade de Fluido.



Fonte: (Heisel et al., 1998).

Segundo Heisel et al. (1998), a distância entre o bocal e a área de corte, ângulo de pulverização ou ajuste relativo à superfície de saída e flanco da ferramenta não são parâmetros de muita importância. Isto torna mais fácil o uso da refrigeração de quantidade mínima nas máquinas de produção.

3.5.3 Vida da ferramenta

Segundo Diniz, et. Al. (2010) a vida de uma ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingido este tempo a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. Os fatores que determinam a fixação de um determinado valor limite de desgaste para o fim da vida da ferramenta são vários. A ferramenta deve ser retirada de uso quando:

- Os desgastes atingirem proporções tão elevadas que se receia a quebra da aresta de corte;
- Devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta não sendo mais possível a obtenção de tolerâncias apertadas e/ou bons acabamentos superficiais da peça, principalmente em operações de acabamento;

- Os desgastes acentuados, fazendo com que a temperatura da aresta cortante ultrapasse a temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte;
- O aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no funcionamento da máquina (Diniz, et al. 2010).

A vida de uma ferramenta é geralmente expressa em minutos, porém em certos casos prefere-se defini-la pelo percurso de corte ou percurso de avanço correspondente. A vida T , em minutos, é dada pela equação 3.17 a seguir:

$$T = \frac{L_c}{V_c} \text{ (min)} \quad (3.1)$$

Onde:

L_c = percurso de corte, em metros;

V_c = velocidade de corte, em m/min.

Nas ferramentas de metal duro o desgaste frontal é geralmente maior que o desgaste de cratera. Os desgastes aumentam progressivamente até a quebra da cunha cortante, que deve ser evitada devido às suas consequências danosas. Na utilização de ferramentas de metal duro com cobertura, o desgaste de flanco da ferramenta (nestas ferramentas o desgaste de cratera, em geral é muito pequeno ou inexistente) cresce lentamente, devido à alta resistência ao desgaste das camadas de cobertura da ferramenta, até atingir valores de VB da ordem de 0,3 a 0,4 mm (Diniz, et. Al. 2010).

Outro fator de influente na vida da ferramenta está relacionado à sua geometria. Uma diminuição do ângulo de posição para um mesmo avanço e mesma profundidade de usinagem, acarreta uma diminuição da espessura de corte. Esta variação do ângulo de posição permite maior vida da ferramenta, pois resulta numa melhor distribuição da temperatura de corte num trecho maior da ferramenta.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma liga a base de níquel, o NIMONIC 80A laminado à quente. Sua composição química está especificada no Quadro 4.1.

Quadro 4.1– Composição química nominal das superligas de níquel (Cartech, 2013).

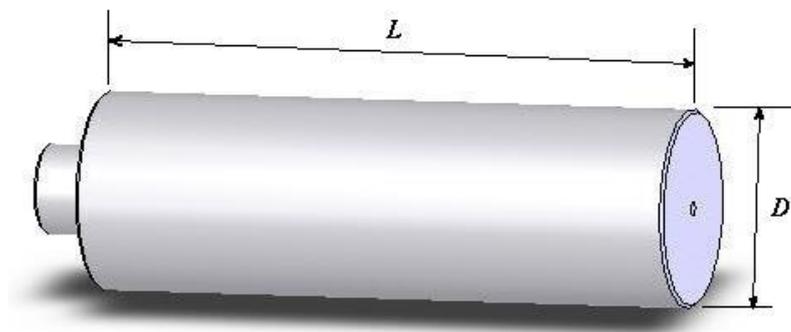
Ligas	Ni	Cr	Co	Mo	S	Nb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	B
Nimonic 80A	74,7	19,5	1,1	---	---	---	1,3	2,5	---	0,1	0,7	0,06	---

Fonte: (Villares Metals)

4.2 CORPOS DE PROVA

Os ensaios de usinagem foram realizados em um corpo de prova da liga, com diâmetro ($D=50\text{mm}$) e comprimento ($L=180\text{mm}$) de acordo como recebido. Para a fixação na placa de três castanhas no torno CNC, foi necessário, inicialmente, a usinagem de um rebaixo conforme pode ser observado na figura 4.1.

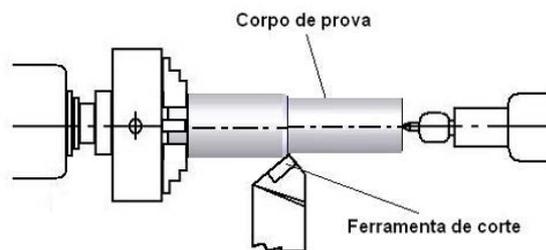
Figura 4.1 - Representação do corpo de prova para uso nas operações de torneamento.



4.3. ENSAIOS DE USINAGEM

Os ensaios de torneamento cilíndrico externo foram realizados considerando os parâmetros de usinagem (desbaste). Inicialmente, esses parâmetros foram escolhidos de acordo com o fabricante da ferramenta de corte utilizada. Na figura 4.2, pode-se observar o esquema empregado.

Figura 4.2 - Representação do ensaio de torneamento cilíndrico externo



Fonte: (Cunha,2004)

Os ensaios foram realizados em um torno CNC-MACH 9-CENTUR 30S, 25 a 3500 rpm, com potência de 7,5 CV, marca ROMI (Figura 4.3), pertencente ao Departamento de Materiais e Tecnologia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, UNESP. Foi utilizada uma pastilha de metal duro com revestimento TiAlN TNMG 160408-23 Classe S15 (GC 1105) e um suporte, PTG NR 2020 K16 (Sandvik).

Figura 4.3 - Torno CNC Romi CENTUR 30S



Após cada etapa do torneamento, para as medidas dos diâmetros dos corpos de prova foi utilizado um paquímetro Mitutoyo de 0 a 200 mm com sensibilidade de 0,05mm.

O fluido de corte utilizado de forma abundante nos ensaios foi o Lubrax OP-38-EM na proporção de 10%, desenvolvido para atender às operações de usinagem para todos os tipos de metais, excetuando-se o magnésio. Este fluido de corte consiste em um óleo emulsionável de base naftênica para corte, usinagem e acabamento de metais. Este óleo é recomendado para diversas operações de usinagem de metais, mesmo nos casos que exigirem grande capacidade de refrigeração a alta velocidade de corte para a execução das operações. O óleo forma emulsões do tipo óleo em água, leitosas, homogêneas e estáveis em todas as concentrações indicadas para utilização. A vazão de fluido de corte durante a realização dos ensaios foi de aproximadamente 4,8 litros/minuto.

Para o desenvolvimento dos ensaios em que se aplicou a técnica de Mínima Quantidade de Fluido (MQF) utilizou-se o equipamento *Accu-lube*, fabricado pela empresa *ITW Chemical Products Ltda*, o qual permite de maneira independente a regulação da vazão de ar comprimido e lubrificante além de usar um sistema pulsante de fornecimento de óleo. Seguindo orientação do fabricante foi utilizado o lubrificante de base vegetal LB 1000, o qual é indicado para usinagem média e pesada de materiais ferrosos. A vazão e pressão ajustadas para o teste foram de 5 ml/h e 5 bar, respectivamente. O equipamento que permite a utilização do MQF pode ser descrito como tendo basicamente: compressor, regulador de pressão, rotâmetro, dosador e bico aspersor. O equipamento de MQF permite uma fina regulação do volume de lubrificante/ar separadamente, por meio de um registro tipo agulha, sem atomiza-lo

em um fluxo de ar à pressão constante de 5,0 bar (kgf/cm^2), evitando vapores e dispersão de partículas no ar. É apresentada na Figura 4.6 a unidade de controle do equipamento de MQF, onde é feita a dosagem do lubrificante e a regulagem da vazão de ar comprimido. Cada parte que compõe o equipamento foi numerada para facilitar a descrição e função. O modelo permite um ajuste fino da velocidade do ar para a formação de névoa com diferentes valores de vazão. O bico aspersor foi colocado a cerca de 30 mm da ferramenta direcionado para a superfície de saída/interface.

4.4 EQUIPAMENTOS ADICIONAIS

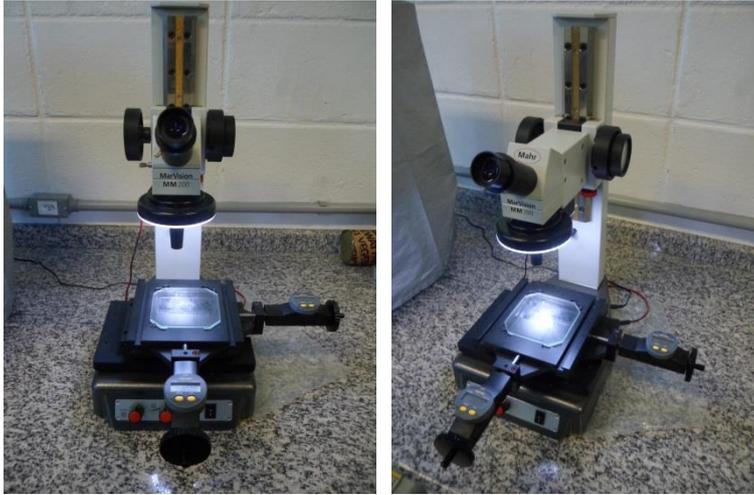
A rugosidade da peça foi avaliada após cada etapa do processo empregando-se um rugosímetro Mahr – modelo MarSurf M300 + RD18 (Figura 4.4).

Figura 4.4 - Rugosímetro Mahr – modelo MarSurf M300 + RD18



A cada passe realizado o desgaste da ferramenta era acompanhado através da utilização de um microscópio da marca Mahr, modelo MarVision MM 200 que possui micrometros digitais que por sua vez permitiu a medição dos desgastes.

Figura 4.5 - Microscópio Mahr, modelo MarVision MM 200



Os cavacos foram coletados sempre no primeiro e último passe da ferramenta para posterior análise. Foi utilizado um microscópio da marca Zeiss, modelo Stemi 2000, para a realização das imagens das ferramentas visando o estudo dos aspectos do desgaste para cada condição de corte utilizada.

Figura 4.6 - Microscópio Zeiss, modelo Stemi 2000.



A dureza das peças foram medidas antes da usinagem, bem como também foram medidas as durezas das amostras após usinagem e dos cavacos.

Figura 4.7 – Microdurômetro Wilson[®] Instruments, modelo 401 MVD.



Foi utilizado um microscópio da marca NIKON, modelo EIPHOT 200, para a realização das imagens dos cavacos e dos corpos de prova visando uma possível caracterização dos mesmos.

Figura 4.8 - Microscópio NIKON, modelo EIPHOT 200



Nas ferramentas em que foi identificada a adesão de material da peça, podendo caracterizar a presença de aresta postiça de corte, as mesmas foram submetidas à análise por Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, sendo utilizado o equipamento da marca Zeiss, modelo EVO LS15. Essa atividade foi realizada também para se obter maiores detalhes do mecanismo de desgaste da aresta da ferramenta de corte, além de se fazer microanálises semi-quantitativas de material em determinadas regiões da ferramenta, através de um sistema de micro análises EDS (Energy Dispersive Spectroscopy – Espectroscopia de Energia Dispersiva) da marca Oxford-Instruments, modelo INCA x-act. O equipamento de MEV foi utilizado ainda para análise da microestrutura das ligas visando identificar a presença de carbeto metálicos.

Figura 4.9 - Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss, modelo EVO LS15



Figura 4.10 – EDS Oxford-Instruments, modelo INCA x-act



A preparação das amostras para realização dos ensaios metalográficos, visando à análise da microestrutura da matéria-prima utilizada nos ensaios, seguiram a seguinte sequência de preparação: embutimento da amostra, lixamento, polimento e ataque químico.

4.5 METODOLOGIA APLICADA AOS ENSAIOS

O desempenho da ferramenta de corte foi considerado em termos de: v_c , f , a_p e acabamento superficial. O critério escolhido de fim de vida da ferramenta, foi o desgaste de flanco (VB max.) igual a 0,5mm. Embora seja usual o valor de VB=3,5mm para fim de vida da ferramenta em ensaios de usinagem, foi escolhido VB=0,5mm para propiciar um comprimento de corte que possibilitasse o estudo da progressão do desgaste e do comportamento da rugosidade.

A metodologia utilizada nos ensaios possibilitou o estudo do comportamento das ferramentas com relação à progressão do desgaste (VB) em função do comprimento de corte

(Lc). Com relação às variações das rugosidades média (Ra) e máxima (Ry); estas foram analisadas em função do comprimento de corte (Lc). A velocidade de corte (v_c) foi o principal parâmetro a ser variado, entretanto, para a ampliação das análises, o avanço (f), também foi variado, conforme Quadro 4.2.

Quadro 4.2 Valores dos parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios.

Vc (m/min)	ap(mm)	f(mm/volta)
75	0,8	0,15 - 0,18
90	0,8	0,15 - 0,18

4.5.1 Análise da superfície usinada

O valor de *cut-off* depende da distância entre os sulcos deixados pelo avanço (f) da ferramenta no processo de usinagem. Para os avanços: $f=0,15$ e $f=0,18$ mm/volta aplicados nos ensaios de torneamento (perfil periódico), liga à base de níquel Nimonic 80 A, foi utilizado um *cut-off* de 0,8mm, distância entre sulcos de 0,1mm a 0,32mm, conforme NBR 6405/1988.

A cada passe realizado sobre o corpo de prova, mediu-se a rugosidade da superfície para o comprimento de corte alcançado no passe. Foram feitas três medidas em torno do corpo de prova, dispostas a um ângulo de 120° .

4.5.2. Análise do desgaste da ferramenta

A ferramenta era levada ao microscópio para a medição do desgaste ao fim de cada passe. Os valores medidos eram colhidos observando sua evolução e o instante em que o desgaste alcançava o limite pré-determinado para o fim de vida da ferramenta ($VB_{Bmax} = 0,5$ mm), no qual os ensaios eram interrompidos. Depois de atingido o fim de vida das ferramentas, as mesmas eram identificadas e posteriormente encaminhadas ao estereoscópio Zeiss para aquisição das imagens dos desgastes medidos. As imagens obtidas eram usadas para buscar as evidências que pudessem identificar os diversos tipos de desgaste encontrados bem como os mecanismos atuantes.

Foram obtidas diversas imagens, sendo utilizadas no trabalho somente aquelas que permitissem uma melhor visualização da região e do tipo de desgaste.

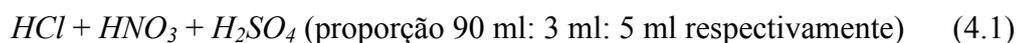
Após a etapa de microscopia ótica das ferramentas, seguiram para análise no Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV aquelas que as arestas de corte apontaram para a deposição de cavaco sobre a aresta ou a presença de APC. Realizou-se essa etapa para tentar-se identificar detalhadamente o mecanismo de desgaste da aresta da ferramenta de corte, além de se fazer micro análises semi-quantitativas dos elementos químicos depositados em determinadas regiões da ferramenta, através do EDS (Energy Dispersive Spectroscopy – Espectroscopia de Energia Dispersiva).

4.5.3 Análise da matéria-prima

Com o objetivo de avaliar a presença de precipitados, distribuído através da estrutura dos materiais, foi preparada amostra de cada uma das três ligas utilizadas neste estudo para que pudessem ser analisadas através do Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV e os constituintes identificados e quantificados por meio do EDS (Energy Dispersive Spectroscopy).

Devido à propriedade anticorrosiva do níquel, o ataque químico para análise microestrutural das superligas é uma tarefa complexa que exige vários testes preliminares antes do ataque ao espécime a ser analisado. Deste modo, durante a preparação das amostras para análise, uma série de variações no tempo do ataque químico foi experimentada visando identificar o tempo ideal para aplicação nas demais amostras. Assim os melhores resultados foram obtidos por volta de 30 segundos de ataque na temperatura aproximada de 26 °C, no entanto deve-se levar em conta o grau de deformação pela qual o espécime passou uma vez que quanto maior a deformação maior será a energia livre e, portanto mais rápido ocorrerá o ataque.

Os reativos utilizados no ataque são específicos para cada material e tipo de detalhe que se deseja observar. No caso para as superligas de níquel foi utilizada a proporção de reagente definida na equação 4.2 segundo a norma ASTM E407:



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta parte do presente trabalho serão apresentados e discutidos os resultados obtidos referentes à usinagem da superliga à base de níquel NIMONIC 80 A para compreensão e entendimento do comportamento no processo da liga. Assim sendo serão apresentados dados sobre a vida da ferramenta, bem como os mecanismos de desgaste das ferramentas nas duas condições de lubrificação (abundante e MQF). Serão ainda apresentados os resultados obtidos sobre a rugosidade da peça além dos tipos de cavacos gerados durante o processo.

Os resultados serão apresentados primeiramente na condição de lubrificação abundante e posteriormente na condição da utilização de MQF.

5.1 LUBRIFICAÇÃO ABUNDANTE

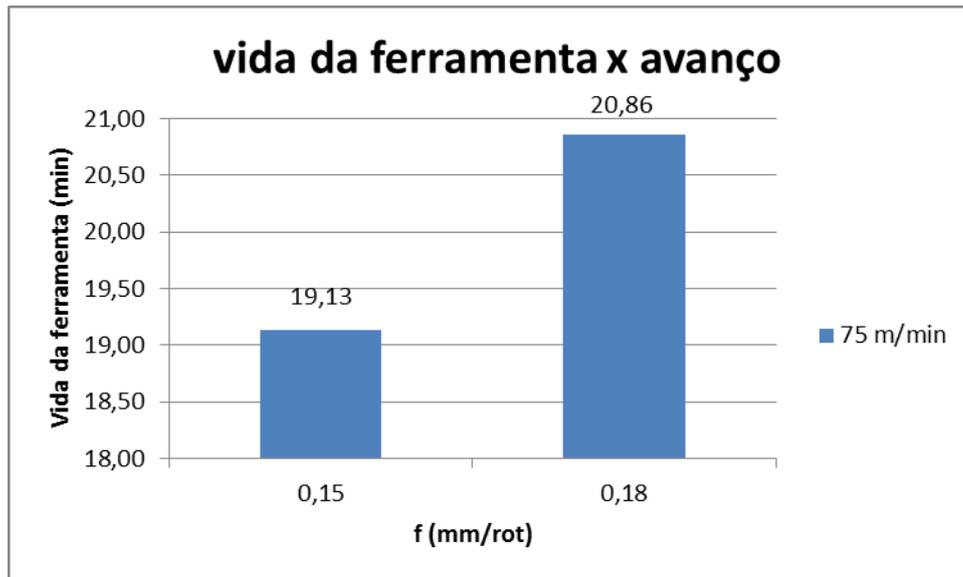
5.1.1 Vida da ferramenta

Serão apresentados a seguir, gráficos que indicam a vida da ferramenta em função dos parâmetros de usinagem utilizados, para cada parâmetro obteve-se um gráfico e ao fim será apresentado um gráfico comparativo entre os parâmetros. A vida da ferramenta é expressada como sendo o tempo em que ferramenta trabalha efetivamente subtraindo-se os tempos passivos, ou seja, tempo de utilização da ferramenta subtraído do tempo não utilizada até que a mesma perca sua capacidade de corte de acordo com um critério adotado previamente. Quando este critério pré-estabelecido é alcançado, a ferramenta deve ser novamente afiada ou substituída para que o processo siga com qualidade e eficiência. Assim como mencionado anteriormente, o critério adotado para fim de vida da ferramenta durante os ensaios foi o desgaste de flanco ($VB_{B_{max}}$) igual a 0,5 mm, que foi definido com o objetivo de se obter um comprimento de corte que possibilitasse o estudo da progressão do desgaste e do comportamento da rugosidade para cada um dos parâmetros utilizados.

No gráfico 5.1 é apresentada a evolução da vida da ferramenta para os parâmetros 75-15-8 e 75-18-8, onde nota-se que há um aumento na vida da ferramenta para maiores valores de avanço. Tal efeito pode ser explicado devido a uma provável elevação da temperatura da peça que faz com que a mesma sofra uma diminuição de sua dureza facilitando então o seu corte.

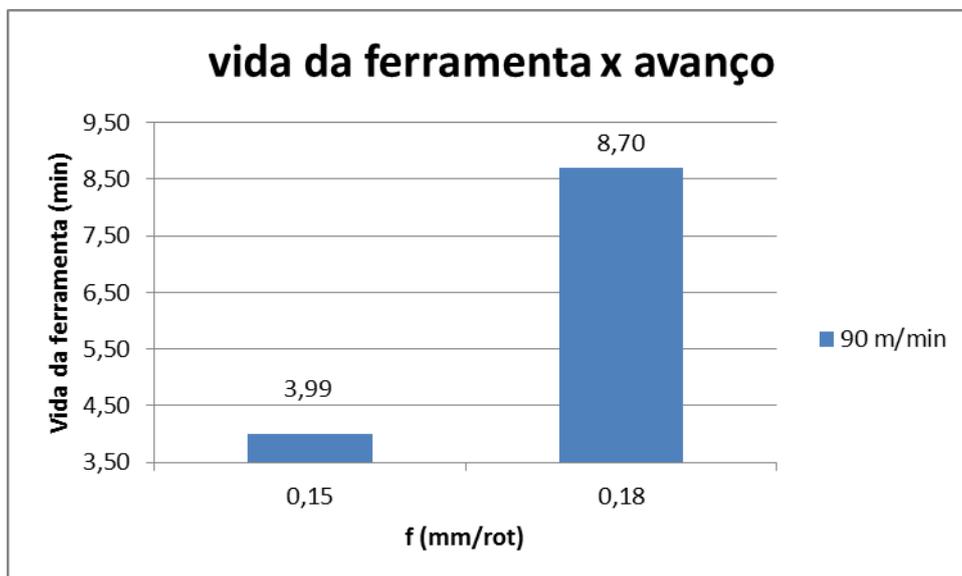
Segundo Bahia, (2010) para avanços muito elevados o efeito de redução da dureza da peça é superado pelas altas temperaturas na aresta de corte que ocasiona uma perda de dureza da ferramenta devido à baixa condutividade térmica das superligas de níquel, acelerando a degradação do revestimento e o desgaste da ferramenta.

Gráfico 5.1 - Vida da ferramenta para os parâmetros 75-15-8 e 75-18-8.



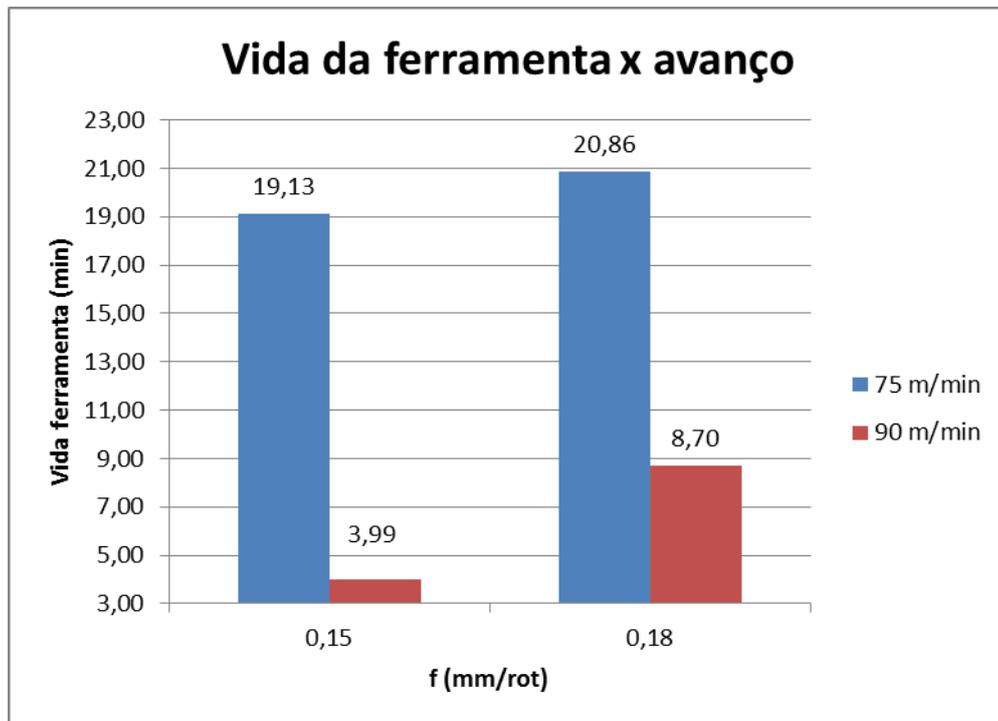
No gráfico 5.2 é apresentada a evolução da vida da ferramenta para os parâmetros 90-15-8 e 90-18-8, e com isso podemos notar que assim como no gráfico anterior (gráfico 5.1) ocorre o mesmo efeito de ganho de vida da ferramenta com o aumento do avanço.

Gráfico 5.2 - Vida da ferramenta para os parâmetros 90-15-8 e 90-18-8



Através do gráfico 5.3 consegue-se fazer uma comparação entre a vida da ferramenta para ambas as velocidades de corte utilizadas, ou seja, 75 m/min e 90 m/min. Como foi dito anteriormente, nota-se um aumento da vida da ferramenta de acordo com o aumento do avanço utilizado. Assim comparativamente, temos que para velocidades menores, no caso de 75m/min a ferramenta atingiu vida superior, entre 19,13 e 20,86 minutos aproximadamente, contra 3,99 e 8,70 minutos aproximadamente para velocidade de 90 m/min. Este efeito pode ser associado a temperaturas mais elevadas na aresta de corte quando são utilizadas maiores velocidades. Entretanto, observou-se em termos percentuais que houve um ganho maior da vida da ferramenta para velocidade de 90 m/min, ganho este de aproximadamente 118 %, contra 9% para a velocidade de 75 m/min.

Gráfico 5.3 – Vida da ferramenta “comparação entre as velocidades de corte”.



Analisando a vida da ferramenta em relação ao cavaco gerado é possível verificar que a vida da ferramenta foi superior para cavacos mais longos, sendo estes comumente gerados na velocidade de 75 m/min logo nos primeiros passes. É possível perceber também uma maior regularidade dos cavacos com os parâmetros 75-15-8. Provavelmente tal regularidade dos cavacos está associada às menores temperaturas atingidas durante os ensaios com estes parâmetros, suficientes para reduzir a dureza da peça sem comprometer seriamente a ferramenta.

Figura 5.1 - Cavaco gerado no primeiro passe da ferramenta para os parâmetros 75-15-8.



Em contrapartida, a vida da ferramenta em relação ao cavaco gerado respeitando os mesmos parâmetros, ou seja, para velocidade de corte de 75m/min porém para o último passe do processo, obteve-se cavacos em forma de lascas ou pedaços, conforme a figura 5.2.

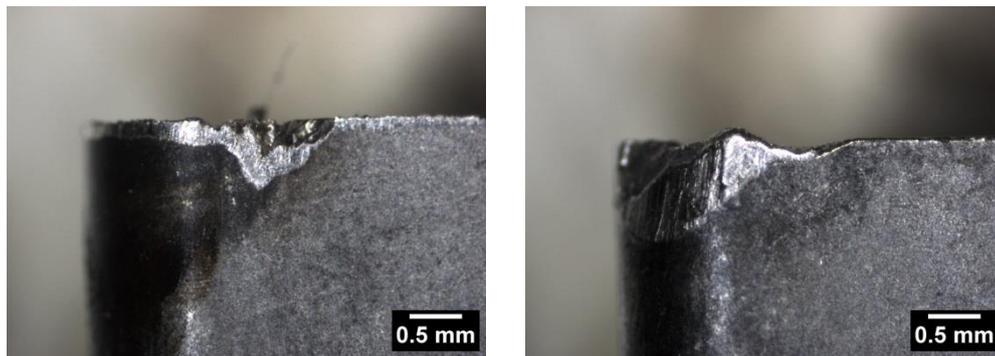
Figura 5.2 – Cavaco gerado no último passe da ferramenta para os parâmetros 75-15-8.



Nas ferramentas da figura 5.3 podemos notar que o desgaste de flanco foi maior na imagem (b), também pode-se observar uma possível adesão de material que será discutida

posteriormente, tais alterações na geometria da ferramenta reduzem consideravelmente sua capacidade de remoção de material e sua vida útil. Na imagem (a) fica evidente a presença de entalhe na aresta da ferramenta e o desgaste de flanco em menor intensidade que na imagem (b). Assim para maiores velocidades, o desgaste de flanco é mais acentuado com a presença de outros tipos de desgastes que ocorrem devido a maior energia de ativação gerada pelo processo, sem contar que haverá mais de um tipo de desgaste associado ao processo.

Figura 5.3 – Desgaste das ferramentas (a) parâmetro 75-15-8 (b) parâmetro 90-15-8.



(a)

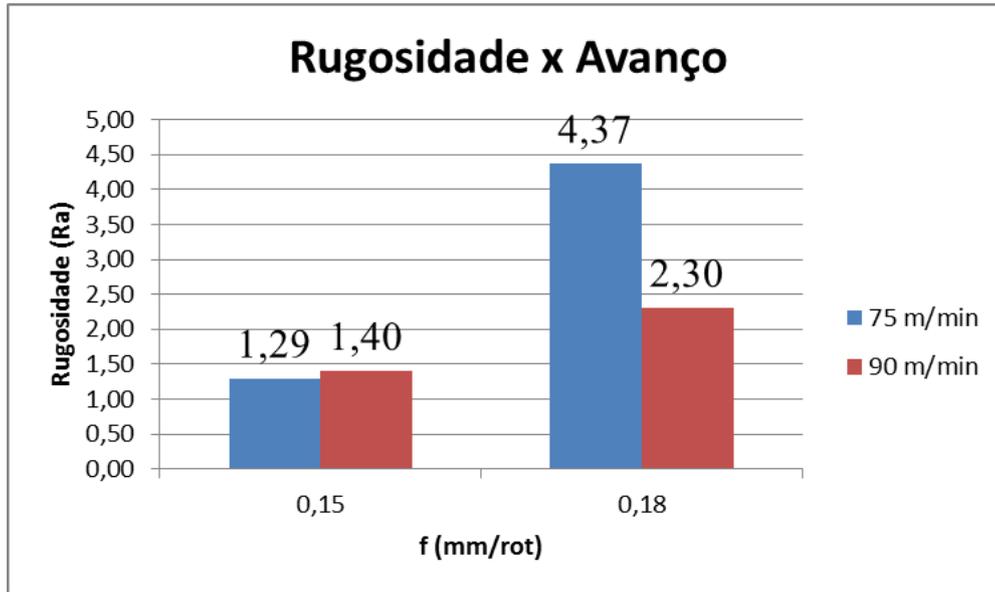
(b)

5.1.2 - Rugosidade

Serão apresentados neste tópico os valores das rugosidades e sua respectiva análise com relação ao fim de vida da ferramenta. Sabe-se que o acabamento superficial é essencial para peças e componentes no que diz respeito a sua vida em fadiga. A rugosidade pode influenciar no limite de resistência a fadiga e assim comprometer a vida da peça ou componente. Com isso torna-se imprescindível a obtenção de rugosidades (R_a) com valores mais baixos possíveis de modo a garantir a confiabilidade das peças e componentes produzidos pelo processo de usinagem.

No Gráfico 5.4, nota-se que com um avanço de 0,15 mm/rot obteve-se o melhor acabamento pra ambas as velocidades. Mantendo-se as velocidades e variando os avanços tem-se maiores valores de rugosidade.

Gráfico 5.4 – Rugosidade média (Ra)



O elevado valor de rugosidade para os parâmetros 75-18-8 pode ser explicado devido ao alto grau de deterioração da aresta de corte e a existência de material aderido na ferramenta modificando assim sua geometria e influenciando no raio de ponta da mesma conforme pode ser visto na Figura 5.3.

Figura 5.4 – Ferramenta utilizada para os parâmetros 75-18-8.



A presença de material aderido à ferramenta é explicada através da Figura 5.5 onde fica mais evidente com a imagem feita por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) da ferramenta. Analisando mais afundo a superfície desgastada por meio da Figura 5.5 é possível

através do EDS e da técnica de mapeamento em cores identificar os elementos constituintes na aresta da ferramenta em cores diferentes.

Figura 5.5 - MEV da ferramenta utilizada com os parâmetros 75-18-8.

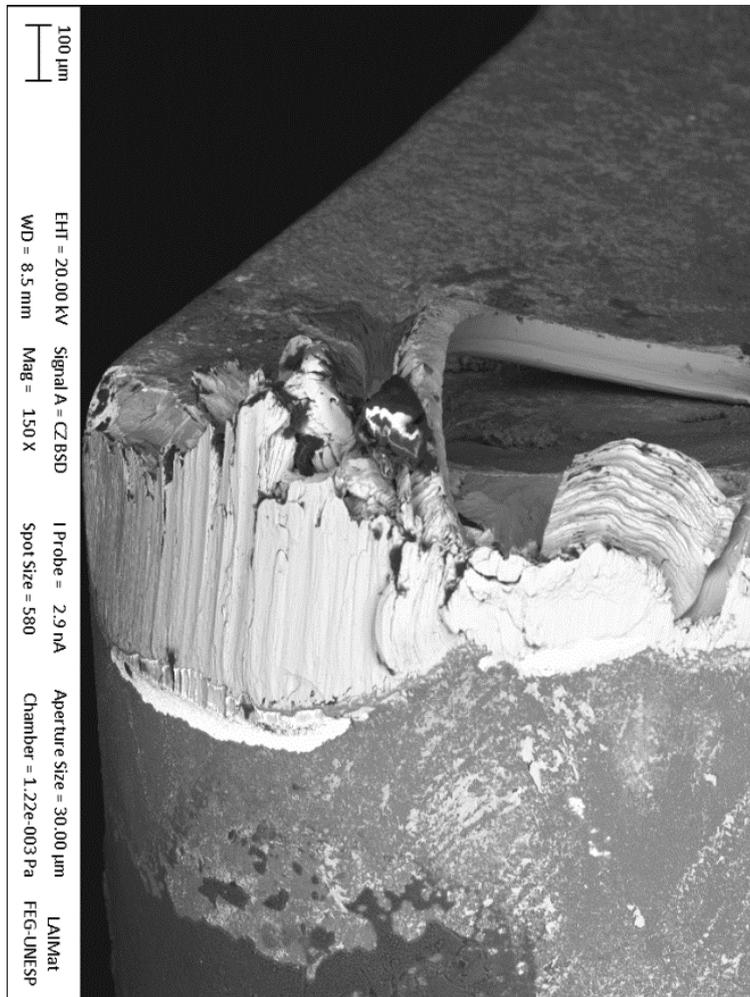
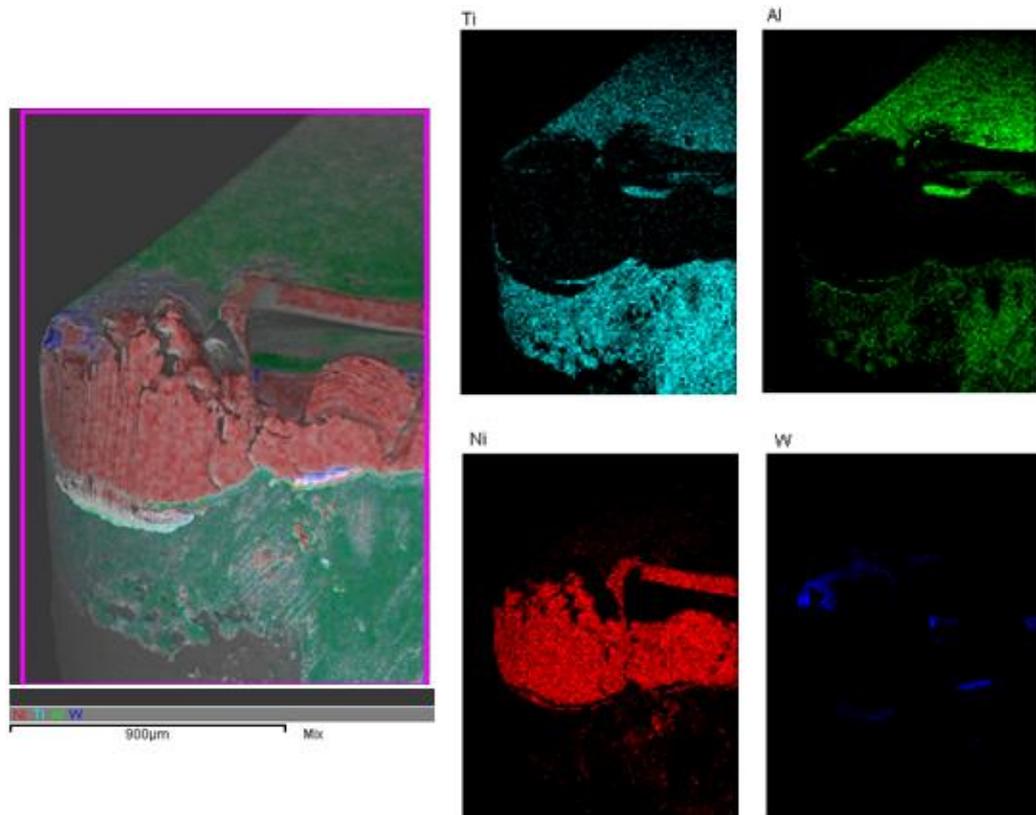


Figura 5.6 - MEV da ferramenta utilizada com os parâmetros 75-18-8 utilizando EDS e mapeamento em cores.



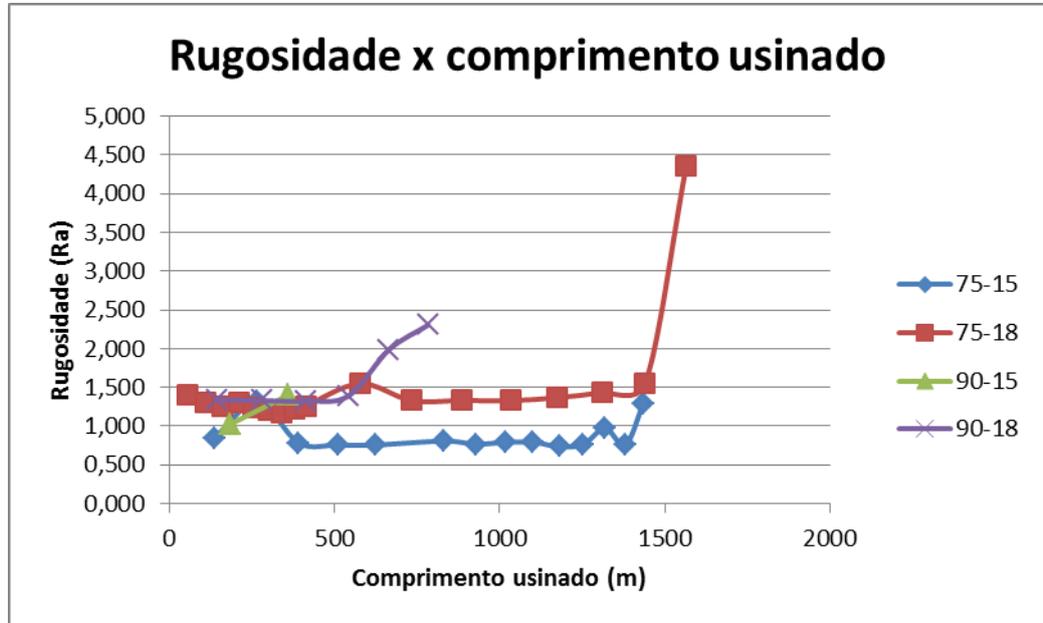
A identificação de alguns elementos presentes na liga à base de níquel está representada através da figura 5.6 na qual mostra os elementos em um mapa de cores feito pelo MEV utilizando o EDS (Energy Dispersive Spectroscopy). Nota-se que o níquel em cor vermelha é o principal elemento depositado na ferramenta como esperado, pois é o elemento de maior quantidade presente na liga. Assim pode-se dizer claramente que o níquel aderido à ferramenta é com certeza da peça, pois a ferramenta não possui este em sua composição evitando assim quaisquer erros de interpretação.

Ainda na figura 5.6, outra análise de fácil identificação são as cores azul e verde na qual representa os elementos titânio e alumínio respectivamente, estes elementos fazem parte da composição do recobrimento da ferramenta, no caso tinal (TiAlN). E por fim, a coloração em azul mais escuro evidenciando o elemento tungstênio no qual faz parte do substrato da ferramenta.

O Gráfico 5.5 representa a relação da rugosidade com o comprimento usinado para cada parâmetro utilizado, nota-se que para a velocidade de 75 m/min com um avanço de 0,18mm/rot obteve-se uma melhor eficiência de comprimento usinado, porém para um melhor

acabamento superficial no qual a rugosidade é menor, assim pelo gráfico temos para esta melhor situação o parâmetro 75-15-8 com um segundo maior valor de comprimento usinado.

Gráfico 5.5 – Rugosidade x Comprimento usinado

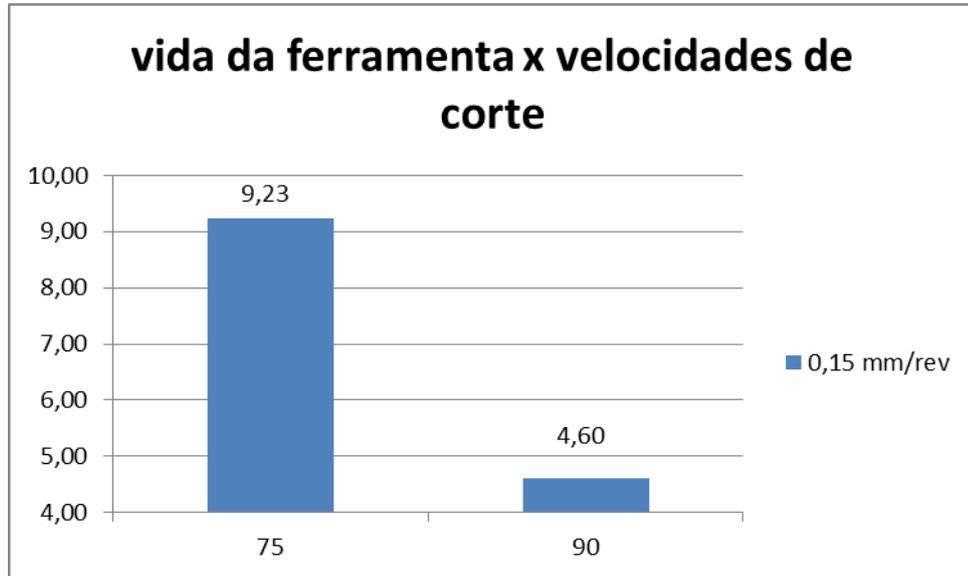


5.2 LUBRIFICAÇÃO MQF

5.2.1 Vida da ferramenta

No gráfico 5.6 é apresentada a evolução da vida da ferramenta para os parâmetros 75-15-8 e 90-15-8, pode-se notar que há uma diminuição na vida da ferramenta para velocidades de corte maiores. Tal efeito pode ser explicado devido a uma provável elevação da temperatura da peça que faz com que o desgaste da ferramenta ocorra mais rápido, diminuindo a vida da ferramenta.

Gráfico 5.6 - Vida da ferramenta x velocidades de corte.



Pela figura 5.7 nota-se que para lubrificação MQF, não houve praticamente desgaste da ferramenta possibilitando assim o uso posterior da mesma aresta de corte.

Figura 5.7 – Desgaste da ferramenta para o parâmetro 75-15-8

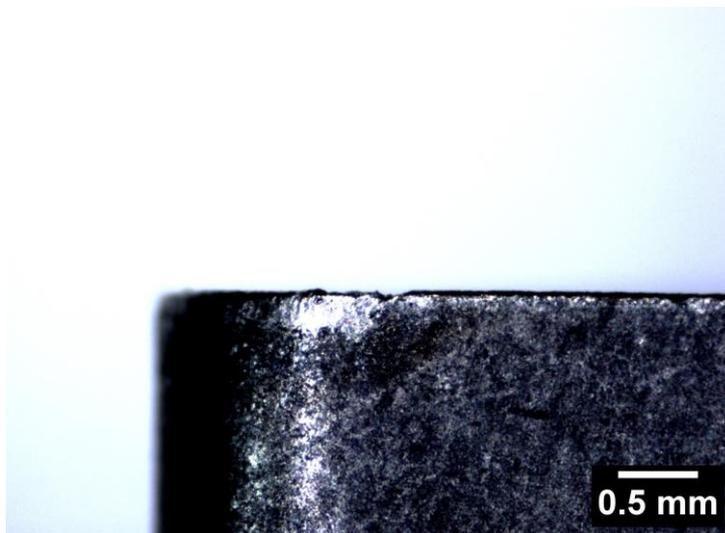
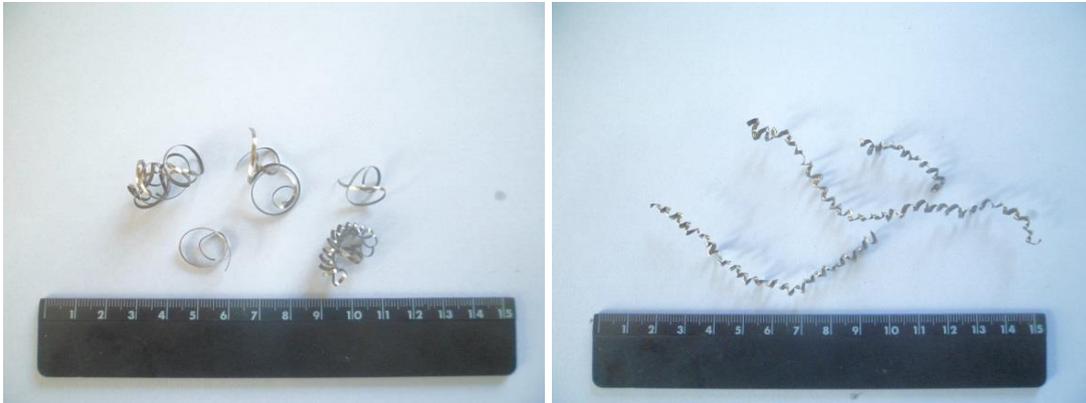


Figura 5.8 - (a) Cavaco gerado no primeiro passo da ferramenta nos parâmetros 75-15-8 e (b) Cavaco gerado pelo ultimo passo da ferramenta nos parâmetros 75-15-8

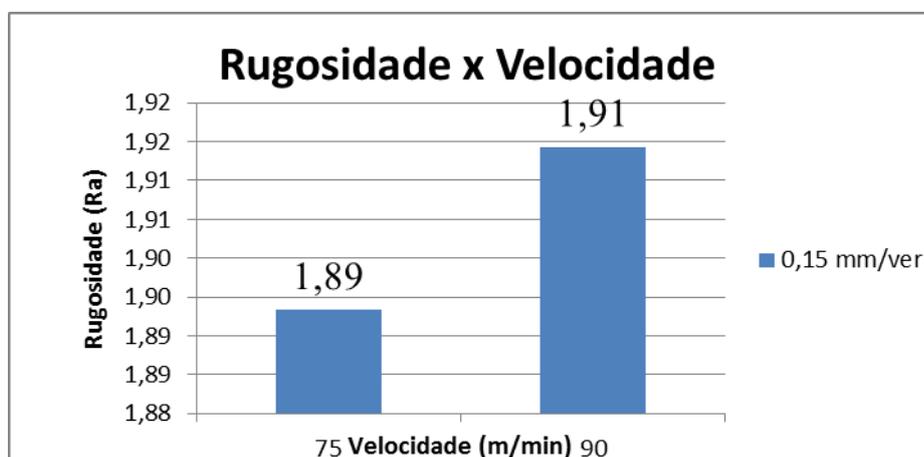


O cavaco gerado pelo primeiro passo da ferramenta nos parâmetros 75-15-8 foi do tipo em lascas, enquanto que no ultimo passo da ferramenta, o cavaco gerado foi helicoidal. O fato pode ser explicado devido ao desgaste da ferramenta, no início o desprendimento do cavaco era mais fácil de ocorrer devido ao melhor corte da mesma, com o passar do tempo o desgaste da ferramenta comprometeu o corte, influenciando na forma do cavaco gerado.

5.2.2 - Rugosidade

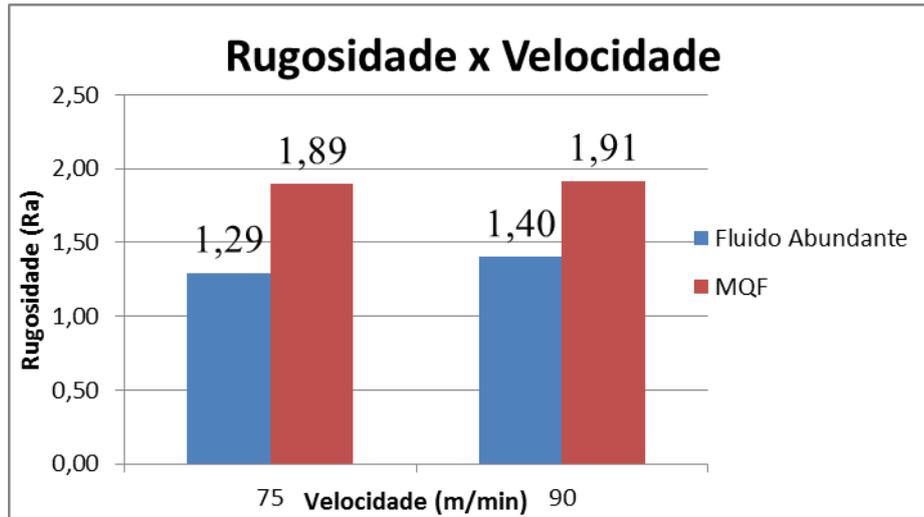
No gráfico 5.7 podemos notar que para uma velocidade de 75 m/min obteve-se o melhor acabamento superficial. Aumentando-se as velocidades tem-se maiores valores de rugosidade.

Gráfico 5.7 - Comparativo entre a rugosidade e as velocidades de corte



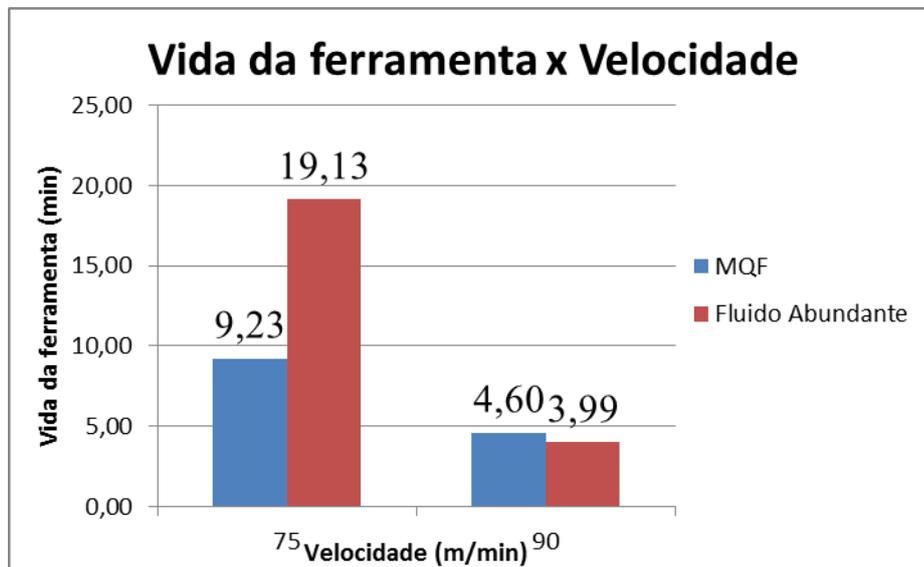
A partir do gráfico 5.8 verifica-se que obteve-se melhores valores de rugosidade após a usinagem com fluido abundante, nos mesmos parâmetros pré-definidos. Isso dá pela aplicação do fluido, que diminui a temperatura do processo, facilitando a remoção do cavaco.

Gráfico 5.8 - Comparativo entre rugosidade e velocidade



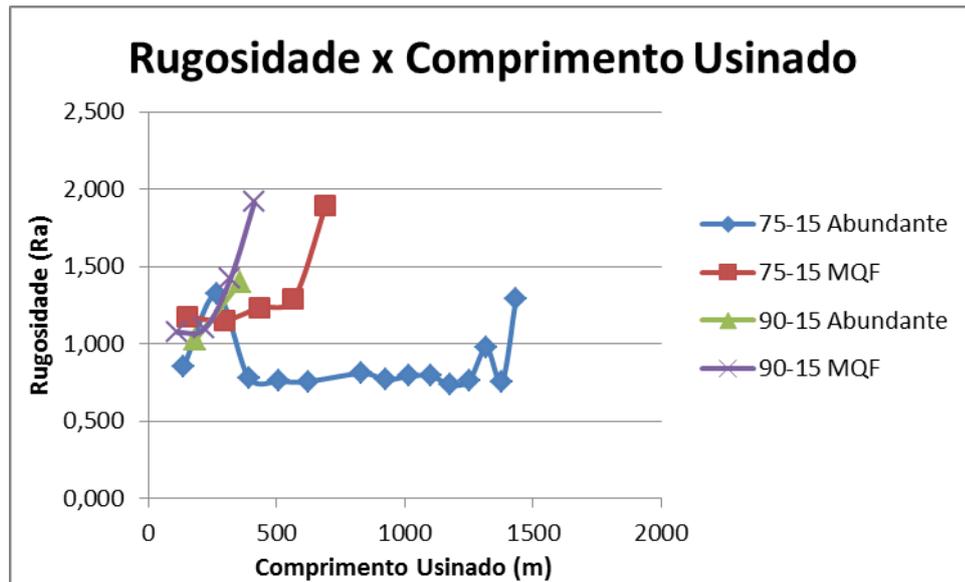
Através do gráfico 5.9 observa-se que a vida da ferramenta é maior para usinagem com lubrificação abundante, pois para menores velocidades com lubrificação abundante, a taxa de variação de temperatura é menor do que para velocidades maiores.

Gráfico 5.9 – Vida da ferramenta x velocidade.



Pelo gráfico 5.10 observa-se que o método de lubrificação abundante é mais eficiente quanto ao acabamento superficial para velocidades menores, quanto que para os demais parâmetros os resultados obtidos foram próximos.

Gráfico 5.10 - Comparativo entre rugosidade e comprimento usinado



6 CONCLUSÃO

Com o presente trabalho, foi possível analisar a influência da aplicação do fluido de corte na usinagem da superliga de níquel NIMONIC 80A, de acordo com os parâmetros pré-definidos, como vida da ferramenta, rugosidade e formação do cavaco.

Para lubrificação abundante de acordo com os parâmetros respeitados, para maiores valores de avanços, obtém-se uma maior vida da ferramenta. O mesmo ocorre para velocidade de 90m/min conforme o gráfico 5.3.

Quanto à rugosidade, para fluido abundante conclui-se que para ambas as velocidades de corte o resultado foi melhor de acordo com o gráfico 5.4.

De modo geral, no que se diz respeito à vida da ferramenta, os melhores resultados foram obtidos à baixas velocidades (75 m/min) tanto para lubrificação abundante quanto para MQF conforme o gráfico 5.9.

Levando-se em conta o comprimento usinado, a velocidade de 75 m/min com lubrificação abundante resultou em melhores acabamentos superficiais (menor rugosidade) enquanto que as demais variações obtiveram-se resultados bem próximos.

REFERÊNCIAS

ACKROYD, B.; AKCAN, N. S.; CHHABRA, P.; KRISHNAMURTHY, K.; MADHAVAN, V.; CHANDRASEKAR, S.; COMPTON, W. D.; FARRIS, T. N.; 2001. **Exploration of contact conditions in machining**. *Proceedings of Institution of Mechanical: part B – Engineers Journal of Engineering Manufacture*, v. 215, n. 4, p. 493-507.

ASM HANDBOOK - **Machining** - Volume 16, Revised by R.W. Breitzig, INCO Alloys International, 1990, p. 835 a 843.

ASM HANDBOOK – **Properties and selection: Irons Steels and High Performance Alloys** - Volume 1 – 2005, pp. 1478-1527.

ASTM E407, **Standard Practice for Microetching Metals and Alloys**, 2007.

BAKER, R. D., **Ceramic cutting tools: Application guidelines**. *Carbide Tool*, p. 28-35, 1981.

BRINKSMEIER, E.; CAMMETT, J. T.; KÖNIG, W.; LESKOVAR, P.; PETERS, J.; TÖNSHOFF, H. K.. **Residual stresses - Measurement and causes in machining processes**. In: *Annals of the CIRP*, v. 31, n.2, 1982, p. 491-510.

BRINKSMEIER, E.; WALTER, A.; JANSSEN, R.; DIERSEN, P. **Aspects of cooling lubrication reduction in machining advanced materials**, in: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 213, ,Part B. 1999, PP. 769-778.

BROCKHOFF, T.; WALTER, A.. **Fluid minimization in cutting and grinding**. *Abrasives Magazine*, Oct./Nov. 1998, p.38-42.

CHANDRASEKARAN, H.; JOHANSSON, J. O., **Chip flow and notch wear mechanisms during the machining of high austenitic stainless steels**. *CIRP Annals*, v. 43, n. 1, p. 101-105, Jan. 1994.

DEARNLEY, P.A.; TRENT, E.M., **Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools**. *Metals Technology*, vol.9, 1982, p. 60-75.

DERFLINGER, V.; BRANDLE, H.; ZIMMERMANN, H. **New hard/lubricant coating for dry machining**, *Surf. Coat. Technol.* 113, 1999, p. 751-757.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: 7ª. Ed., Art LÍber Editora, 2010.

DINIZ, A. E.; NORITOMI, P. Y. **Influência dos parâmetros de corte na rugosidade**. Máquinas e Metais. São Paulo, v. 35 (391), 1998, p. 92-101.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; OLAJIRE, K. A., **The effect of coolant concentration on the machinability of nickel-base, nimonic C-263, alloy**. Tribology Letters, Vol 16, Nº 7, May 2004, p.311 – 316.

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

EZUGWU, E. O.; MACHADO, A. R.; PASHBY, I. R.; WALLBANK, J., **The effect of high-pressure coolant supply**. Lub. Eng., v47, p. 751-757, 1990.

EZUGWU, E. O.; OKEKE, C. I., **Effect of coating materials on the machinability of a nickel base, C-263, alloy**, Tribol. Trans. V.43 (3), p. 549-553, 2000.

EZUGWU, E. O.; TANG, S. H., **Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with ceramic tools**. Journal of Materials Processing Technology, n.55, 1995, p.63-69.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M., **Performance of PVD and CVD coated carbide tools when machining nickel based Inconel 718 alloy**, In: Progress of Cutting and Grinding - ICPCG, v.3, 1996, p.102-107.

EZUGWU, Z.M.; WANG, C.I. OKEKE, **Tool life and surface integrity when machining Inconel 718 with PVD and CVD coated tools**, Tribol. Trans. 42 (2), 1999, p. 353-360.

FARIA, J. C., **Estudo da Usinagem em torneamento da Superliga a base de níquel NIMONIC 80**, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2007.

FERRARESI, DINO, **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: 1ª ed. Edgard Blucher Ltda, 10ª reimpressão 2000.

HEISEL, U.; LUTZ, D.; WASSMER, R.; WALTER, U., **A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte**. Máquinas e Metais, n.386, fev. 1998, p.22-38.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 3685 - **Tool life testing with single-point turning tools**, 1993.

KALPAKJAN, S. **Manufacturing Processes for Engineering Materials**, 2nd ed., Addison-Wesley, Reading, MA, 1991.

KÖNIG, W.; SCHEMMEL, U., **Untersuchung Moderner Schneidstoffe - Beanspruchungsgerechte Anwendung Sowie Verschleibursachen**, Forschungsber, Nr. 2472 des. Lds. Nordrh. - Westf, Westdeutscher Verlag, Köln, Opladen, 1975.

KOPAC, J.; BAHOR, M., **Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product**. *Journal of Materials Processing Technology*. V. 92-93, p. 381-387, 1999.

KOPAC, J., SOKOVIC, M., DOLINSEK, S., **Tribology of coated tools in conventional and HSM machining**, *Journal of Material Processing Technology* 118, 1998, p.377 – 384.

LANNA, M. A., **Desenvolvimento de novos materiais à base de nitreto de silício para aplicações estruturais** - São José dos Campos, SP: Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, 180 p., 2004, Tese de Doutorado.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B., **Usinagem dos metais**. 4. Ed. Editora da Universidade Federal de Uberlândia, 1999.

METALS HANDBOOK Desk Edition, 2nd edition, **ASM International Handbook Committee**, edited by Joseph R. Davis, 1998.

MIRANDA, G. W. A., **Uma contribuição para aplicação em controle adaptativo otimizado no torneamento**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, p.100, 1997, Dissertação de mestrado.

PAUL, S.; CHATTOPADHYAY, A.B., **Effect of cryogenic cooling by liquid nitrogen Jet on forces, temperature and surface residual stresses in grinding steels** *Cryogenics*, 35 (8), 1995, p. 515-523.

RIBEIRO, M. V.; MOREIRA, M. R. V.; FERREIRA, J. R.; **Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 143/144C, p. 453-458, 2003.

SAE J775, **Engine Poppet Valve Information Report.** Surface Vehicle Information Report., 26 p., Rev. November 2004.

SALES, W. F., **Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte.** Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, MG. Tese de doutorado, 1999, 176 p.

SANDVIK COROMANT, **Manual Técnico de Usinagem**, AB Sandvik Coromant, 2005.

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

SILVA, L. R., **Estudo da geometria da aresta de corte de ferramentas aplicadas ao torneamento de superligas à base de níquel com alta velocidade de corte.** São Carlos. - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 211 p., Tese de Doutorado, 2002.

SIMMS, C. T.; HAGEL, W.C., **The Superalloys**, Wiley, New York, 1972.

TRENT, E. M., **Metal cutting**. 3. ed. Oxford, Butterworth – Heinemann, 1991.

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

WEINGAERTNER, W. L., **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.

WRIGHT, P. K, HORNE, J. G. and TABOR, D., **Boundary Conditions at the Chip- Tool interface in Machining: Comparisons Between Seizure and Sliding Friction**, *Wear*, Vol 54, 1979, p. 371-390.

ZITNANSKY, M.; ZRNIK, J.; MARTINKOVIC, M., **Developing processes of property improvement of nickel base superalloys**, J. Mater. Process Technol. 78, 1998, p. 204-209.