



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

KLEBER MONTEIRO PEREIRA JÚNIOR

ESTUDO DA USINABILIDADE DO NÍQUEL E SUAS LIGAS

São Luís

2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

KLEBER MONTEIRO PEREIRA JÚNIOR

ESTUDO DA USINABILIDADE DO NÍQUEL E SUAS LIGAS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

São Luís

2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA

Pereira Junior, Kleber Monteiro

Estudo da usinabilidade do níquel e suas ligas /Kleber Monteiro Pereira Junior– São Luís, 2015.
.66 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual do Maranhão, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues

1. Usinabilidade. 2. Níquel. 3. Parâmetros. 4. Processo. I. Título

CDU:621.98

KLEBER MONTEIRO PEREIRA JÚNIOR

ESTUDO DA USINABILIDADE DO NÍQUEL E SUAS LIGAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual do Maranhão como parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Prof. Msc. Edilson Dantas Nóbrega

Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha

Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

A Deus, pela dádiva da vida e por estar presente em todos os momentos e por sempre ter compaixão comigo.

À minha família e amigos por sempre me acompanhar e me incentivar em toda a minha trajetória.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela sua permissão de estar presente neste mundo cercado de pessoas maravilhosas e por sempre manter em mim a força para nunca desistir e ser sempre perseverante na busca de todos os meus objetivos, fazendo com que eu saiba enfrentar todas as dificuldades que aparecem em minha trajetória.

Ao Professor Dr. Jean Robert, que sempre se mostrou muito paciente comigo, sempre disposto a me ajudar, tirando as minhas dúvidas todas as vezes que solicitei, realizando o seu papel de orientador com uma qualidade imensurável.

A minha família, a dona Maria das Graças, minha amada mãe, a meu pai Kleber, minha namorada Josy, a meu irmão Fábio e as pequenas pessoas Luiz Fabiano e Anna Flávia, que ao longo desta árdua caminhada não deixaram que eu desanimasse fazendo com que eu seja esta pessoa perseverante, mostrando-me que sempre fui capaz pra enfrentar e conseguir superar as dificuldades que a vida nos apresenta.

A todos os meus amigos que me apoiaram e me acompanharam durante essa longa trajetória neste curso de Engenharia Mecânica, quer fosse com uma palavra de incentivo ou com o apoio que eu necessitasse.

Meus sinceros agradecimentos a todos!

“Tudo tem a sua ocasião própria, e há tempo para todo propósito debaixo do céu.”

Eclesiastes 3:1

RESUMO

À respeito da usinabilidade do níquel e suas ligas, este trabalho tem como intuito principal ser uma fonte segura de informações destes elementos. Conforme verificação em pesquisas realizadas no que diz respeito ao níquel e suas ligas, foi possível avaliar a usinagem destes materiais mediante diversas condições de corte. O presente trabalho tem como finalidade fornecer uma clara visão das ferramentas indicadas para a usinabilidade destes materiais, bem como os métodos e técnicas mais apropriados, os fluidos de cortes utilizados, os desgastes nas ferramentas de corte que se apresentaram, assim como os critérios de vida dos mesmos. Este trabalho aborda a história do níquel e suas ligas, explanando sua abundância e obtenção, além das suas características principais, sua importância e aplicações, classificação, escolha da ferramenta de corte adequada, incluindo um estudo minucioso sobre os efeitos da usinagem do níquel e de suas ligas nos parâmetros do processo (forças de corte, desgastes das ferramentas de corte, fluidos de corte dentre outros).

Palavras - chave: usinabilidade, níquel, ligas de níquel, parâmetros do processo.

ABSTRACT

At about the machinability nickel and alloys, this work has as main aim to be a reliable source of information these elements. As verification searches made with regard to nickel and its alloys, we evaluate the machining of these materials by various cutting conditions. This paper aims to provide a clear view of the tools suitable for the machinability of these materials, as well as the methods and techniques most appropriate, the used cutting fluids, the wear on cutting tools that were presented, as well as life criteria of the same. This paper discusses the history and nickel alloys, explaining their abundance and obtain, in addition to its main features, its importance and applications, sorting, choose the appropriate cutting tool, including a detailed study on the effects of machining nickel and its alloys in process parameters (shear forces, wear of the cutting tools, cutting fluids among others).

Key - words: machinability, nickel, nickel alloys, process parameters.

Lista de Figuras

Figura 3.1 - Temperatura de Corte versus Velocidade de Corte	31
Figura 4.1 – Forças de usinagem em um torneamento e suas componentes	35
Figura 4.2 – Força passiva F_z em função do tempo para fresas com $\chi_r = 45^\circ$ e $\chi_r = 90^\circ$, $v_c = 70$ m.min ⁻¹ e $a_p = 1,0$ mm.....	37
Figura 4.3 – Força passiva F_z em função do tempo para fresas com $\chi_r = 45^\circ$ e $\chi_r = 12^\circ$ e $a_p = 0,5$ mm.....	38
Figura 4.4 – Força passiva F_z em função do tempo para fresa com $\chi_r = 45^\circ$ e $v_c = 70$ m.min ⁻¹ e 90 m.min ⁻¹	38
Figura 4.5 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte	39
Figura 4.6 - 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	40
Figura 4.7 - 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	41
Figura 4.8 - Desgaste de entalhe em uma ferramenta cerâmica na usinagem do Inconel 901	42
Figura 4.9 - Lascamento de uma ferramenta de metal duro TNMG 160408-23 na usinagem da liga de Pyromet® 31V - $V_c = 90$ m/min., $f = 0,18$ mm/rot. e $a_p = 0,8$ mm	42
Figura 4.10 - 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.....	45
Figura 4.11 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte	47

Figura 4.12 – Desgaste das ferramentas usadas na usinagem da Nimonic 80A (a) parâmetros 75-15-8 e (b) parâmetros 90-15-8.....	49
Figura 4.13 – Desgaste das ferramentas usadas na usinagem da Inconel 718 (a) parâmetros 75-15-8 e (b) parâmetros 90-15-8	49
Figura 4.14 – Desgaste das ferramentas usadas na usinagem da Pyromet A31 (a) parâmetros 75-15-8 e (b) parâmetros 90-15-8.....	50
Figura 4.15 – Fontes de geração de calor na formação do cavaco	53
Figura 4.16 - Comparação da superfície teórica com a superfície real obtida em operações de torneamento	56
Figura 4.17 - Classificação dos erros superficiais - Rugosidade.....	56
Figura 4.18 - Conceito de valor de cut-off e exclusão da ondulação Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento	57

Lista de Tabelas

Tabela 4.1. – Condutividade térmica de materiais comumente utilizados na indústria	53
--	----

Lista de Gráficos

Gráfico 4.1 – Rugosidade Ra em ligas laminadas com uso de MQF e Lubrificação abundante	
.....	59

Lista de Siglas e Abreviaturas

χ_r - ângulo de posição da ferramenta

Cu - Cobre

Zn - Zinco

Ni - Níquel

°C - Grau Celsius

W - Tungstênio

Cr - Cromo

Mn - Manganês

μm – micrometro

WC – Carboneto de Tungstênio

Co – Cobalto

TiC – Carboneto de Titânio

TaC – Carboneto de Tântalo

VC - Carboneto de vanádio

Cr₃C₂ - Carboneto de Cromo

TiN - Nitreto de titânio

TiAlN - Nitreto de titânio-alumínio

ISO - International Standard Organization

V_c - Velocidade de corte

a_p - profundidade de corte

F_z – Força passiva

K_T - Desgaste de cratera

V_B - Desgaste de flanco

VB_B - Desgaste de flanco médio

VB_{Bmax} - Desgaste de flanco máximo

VB_N - Desgaste de entalhe

R_a – Acabamento superficial

F_u – Força de usinagem

T_c – Temperatura de corte

V_b – Vibração mecânica

g/cm^3 – Massa específica

Ni – Níquel

Fe – Ferro

Cr – Cromo

Cr_2O_3 – Óxido de cromo

HSC – Usinagem a Altas Velocidades

TiN – Nitreto de Titânio

TiC – Carbetto de Titânio

TiCN – Carbonitreto de Titânio

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

Si_3N_4 – Nitreto de Silício

ZrO_2 – Óxido de Zircônio

TiC – Carboneto de Titânio

SiC – Carboneto de Silício

Al₂O₃ + SiCW – Cerâmica de Alumina

Al₂O₃-TiC – Alumina Mista

HSC – Usinagem a altas velocidades

m.min⁻¹ – Metros por minuto

HRC – Dureza Rockwell C

HV – Dureza Vickers

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	20
2.1. OBJETIVO GERAL	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2.3. JUSTIFICATIVA	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1. GENERALIDADES	22
3.2. HISTÓRIA DO NÍQUEL E SUAS LIGAS	22
3.3. ABUNDÂNCIA E OBTENÇÃO	23
3.4. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	24
3.5. IMPORTÂNCIA E APLICAÇÕES	24
3.6. CLASSIFICAÇÃO DO NÍQUEL E SUAS LIGAS	25
3.7. FERRAMENTAS DE CORTE EMPREGADA NA USINAGEM DO NIQUEL E SUAS LIGAS	29
3.7.1. CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DO TIPO DE FERRAMENTA	29
3.7.2. TIPOS DE REVESTIMENTOS	30
3.7.3. MATERIAIS DE FERRAMENTAS PARA USINAGEM DE SUPERLIGAS A BASE DE NÍQUEL	30
4. EFEITO DA USINAGEM DO NIQUEL E SUAS LIGAS NOS PARAMETROS DO PROCESSO	35
4.1. FORÇA DE CORTE	35
4.2. DESGASTES DAS FERRAMENTAS DE CORTE	39
4.3. FLUIDOS DE CORTE EMPREGADO	47
4.4. ACABAMENTO SUPERFICIAL DAS PEÇAS	53
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	59

1. INTRODUÇÃO

O níquel foi descoberto em 1750, porém até o século 20 seu uso era limitado, quando se tornou um elemento de liga fundamental ao aço inoxidável e às ligas resistentes ao calor. Na natureza o níquel ocorre na forma de sulfetos ou óxidos. Este minério extraído de minas profundas, é primariamente um sulfeto com o teor de níquel menor que 3%, e os processos de flotação e concentração são empregados para chegar ao material de partida para fazer o níquel metálico. É produzida então a diminuição para obter o óxido, que fundido origina a liga níquel-ferro. Esta liga é processada em alto forno para retirar o ferro e concentrar o níquel. O próximo passo é purificar o níquel eletroliticamente por deposição em catodos. (BUDINSK e BUDINSK, 1999).

A usinabilidade não é uma propriedade do material, mas a maneira do material se comportar no momento da usinagem (TRENT, 1984). Forças de corte, energia requerida na usinagem, vida da ferramenta, acabamento superficial, taxa de desgaste, temperatura de corte, controle de cavaco e até algumas propriedades físicas são variáveis que podem ser consideradas como medidas de usinabilidade (MACHADO e DA SILVA, 1999). Na usinagem de muitos metais comercialmente puros as forças de usinagem detectadas são altas; isto é verdadeiro para ferro, níquel, cobre e alumínio, entre outros. Com estes materiais, a área de contato na superfície de saída é muito grande, o ângulo de cisalhamento primário é pequeno e cavacos espessos e fortes movem-se em baixa velocidade. Por estas razões, metais puros são notoriamente difíceis de usinar (TRENT, 1984).

Embora de o níquel ter o ponto de fusão mais baixo que o ferro, o metal e suas ligas são, em geral, mais complexos de usinar que o ferro e o aço devido a dois fatores básicos: o níquel mantém a resistência mecânica em altas temperaturas e sofre encruamento rapidamente (BHATTACHARYYA et al., 1987; ARUNACHALAN e MANNAN, 2000; HUAIZHONG, HAO e XIAOQI, 2002).

Logo, ferramentas para usinar níquel comercialmente puro tendem a se deformar ao longo da aresta de corte, onde as tensões de compressão e temperatura são altas mesmo sob baixas velocidades de corte. Uma vez que a aresta de corte foi deformada e a área de desgaste iniciou, uma nova fonte de calor é desenvolvida, acelerando o processo de desgaste. (CÂMARA, 2008).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

- Estudar a usinabilidade do níquel e suas ligas avaliando o efeito da usinagem nos parâmetros do processo;

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Discutir sobre a história do níquel e suas ligas, sobre abundância e obtenção, suas características principais, a classificação do níquel e suas ligas bem como quais as ferramentas de corte utilizadas no níquel e suas ligas;
- Assim como questionar os parâmetros do processo no que diz respeito a força de corte, desgastes da ferramenta de corte, fluido de corte empregado e acabamento superficial das peças durante a usinagem do níquel e suas ligas.

2.3. JUSTIFICATIVA

Classificado como um material de difícil usinagem devido ao rápido encruamento que ocorre quando usinado, o níquel apresenta alta resistência sob altas temperaturas, além de suas ligas serem largamente utilizadas em componentes aeroespaciais e na indústria siderúrgica (CÂMARA, 2008).

Compreende-se como usinagem de um material a facilidade ou a dificuldade de remoção de um material durante a usinagem e pode ser examinada através da força de usinagem (F_u), da temperatura de corte (T_c), do acabamento superficial, do controle do cavaco, da taxa de desgaste da ferramenta de corte; entre variadas tipos de análises, dependendo da necessidade, disponibilidade de infraestrutura, facilidade, podemos levar em conta também a vibração

mecânica (V_b) do sistema peça-ferramenta, sinais de emissão acústica, entre outros (CHILDS, TRENT & DINIZ, 2003).

A usinagem de superligas resistentes a altas temperaturas como as ligas de níquel, representa um trabalho na qual é muito difícil de se adquirir melhorias no processo, devido à dificuldade de usinagem em altas velocidades de corte, o emprego nas indústrias dessa liga apresentou grande evolução nos últimos anos, seu aproveitamento na indústria aeronáutica se difundiu sendo empregado em palhetas de turbinas, peças de compressor, suportes e elementos de conjunto. Os setores; automotivo, químico, médico e outros também se aproveitaram das ótimas características destas superligas e tem utilizado o material. As ligas resistentes a altas temperaturas proporcionam elevada dificuldade de usinagem, fato este associado com as altas forças de corte originadas durante a usinagem que resultam em altas temperaturas. Elevados níveis de temperaturas podem ocasionar deterioração da aresta de corte, com posterior deformação ou quebra, os desgastes mais comuns obtidos na usinagem desses materiais são o desgaste de flanco e desgaste tipo entalhe. (SOUZA 2012)

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. GENERALIDADES

A usinabilidade na maioria das vezes é avaliada de acordo com alguns critérios: vida da ferramenta, força de usinagem, qualidade superficial da peça e forma dos cavacos. Outro relevante fator de influência são os elementos de liga do material, tratamento térmico realizado e processo de fabricação do material (forjado, fundido, etc.). Para ponderar a usinabilidade também existem outros critérios importantes, tais como a composição química, o estado metalúrgico da peça, dureza, condutividade térmica, propriedades mecânicas e de eventual encruamento (DINIZ E COPPINI 2003).

3.2. HISTÓRIA DO NÍQUEL E SUAS LIGAS

O níquel vem sendo utilizado em ligas antes mesmo da civilização moderna, na produção de armas, ferramentas e moedas. Manuscritos chineses indicam que a primeira liga incluindo níquel, a Pai-Thong ou cobre branco, produzida acrescentando zinco aos minérios de níquel, era utilizada no Oriente desde 1400-1700 a.C. Porém, a facilidade de confundir as minas de níquel com as de prata levam a pensar que, na realidade, o uso do níquel foi posterior, a partir do século IV a.C. (ASM HANDBOOK 1990).

No início do século XVIII, mineradores da região Saxônica da Alemanha tentaram fundir uma nova descoberta de minérios parecidos com o cobre, somente para constatar que o metal branco que eles criavam era muito duro para serem martelados dentro de outros itens. Os mineradores acharam que o material era então amaldiçoado, designando-o “Kupfer-Nickel” (cobre do diabo). Nos anos posteriores foram descobertos minérios similares em outras

localidades e o metal branco e duro extraído, o qual se deformava com resistência, foi também denominado “nickel” (BETTERIDGE 1984; ASM HANDBOOK 1990).

Durante cinco anos, Axel Fredrik Cronstedt trabalhou no Departamento de Minas da Suécia com esses curiosos minérios e, por fim, em 1751, separou e identificou um novo elemento, o qual ele denominou de níquel. Cinco anos após essa identificação, Von Engestrom, outro cientista sueco, descobriu que o níquel era o elemento principal da liga Pai-Thong e tal descoberta incentivou a criação da liga “German silver” (prata alemã) ou “níquel-prata” (liga Cu-Sn-Pb-Zn contendo 12 a 25% Ni), em 1823, por Ernest August Geitner (BETTERIDGE 1984; ASM HANDBOOK 1990; MUDD 2010).

Até a segunda metade do século XIX a pequena quantidade de níquel produzida tinha pouca relevância real na economia industrial, sendo empregada somente para revestimentos, cunhagem de moedas e ligas níquel-prata. Atualmente, especialmente em aços, o níquel representa um elemento de liga de extrema importância, além de ser empregado em uma série de outras aplicações, como baterias e produtos químicos (BETTERIDGE 1984; ASM HANDBOOK 1990; MUDD 2010).

3.3. ABUNDÂNCIA E OBTENÇÃO

O níquel encontra-se geralmente em dois principais tipos de minérios, os sulfetos e as lateritas. Os minérios de sulfetos são provenientes de processos hidrotermais ou vulcânicos. Estes são normalmente associados ao cobre e/ou cobalto e, eventualmente, a metais preciosos, como ouro e platina. Os minérios de lateritas são formados próximos da superfície, logo abaixo de rochas de caráter ultrabásico, as quais são desenvolvidas de acordo com as condições climáticas da superfície. Estas incidem especialmente em regiões de climas tropicais próximas ao equador, em regiões áridas do centro oeste da Austrália ou em áreas úmidas do Leste Europeu. Dependendo do clima, há a formação de diferentes tipos de minérios, denominados limonita, nontronita, saprolita, garnierita e serpentina, com variados níveis de impurezas de magnésio, ferro e sílica (MUDD 2010).

Em todo o mundo, há numerosas reservas econômicas de níquel, sobretudo na Austrália, Canadá, Nova Caledônia, Filipinas, Indonésia e Rússia. Em 2008, de acordo com a

US Geological Survey, as reservas globais econômicas e sub- econômicas foram avaliadas em 220 milhões de toneladas (MUDD 2010).

3.4. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

O níquel é o quinto elemento mais abundante na Terra, de número atômico 28, localizado na primeira fileira de metais de transição, ao lado do ferro e do cobalto. É um metal de massa atômica 58.71 u, estrutura cristalina cúbica de face centrada e, em condições ambientes, tem como ponto de fusão 1455°C e massa específica 8,9 g/cm³ (REED 2006). O níquel e suas ligas são muito importantes na indústria em virtude da capacidade de resistirem a um grande número de condições extremas de operação, as quais envolvem meios corrosivos, elevadas temperaturas e/ou alta tensão (ASM HANDBOOK 2000).

O níquel na condição recozida é satisfatoriamente dúctil para poder ser trabalhado a frio, e na condição encruada, apresenta dureza suficiente para garantir uma razoável resistência ao desgaste (BRESCIANI 1997). É considerado um dos mais versáteis e importantes metais industriais, sendo um elemento de liga imprescindível para aços inoxidáveis austeníticos, ferros fundidos e ligas não ferrosas (ASM HANDBOOK 2000).

3.5. IMPORTÂNCIA E APLICAÇÕES

Os materiais contendo níquel fazem grandes contribuições em muitos aspectos da vida moderna, porém não são comumente reconhecidos. Como aplicação primária, o níquel é usado no processo de lingotamento contínuo de aços e ligas não-ferrosas. (THOMAS et al., 1997).

Níquel e compostos de níquel são também utilizados para cunhagem, baterias, catalisadores e supercondutores magnéticos. As ligas de níquel-ferro também vêm sendo desenvolvidas para aplicações que exigem controle de expansão térmica ou características de permeabilidade magnética. (ASM HANDBOOK 2000).

Podem ser mencionadas aplicações na construção civil, produção química, comunicações, fornecimento de energia, proteção ambiental, preparação de alimentos, tratamento de água e o uso mais atualmente conhecido é como catalisador em processos

químicos, sendo a chave para importantes reações como hidrogenização de óleos vegetais, a reorganização de hidrocarbonetos e a produção de fertilizantes. Outra maneira de aplicação tem-se a eletrodeposição de níquel puro que é vastamente aplicada como material resistente à corrosão, propriedade de extremo valor. O custo anual estimado de corrosão nos Estados Unidos da América é de US\$300 bilhões, conforme THE NICKEL INSTITUTE (2007). Dois terços de todo o níquel fabricado é usado em aço inoxidável e 11% usados em eletrodeposição. O níquel é usado no aço inoxidável para promover uma estrutura austenítica estável e dúctil bem como contribuir com a resistência à corrosão.

As ligas à base de níquel têm papel importante na construção de componentes de turbinas de aeronaves, onde são geradas altas temperaturas de trabalho. Elas apresentam a capacidade de manter a resistência mecânica e resistência à oxidação sob temperaturas acima de 550°C. Estes materiais representam cerca de 45% de todo material necessário para a construção de turbinas (EZUGWU, WANG e MACHADO, 1999). Também são empregadas como material estrutural de diversos componentes de motores de espaçonaves, vasos de pressão e baterias de níquel-hidrogênio. Com a introdução do Inconel 718 (54%Ni, 18%Cr, 18,5%Fe, 3%Mo, 5%Nb, 1%Ti) em 1960, a indústria aeronáutica pôde ter crescimento significativo, devido às propriedades mecânicas desta superliga à base de níquel (KIRK, 1977 e ARUNACHALAN e MANNAN, 2000).

3.6. CLASSIFICAÇÃO DO NÍQUEL E SUAS LIGAS

O níquel e a maior parte de suas ligas têm a mesma aparência física do aço. O níquel e suas ligas apresentam alta resistividade e boa resistência à corrosão, além de manter a resistência mecânica em altas temperaturas (BUDINSK e BUDINSK 1999).

Em 1905, a primeira liga de níquel foi desenvolvida, com aproximadamente dois terços de níquel e um terço de cobre, equivalente à presente Monel 400. Esta liga continua sendo muito utilizada, devido à sua alta resistência à corrosão. A partir de então, teve início um século de explosiva expansão da indústria do níquel, por meio do desenvolvimento de centenas de novas ligas, exclusivamente concebidas para atender às expectativas industriais (PATEL 2006; REED 2006; SCHWEITZER 2007).

Durante a segunda guerra mundial, com o advento das turbinas a gás, houve a necessidade de ligas mais resistentes e mais duráveis, capazes de serem usadas em altas temperaturas. A excelente resistência à oxidação de ligas níquel-cromo já havia sido constatada no início do século XX, mas apenas em 1929, foi analisado que adições de pequenas quantidades de titânio e alumínio à liga padrão de níquel-20% cromo resultavam em um aumento expressivo de resistência à fluência. Este mecanismo serviu como base para a primeira superliga de níquel, inventada em 1940, a Nimonic 80. Esta liga foi a pioneira de uma série de ligas Nimonic, progressivamente mais resistentes, devido à otimização da composição química, com adequações nos teores de titânio e alumínio e adição de molibdênio e cobalto (PATEL 2006; MEETHAM 2000; BETTERIDGE 1987).

Ao mesmo tempo foram desenvolvidos trabalhos similares, correspondentes a uma série de ligas com matriz Ni-Fe-Cr, denominadas Inconel. A primeira desta série, a Inconel X (posteriormente chamada Inconel X-750), foi patenteada em 1941, por Bieger e Buck. No final da década de 1950, foi inventada a superliga de níquel Inconel 718, pela International Nickel Corporation (Inco). Pela substituição de grande parte de alumínio e titânio por nióbio e a substituição de cobalto e grande quantidade de molibdênio por ferro a liga 718 difere das outras ligas a altas temperaturas. O efeito dessas alterações é a diminuição da resistência a elevadas temperaturas, mas, ao mesmo tempo, beneficiam a soldabilidade. A liga 718 foi desenvolvida para o serviço a temperaturas até 650°C, além de possuir boa resistência e ductilidade a temperaturas abaixo de zero, até -250°C (EVERHART 1971; BETTERIDGE 1987, PATEL 2006, KUO et al. 2009).

A designação do Níquel e suas ligas, organizada pela Huntington Alloys Inc é constituída de três dígitos seguidos de um nome ou marca comercial. Cada grupo de material classificado pela composição, é denominado pelos três números, sendo que o primeiro, se for par, refere-se as ligas endurecidas por solução sólida e, se for ímpar, indica que as ligas são endurecidas por tratamento térmico de solubilização e precipitação (BRESCIANI 1997).

Como exemplos do Níquel comercialmente puro podem ser mencionados o Níquel 200 e o Níquel 201, com menor teor de C, os quais oferecem boa resistência à corrosão. O Duraníquel 301 é um Níquel ligado no qual foi acrescentado Al e Ti. Essa liga é endurecida por precipitação, sendo que partículas de Ni_3AlTi precipitam-se na matriz, durante tratamento térmico, aumentando sua resistência mecânica (BRESCIANI 1997).

A seguir será apresentado 5 grupos com a classificação de 59 ligas à base de níquel em relação às características de usinabilidade. Exceto como notado na discussão seguinte, todas as ligas em um dado grupo exigem condições idênticas de usinagem (ASM HANDBOOK, 1990).

- GRUPO A consiste de ligas que tem 95% ou mais de níquel. Essas ligas têm moderada resistência mecânica e alta tenacidade. Eles são endurecidos apenas através de trabalho a frio devido ao encruamento. Essas ligas são praticamente pastosas nas condições recozidas e trabalhadas a quente, e a forma trefilada é preferível para melhor usinabilidade e acabamento superficial. O grupo A é composto pelo Níquel 200, Níquel 201, Níquel 205, Níquel 212 e Níquel 222.
- GRUPO B consiste da maior parte das ligas de níquel-cobre. As ligas deste grupo têm alta resistência e tenacidade levemente reduzida se comparada ao grupo A. Elas são endurecidas somente através de trabalho a frio. Materiais trefilados ou trefilados seguidos de alívio de tensões fornecem melhores condições de usinabilidade e de acabamento polido se confrontados aos solubilizados. Como formadores deste grupo temos: Monel 400, Monel 401, Monel 450, Ferry alloy, Nilo alloy 36, Nilo alloy 48, Nilo alloy K e Inco alloy MS 250.
- GRUPO C é composto em sua maioria por ligas à base de níquel-cromo e ferro-níquel-cromo, que são parecidas aos aços inoxidáveis austeníticos. Eles também exclusivamente são endurecidos através de trabalho a frio e são trabalhados com facilidade quando trefilados ou na condição trefilada com alívio de tensões. Fazem parte deste grupo: Níquel 270, Monel K-500 (não envelhecido), Inconel 600, Inconel 601, Inconel 690, Nimonic 75, Nimonic 86, Incoloy 800, Incoloy 800HT, Incoloy 802, Incoloy 825, Incoloy DS, Inco 330 e Inco 020.
- GRUPO D, que consiste sobretudo das ligas envelhecidas, é subdividido em dois subgrupos:

As ligas do grupo D-1 na condição envelhecida, além de outras tanto nas condições envelhecidas quanto não envelhecidas.

- GRUPO D-1: Duraníquel 301 (não envelhecido), Incoloy 925, Incoloy MA 956 e Ni-span-c 902 (não envelhecido).
- GRUPO D-2: Duraníquel 301 (envelhecido), Monel K-500 (envelhecido), Inconel 617, Inconel 625, Inconel 706, Inconel 718, Inconel X-750, Inconel 751, Inconel MA 754,

Nimonic 80A, Nimonic 81, Nimonic 90, Nimonic 105, Pyromet 31V (a), Nimonic 115, Nimonic 263, Nimonic 901, Nimonic PE11, Nimonic PE16, Nimonic PK50, Incoloy 903, Incoloy 907, Incoloy 909, Ni-span-c 902 (envelhecido), Inco G-3, Inco C-276 e Inco HX.

As ligas no grupo D têm elevada resistência e dureza, particularmente quando envelhecidas. Os materiais que se localizam nas condições recozida e temperada ou rapidamente resfriada ao ar encontram-se na condição macia, e consegue-se trabalhá-los com mais facilidade. Por causa desta comparativa maciez, a condição não envelhecida é necessária para uma operação mais perfeita de furação e rosqueamento (BAHIA 2010).

A usinagem pesada das ligas envelhecidas pode ser aperfeiçoada quando as mesmas encontrar-se na condição recozida ou trabalhada a quente e temperada. A melhor forma para se trabalhar as ligas deste grupo é por meio da usinagem até aproximar-se da dimensão final, na condição não envelhecida, em seguida o material é envelhecido e então usinado até as dimensões finais (BAHIA 2010).

Devido ao tratamento de envelhecimento as tensões serão suavizadas, evitando-se a possibilidade de empenamento do material. Um encolhimento em torno de 0,07% é normal em tratamento de envelhecimento. Os materiais envelhecidos têm boa estabilidade dimensional (BAHIA 2010).

- GRUPO E é composto somente pelo Monel R-405, sendo esta liga projetada para altas taxas de produção.

As superligas à base de níquel, possuem de 30 a 75% de níquel. As superligas à base de níquel, também utilizam o cromo para obter resistência à corrosão e oxidação, por meio da formação de uma película protetora. Adições de alumínio também são adequadas na resistência à oxidação, especialmente a temperaturas elevadas (acima de 1000°C), quando a película protetora de óxido de cromo (Cr_2O_3) se torna menos protetora, por motivo da volatilização e a contribuição da alumina passa a ser crítica. Além disto, o alumínio realiza papel fundamental nas reações de precipitação (DONACHIE, 1985; BRADLEY, 1988; MEI; SILVA, 1988).

3.7. FERRAMENTAS DE CORTE EMPREGADA NA USINAGEM DO NIQUEL E SUAS LIGAS

Com o desenvolvimento dos materiais utilizados na fabricação de equipamentos modernos tem-se exigido muito dos processos de fabricação, entre eles os de usinagem. O aparecimento de novos materiais e coberturas para ferramentas de corte surge como resposta a esse desafio, pelo lado dos fabricantes de ferramentas. Os fabricantes de máquinas por sua vez seguem 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 metal duro e as ferramentas cerâmicas deram abertura as novas possibilidades de usinagem. Com essa evolução, surgiu atualmente a Usinagem a Altas Velocidades (HSC), que emprega velocidades de corte bem acima das anteriormente utilizadas.

Os custos contidos no processo de usinagem são divididos entre ferramentas, equipamento, fluidos de corte (quando empregado) entre outros.

Embora o custo com ferramentas ser apenas 3 % do custo total de produção, indiretamente a ferramenta tem ampla influência nos custos de usinagem.

3.7.1. Critérios para seleção do tipo de ferramenta

Para a seleção da ferramenta mais apropriada ao processo de usinagem precisam ser considerados alguns critérios principais, que são:

- *material a ser usinado;*
- *processo de usinagem;*
- *condição da máquina-ferramenta;*
- *forma e dimensões da ferramenta;*
- *custo do material da ferramenta;*
- *condições de usinagem (acabamento, desbaste, lubrificante, etc.);*
- *condições de operação.*

Independente do material da ferramenta, é preciso considerar para as quatro principais características por elas apresentadas:

- *dureza a quente*: A temperatura da ferramenta não poderá exceder a 1000 °C, dependendo do tipo de operação;

- *resistência ao desgaste*: principalmente no que se diz respeito ao desgaste por abrasão, isto é, resistência ao atrito. Diretamente ligada a dureza a quente do material;

- *tenacidade* – que significa a quantidade de energia necessária para romper o material (maior resistência aos choques);

- *estabilidade química*: para impedir o desgaste por difusão (DINIZ, 2008).

3.7.2. Tipos de revestimentos

Revestimentos como nitreto de titânio (TiN), carbetto de titânio (TiC), carbonitreto de titânio (TiCN) e óxido de alumínio (Al₂O₃) são depositados no metal de base tendendo o aumento da vida da ferramenta e aquisição de maiores taxas de remoção se comparadas com insertos não recobertos. Apesar dos metais duros serem mais frequentemente recobertos (mais de 60% dos insertos vendidos nos EUA são recobertos), as cerâmicas tem alcançado grandes sucessos quando empregadas com recobrimento. Velocidades de aproximadamente 275 m/min. são possíveis com o emprego de recobrimento na usinagem de ferro fundido, aço e aço inoxidável. Quando ferro fundido cinzento é usinado com cerâmicas recobertas a velocidade de usinagem pode atingir 550 m/min., conseguindo-se ainda dobrar ou triplicar a vida da ferramenta (LANNA, 2004).

3.7.3. Materiais de ferramentas para usinagem de superligas a base de níquel

Embora a aplicação de superligas e seu processamento hajam despertado ultimamente um grande interesse por parte das indústrias, as informações disponíveis relativas a usinagem destas ligas tendem a direcionar a análise a alguns artigos e autores consagrados na literatura, que se voltam leitura obrigatória para o desenvolvimento de qualquer pesquisa na área.

Dentre as várias variáveis que comprometem o bom desempenho das operações de usinagem, a ferramenta de corte, apesar de ser pequena e de relativo baixo custo, é a mais crítica. Gatto e Iuliano (1994) e Ezugwu et al. (1999) alegam que a vida da ferramenta obtida na usinagem das superligas a base de níquel é severamente imprópria, tendo como consequência o aumento do custo de produção. Na maior parte, os principais parâmetros que abrangem o

processo e que mais prejudicam um melhor desempenho são: seleção do material da ferramenta, geometria da ferramenta, método de usinagem, velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, e etc. Com esses parâmetros bem controlados, pode-se alcançar um tempo de vida apropriado para as ferramentas durante a usinagem. Determinadas ligas a base de níquel podem alcançar valores de dureza na faixa de 22 a 45 HRC (250 a 440 HV).

As exigências para as ferramentas utilizadas na usinagem das superligas compreendem os seguintes aspectos: excelente resistência ao desgaste, alta resistência e tenacidade em alta temperatura, alta dureza a quente, resistência ao choque térmico, alta condutividade térmica e suficiente estabilidade química em altas temperaturas (ADDHOUM; BROUSSAUD, 1989; THANGARAJ; WEINMANN, 1992; JUN et al., 1997; GATTO; IULIANO, 1997 e EZUGWU et al., 1999).

As superligas a base de níquel são usinadas normalmente com metal duro (WC-Co) com velocidades de corte na faixa de 10-30 m/min. Porém, ferramentas de metal duro não podem ser empregadas na usinagem com alta velocidade, porque elas não resistem as altas temperaturas e tensões na zona de corte. São demonstradas na Figura 3.1 as velocidades de corte de ferramentas de metal duro e de cerâmica conforme sua resistência e temperatura. Note-se que a temperatura aumenta quando a velocidade de corte aumenta (VIGNEAU, 1997).

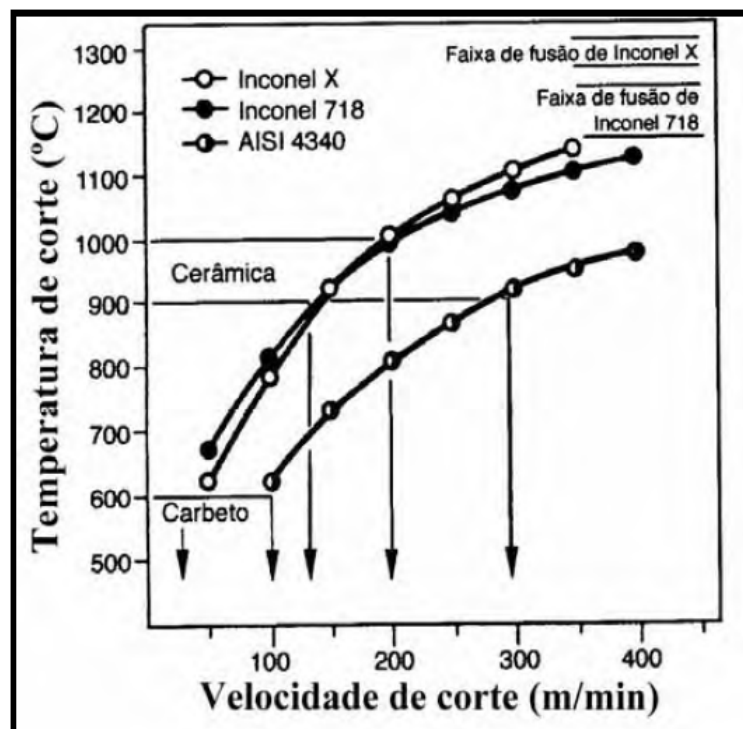


Figura 3.1 - Temperatura de Corte versus Velocidade de Corte (VIGNEAU, 1997).

Conforme Ezugwu et al. (1999), o emprego de ferramentas de metal duro revestidas com múltiplas camadas (TiN + TiCN + TiN) tem também apontado notável melhora na usinagem das superligas a base de níquel. Gatto e Iuliano (1997) tem a mesma opinião no que diz respeito ao revestimento com CrN e (Ti, Al)N em cerâmicas reforçadas com *whiskers* (Al₂O₃ + 20% SiCw) apresentando maior vida e minimizando os efeitos de temperatura. No entanto, Choudhury e Baradie (1998) revelam que ferramentas sem cobertura apresentam melhor desempenho que as ferramentas com cobertura para usinagem de superligas de níquel. Aparentemente, a camada não melhora o desempenho das ferramentas cobertas.

Conforme Gatto e Iuliano (1994), para uma otimização dos parâmetros de usinagem e a construção de modelo de vida da ferramenta necessita-se levar em consideração a análise de formação de cavaco e o mecanismo de desgaste. Uma análise macroscópica e microscópica criteriosa é indispensável para destacar, na mudança dos parâmetros de corte, qual dos diversos mecanismos de desgaste compreendidos é mais importante e quais as condições de vida da ferramenta.

Ferramentas cerâmicas são empregadas em maiores quantidades na usinagem de ligas com difíceis condições de corte, em que se usa máquinas com altas velocidades devido à sua melhor tenacidade de fratura, resistência ao choque térmico e menor coeficiente de expansão. (KIM, 1994)

Materiais cerâmicos para ferramentas como a cerâmica mista (Al₂O₃-TiC), cerâmica Si₃N₄ (Sialon) e cerâmica SiC reforçado com *whiskers* têm sido empregados cada vez mais para usinagem de ligas à base de níquel. (EZUGWU, WANG e MACHADO, 1999)

Existem dois tipos básicos de materiais cerâmicos que são empregados como ferramentas de corte. São eles: o óxido de alumínio (Al₂O₃) e nitreto de silício (Si₃N₄). A cerâmica pura é baseada em Al₂O₃, mas tem uma pequena quantidade de zircônia (ZrO₂) para uma maior resistência, enquanto a cerâmica mista é baseado em Al₂O₃, mas contém carboneto de titânio (TiC) que lhe atribui propriedades térmicas melhor. A cerâmica reforçada é baseada em Al₂O₃, mas contém carboneto de silício (SiC) que lhe proporciona uma melhor condutividade térmica e aperfeiçoa a sua resistência consideravelmente. O nitreto de silício (Si₃N₄), tem melhores propriedades térmica e dureza do que o Al₂O₃. Estas ferramentas são amplamente usadas para usinagem de super ligas. (CHOUDHURY e BARADIE, 1998).

A introdução destes super abrasivos nas ferramentas de corte comportou obter altas

velocidades de corte. A cerâmica sialon tem um baixo coeficiente de dilatação térmica confrontada com a alumina. Alta tenacidade em conjunto com o baixo coeficiente de expansão térmica tornou as ferramentas de sialon resistentes ao choque térmico. Ferramentas cerâmicas reforçada com *whiskers*, inclusões de monocristais de SiC em uma matriz cerâmica, proporciona maior resistência à tração e tenacidade à fratura. A condutividade térmica do mesmo modo aumenta em 40% sobre a alumina, diminuindo assim os gradientes térmicos e melhorando a capacidade de resistir ao choque térmico (CHOUDHURY e BARADIE, 1998).

O desenvolvimento da ferramenta cerâmica de alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) aperfeiçoou a resistência por meios mecânicos, em vez de químicos. As fibras ou *whiskers* de carbetos de silício são acrescentadas para reforço de uma matriz de alumina. Os *whiskers* têm um diâmetro médio de quase 0,6 μm e um comprimento de 10 a 80 μm . O material resultante tem uma tenacidade à fratura de 8 MPa. Este valor é 4,3 para a alumina pura (Al_2O_3), de 4,5 para alumina mista ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) e de 6,8 para cerâmica sialon.

A cerâmica de alumina reforçada com *whiskers* contém um baixo coeficiente de dilatação térmica, além de boa resistência em altas temperaturas. O carboneto de silício (SiC) apresenta uma alta resistência à tração, mas é quimicamente menos estável quando comparado a alumina. Logo os carbetos de alumina-silício reforçado com *whiskers* possuem melhores propriedades mecânicas (CHOUDHURY e BARADIE, 1998).

A cerâmica de nitreto de silício (Si_3N_4) é um dos mais duros materiais cerâmicos. São compostas de duas fases, cristais de nitreto de silício em uma fase ligante intergranular. Uma mistura de alumina (~13%), nitreto de silício (~77%), de ítrio (~10%) e nitreto de alumínio é empregada como material de sinterização para a produção de cerâmica sialon. A principal vantagem desta cerâmica é a sua elevada tenacidade. Ela é muito mais tenaz que a cerâmica a base de alumina-TiC é utilizada para desbaste de superligas. As cerâmicas a base de silício possuem um baixo coeficiente de dilatação térmica (metade em relação ao metal duro e um terço em relação à alumina). Estas ferramentas podem ser usadas para usinagem de ligas à base de níquel com maiores velocidade de corte e maiores velocidade de avanço em relação às ferramentas de alumina mista (CHOUDHURY e BARADIE, 1998).

Os óxidos de alumínio (Al_2O_3) são cerâmicas de alta resistência à compressão e alta dureza. São quimicamente estáveis em altas temperaturas em relação ao níquel e o ferro. Porém, tem baixa tenacidade à fratura e resistência ao choque térmico. Esta cerâmica é quimicamente

muito estável e inerte à maioria dos ambientes, o que a torna apropriada para aplicações em altas temperaturas. No entanto, tem baixa resistência ao choque mecânico em comparação com metal duro. A tenacidade à fratura das cerâmicas de alumina pode ser aprimorada pela adição de óxido de zircônio (ZrO_2), enquanto que a sua resistência ao choque térmico pode ser melhorada pela adição de carboneto de titânio ou de nitreto de titânio. Esta alumina mista é termicamente mais resistente e mantém sua dureza em altas temperaturas. Com isso a faixa de velocidades de corte empregada pode ser quase dez vezes superior em relação ao metal duro. (CHOUDHURY e BARADIE, 1998)

4. EFEITO DA USINAGEM DO NIQUEL E SUAS LIGAS NOS PARAMETROS DO PROCESSO

4.1. FORÇA DE CORTE

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

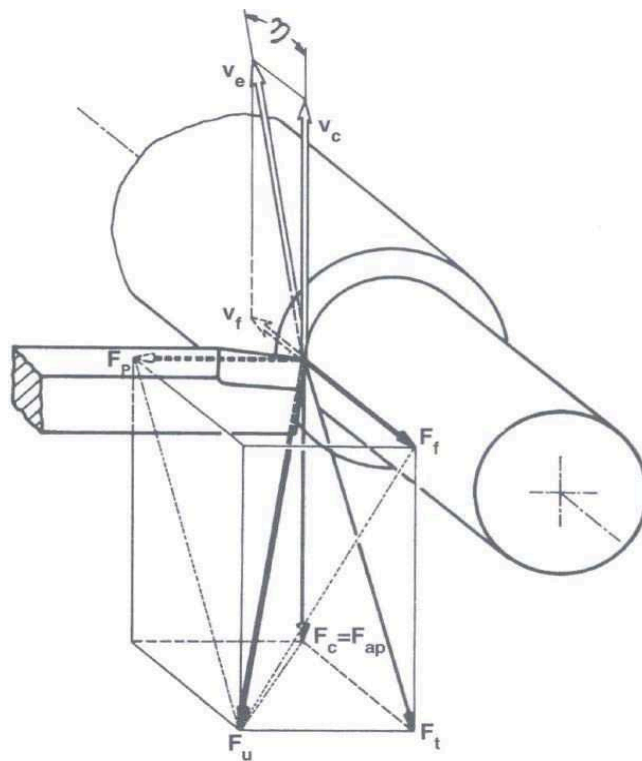


Figura 4.1 – Forças de usinagem em um torneamento e suas componentes (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000).

Na Figura 4.1 são demonstradas algumas forças derivadas da força de usinagem junto com suas respectivas descrições (DINIZ, COPPINI, MARCONDES, 2000):

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

- Força de corte (F_c) – se localiza no plano de trabalho e consiste da projeção da força de usinagem sobre a direção de corte.
- Força de avanço (F_f) – se localiza no plano de trabalho e consiste da projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço.
- Força de apoio (F_{ap}) - se localiza no plano de trabalho e consiste da projeção da força de usinagem sobre a direção perpendicular a direção de avanço.
- Força passiva ou de profundidade (F_p) – se localiza em um plano perpendicular ao plano de trabalho e consiste na componente da força de usinagem neste plano. Devido a sua localização ser perpendicular ao plano de usinagem, a força de profundidade não coopera para a potência de usinagem, e é a responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte, portanto é também responsável pela dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e de dimensões de pequenos valores.

Segundo Diniz, Coppini, Marcondes (2000), no caso da operação de torneamento, é possível notar que a força de corte é igual à força de apoio, conforme demonstrado na figura 4.1, o mesmo não ocorre em outros tipos de operações como o fresamento. A força de corte depende da pressão específica de trabalho e da área da seção de corte.

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

No trabalho realizado por Câmara (2008), cujo tema foi a “**Influência do ângulo de posição sobre o fresamento frontal de níquel puro com insertos de metal duro**” em que foi avaliado a influência do ângulo de posição das ferramentas sobre as forças de corte, empregando três geometrias de fresas, variando o ângulo de posição $\chi_r = 12^\circ$, 45° e 90° e tendo como princípio manter a espessura de corte constante igual a 0,25 mm. Foram utilizados insertos de metal duro com microgrãos revestidos com TiAlN nas três fresas e, insertos de metal duro com revestimento TiN – Al₂O₃ – TiCN na fresa com $\chi_r = 12^\circ$, além do uso do dinamômetro

Kistler 9257 BA juntamente com o software Dynoware captando os valores mínimo, máximo e médio da cada força medida

A Fig. 4.2 mostra o comportamento da força passiva para usinagem do níquel puro com fresas com $\chi_r = 45^\circ$ e $\chi_r = 90^\circ$ usando $vc = 70 \text{ m.min}^{-1}$ e $ap = 1,0 \text{ mm}$. Percebe-se que a partir de 6 minutos de corte a força passiva aumenta devido à elevação do desgaste, sendo mais notório para a ferramenta com $\chi_r = 90^\circ$.

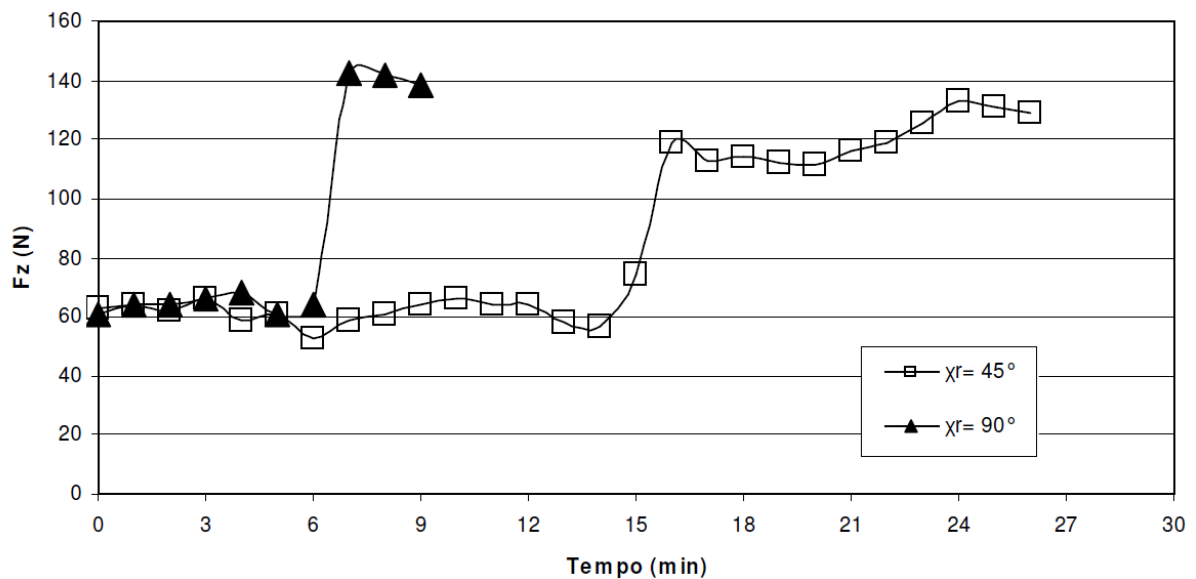


Figura 4.2 Força passiva F_z em função do tempo para fresas com $\chi_r = 45^\circ$ e $\chi_r = 90^\circ$, $vc = 70 \text{ m.min}^{-1}$ e $ap = 1,0 \text{ mm}$ (Câmara, 2008).

A Fig. 4.3 mostra o comportamento da força passiva para usinagem do níquel puro com fresas com $\chi_r = 45^\circ$ e $\chi_r = 12^\circ$ com inserto revestido de $\text{TiN} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiCN}$ e $\chi_r = 12^\circ$ com inserto revestido de TiAlN , com $vc = 70 \text{ m.min}^{-1}$ e $ap = 0,5 \text{ mm}$. Nota-se que devido ao maior avanço da fresa com $\chi_r = 12^\circ$ em relação à fresa com $\chi_r = 45^\circ$, a força passiva aumenta.

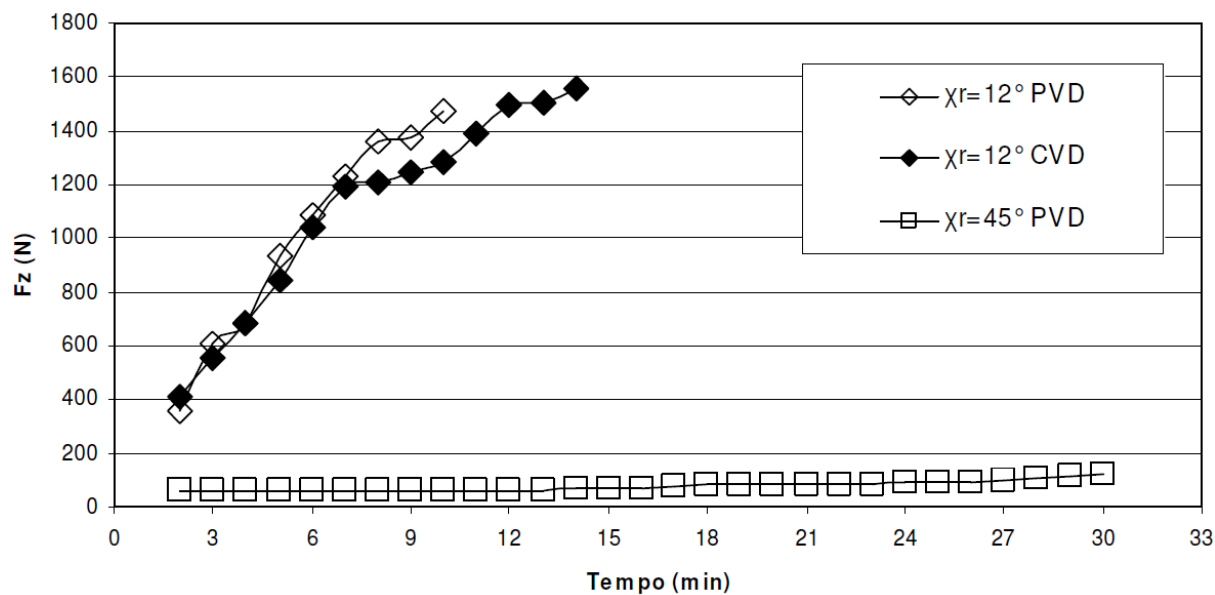


Figura 4.3 Força passiva F_z em função do tempo para fresas com $\chi_r = 45^\circ$ e $\chi_r = 12^\circ$ e $a_p = 0,5$ mm (Câmara, 2008).

A Fig. 4.4 apresenta o comportamento da força passiva para usinagem do níquel puro com fresa com $\chi_r = 45^\circ$ utilizando velocidades de corte $v_c = 90$ m.min⁻¹ e 70 m.min⁻¹. Os valores maiores apresentados na condição de 90 m.min⁻¹ se devem ao aumento do desgaste com a elevação da velocidade de corte.

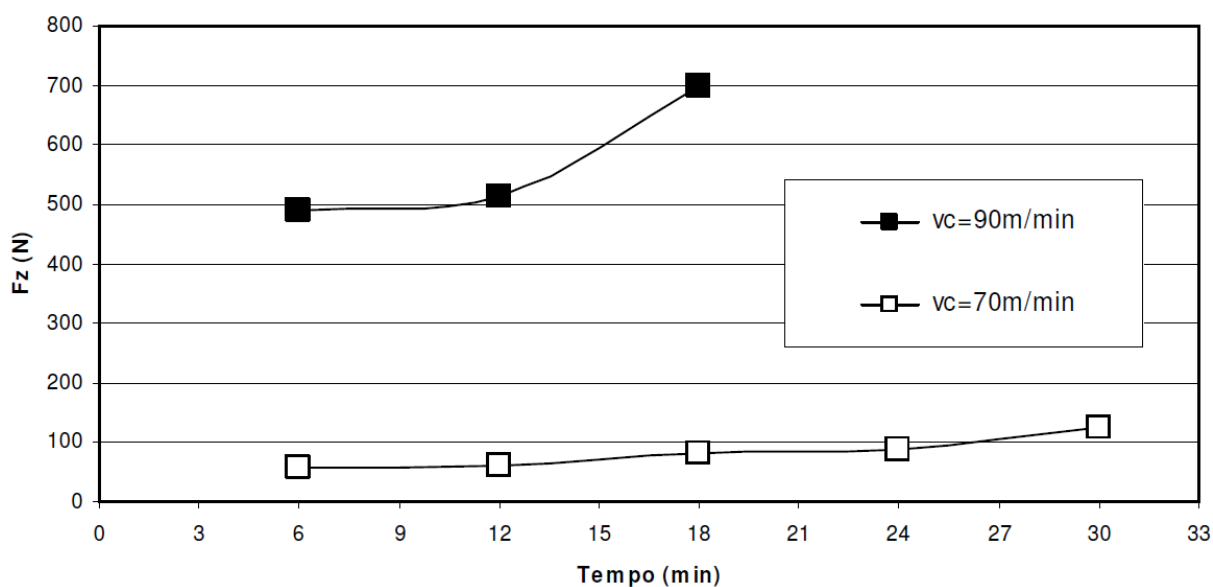


Figura 4.4 Força passiva F_z em função do tempo para fresa com $\chi_r = 45^\circ$ e $v_c = 70$ m.min⁻¹ e 90 m.min⁻¹ (Câmara, 2008).

4.2. DESGASTES DAS FERRAMENTAS DE CORTE

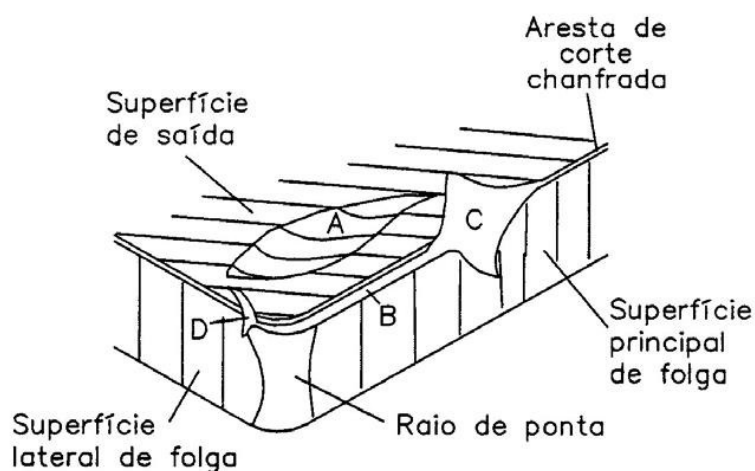
Na usinagem podem ocorrer vários tipos de desgastes e avarias nas ferramentas e muitas das vezes ocorrem mais de um único tipo. Assim torna-se importante diferenciar desgaste de avaria (GAMA 2014):

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

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

Ferraresi (1977) define avaria como sendo as quebras, trincas, sulcos dispostos em forma de pente e as deformações plásticas que incidem no gume cortante durante a usinagem. Na Figura 4.5 estão expostas as principais áreas onde ocorre o desgaste.

Figura 4.5 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.



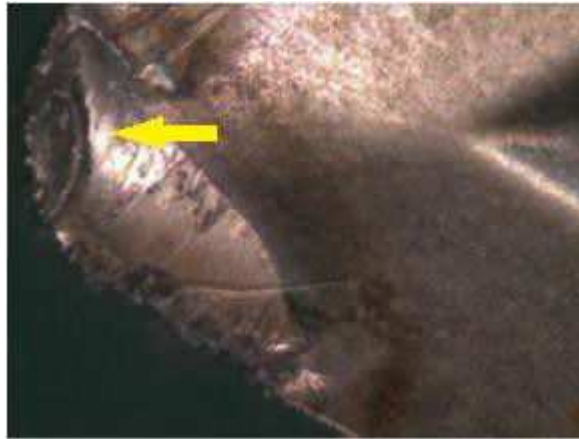
Fonte: Adaptado de (Dearnley; Trent, 1982).

Na Figura 4.5 pode-se caracterizar ao menos três tipos ou formas de desgaste na ferramenta (GAMA 2014):

- **Desgaste de cratera (K_T):** encontrado na área A da Figura 4.5, acontece na superfície de saída da ferramenta, devido ao atrito entre o cavaco e a ferramenta. Este desgaste é menos comum em determinados processos de usinagem, principalmente quando se empregam ferramentas de metal duro com cobertura, ferramentas cerâmicas e quando o material a ser usinado é frágil. O crescimento do desgaste de cratera ocasiona a quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste frontal. De acordo com Miranda (1997),

diversos pesquisadores declaram ser o mecanismo de difusão o principal causador do desgaste de cratera. Na Figura 4.6 é apresentada a craterização da superfície de saída da ferramenta de metal duro H10A, decorrência do contato cavaco/ferramenta na usinagem do Nimonic 80A.

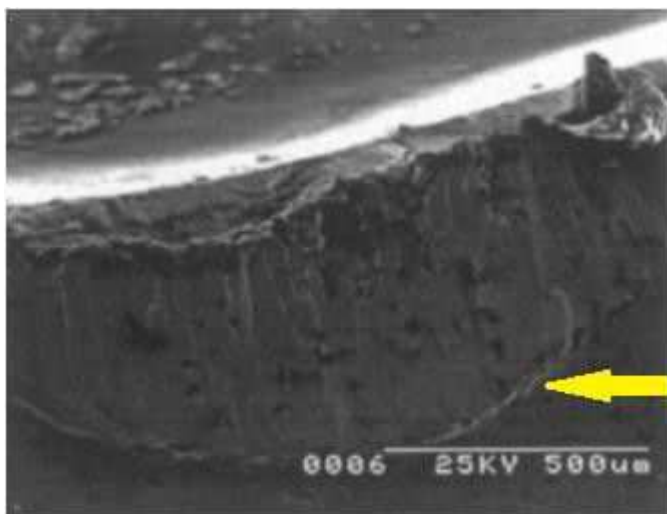
Figura 4.6 - Desgaste de cratera em uma ferramenta de metal duro sem recobrimento na usinagem do Nimonic 80A – $V_c = 90$ m/min., $f = 0,18$ mm/rot. e $a_p = 1,6$ mm



Fonte: (Faria, 2007).

- **Desgaste de flanco (V_B):** localizado na área B da Figura 4.6, incide na superfície de folga da ferramenta, ocasionado pelo contato entre a peça e a ferramenta. É o tipo de desgaste mais comum no processo de usinagem, sendo capaz de modificar as dimensões da peça e afetar o seu acabamento superficial uma vez que a geometria da aresta de corte é alterada. Este desgaste está fortemente relacionado com a elevação da velocidade de corte. Na Figura 4.7 pode ser visto o desgaste de flanco gerado durante a usinagem da liga de níquel C-263 com ferramenta de metal duro recoberta SNMG 120412.

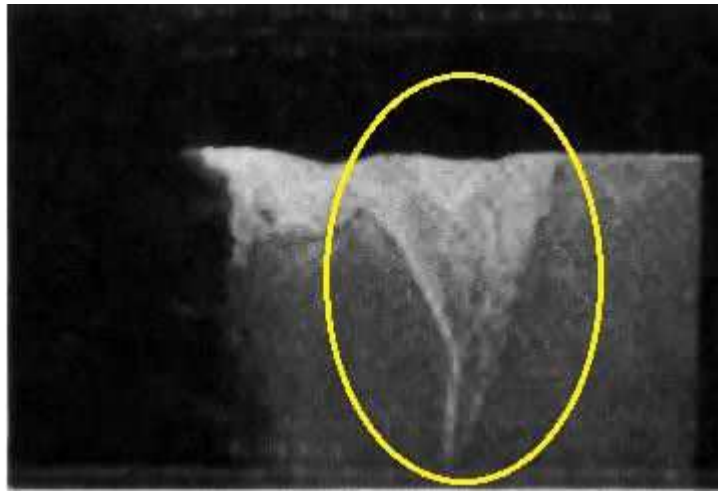
Figura 4.7 - Desgaste de flanco na ferramenta de metal duro SNMG 120412 na usinagem da liga de níquel C-263
- $V_c = 68$ m/min., $f = 0,127$ mm/rot. e $a_p = 1,27$ mm.



Fonte: (Ezugwu et al., 2004).

- **Desgaste de entalhe:** encontrado nas áreas C e D da Figura 4.6, não é propriamente um mecanismo, mas sim uma forma de desgaste situado. Porém, ainda não existe um consenso na literatura que esclareça exatamente o mecanismo que provoca o desgaste de entalhe. Ele acontece, principalmente, na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas e com alto grau de encruamento, tais como ligas de níquel, titânio, cobalto e aço inoxidável, devido à abrasão, difusão e “attrition”, influenciada pelas interações com a atmosfera (oxidação). Este tipo de desgaste modifica a geometria da ponta da ferramenta e desta forma influencia no acabamento superficial da peça usinada. Este desgaste fica ainda mais estimulado com o aumento da velocidade de corte e temperatura. Na Figura 4.8 pode-se ver um severo desgaste de entalhe, na superfície de folga, na região próxima à profundidade de corte de uma ferramenta cerâmica utilizada na usinagem do Inconel 901.

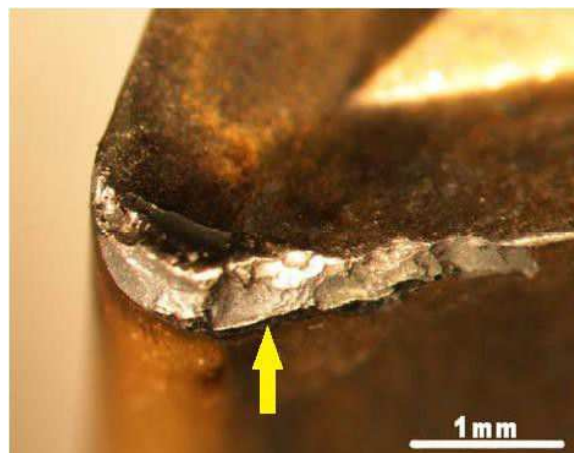
Figura 4.8 - Desgaste de entalhe em uma ferramenta cerâmica na usinagem do Inconel 901



Fonte: (Ezugwu, 2004)

- **Lascamento** (*chipping*): esta avaria da ferramenta ao contrário dos desgastes frontal e de cratera, que removem sucessivamente partículas muito pequenas da ferramenta, no lascamento partículas maiores são retiradas de uma só vez, podendo levar até a quebra da ferramenta. Acontecem principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Pode ser examinado na Figura 4.9 o lascamento na aresta de corte da ferramenta de metal duro recoberta, resultante da usinagem da liga de *Pyromet*[®] 31V em torneamento.

Figura 4.9 - Lascamento de uma ferramenta de metal duro TNMG 160408-23 na usinagem da liga de *Pyromet*[®] 31V - $v_c = 90$ m/min., $f = 0,18$ mm/rot. e $a_p = 0,8$ mm.



Fonte: (Ribeiro e Bahia, 2010).

Conhecidos os desgastes citados anteriormente, desgastes estes que normalmente sucedem quando da usinagem de ligas de níquel cabe recordar que as propriedades do material de corte são de fundamental importância no que diz respeito à vida e ao desgaste da ferramenta do mesmo modo como os parâmetros adotados para o processo de usinagem. Existem diversos mecanismos de desgaste, resultados de processos físicos e químicos durante a operação de usinagem (GAMA 2014).

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 originada pela elevada pressão empregada à ponta da ferramenta, aliada à alta temperatura, ocasionando a deformação da aresta. O martelamento acontece quando a parte da aresta de corte que não está em uso é afetada 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. O progresso do desgaste pode levar à quebra da ferramenta, ainda que ela também possa acontecer devido a outros fatores como: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, corte interrompido, etc. As trincas são causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos, como acontece no corte interrompido (Diniz et al., 2010).

Os desgastes das ferramentas podem ser originados 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 fica aderida à aresta de corte, na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, ou seja, a APC é composta 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 portanto 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 (GAMA 2014).

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 ficando presa à superfície de saída. Com o posterior fluxo de mais cavaco sobre essa camada já presa à ferramenta, ela se deforma e encrua, aumentando sua resistência mecânica e funcionando como aresta de corte. A aresta postiça de

corte tende a desenvolver 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 danifica sensivelmente o acabamento da peça.

- **Difusão:** Este mecanismo é um fenômeno microscópico acionado pela temperatura na região de corte, ou seja, implica 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 (GAMA 2014).

Em usinagem, as velocidades relativas entre ferramenta e peça ou entre cavaco e ferramenta são elevadas e o tempo de contato entre estes materiais é muito pequeno. Isto praticamente conduziria 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 constantemente, assegurando o fluxo difusivo. Este mecanismo de desgaste poderá operar tanto na superfície de saída como na superfície de folga, e a taxa de desgaste irá expandir 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 indispensáveis 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, aonde a velocidade de saída do cavaco é zero (Diniz et al., 1999).

- **Aderência:** Este mecanismo ocorre na maioria das vezes em baixas velocidades de corte em que o fluxo de material acima da superfície de saída torna-se irregular. A aresta postiça de corte pode surgir e o contato com a ferramenta torna-se menos contínuo. Sob estas condições, fragmentos microscópicos são extraídos da superfície da ferramenta e arrastados junto com o fluxo de material (GAMA 2014).

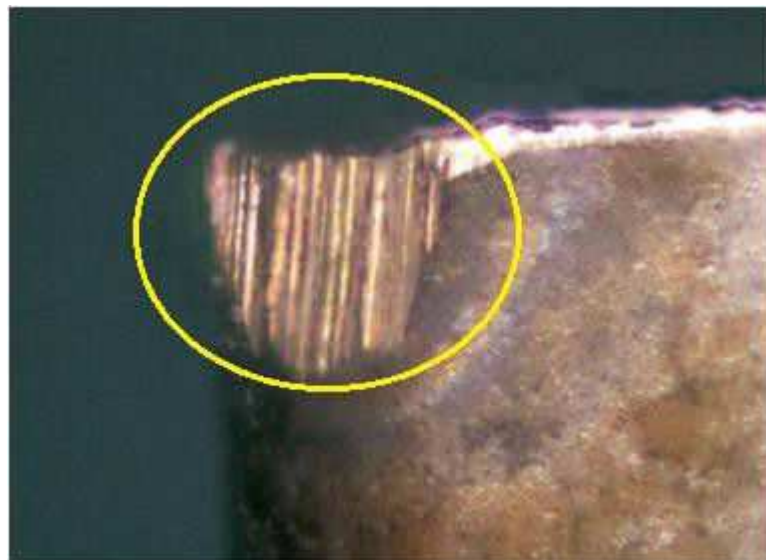
Este tipo de desgaste pode ser suavizado com o uso de fluido de corte (lubrificante) apropriado e o recobrimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito. Este fenômeno é responsável tanto pelo desgaste de cratera, quanto pelo desgaste de flanco. Microscopicamente as áreas que sofreram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

- **Abrasão:** O desgaste abrasivo compreende a perda de material por micro-sulcamento, micro-corte ou micro-lascamento ocasionado por partículas de elevada dureza relativa. Estas

partículas podem estar incluídas no material da peça na forma de óxidos, carbonetos e carbonitreto ou podem sobretudo ser partículas da própria ferramenta que são arrancadas por attrition, por exemplo. Na Figura 4.10 é apresentado um desgaste por abrasão analisado por Faria (2007) na usinagem da liga de níquel Nimonic 80A com lubrificação abundante, usando 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 (GAMA 2014).

Figura 4.10 - 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 aconteça em condições normais de corte, o aquecimento da ferramenta significará uma realidade. Assim, as altas temperaturas do processo e a presença de ar e água incluída nos fluidos de corte provocam a oxidação para a maioria dos metais. Na prática, hoje grande parte dos fluidos de corte contém elementos que evitam a oxidação tanto da ferramenta quando da peça usinada e, deste modo desvia 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 causar oxidação/corrosão na ferramenta (GAMA 2014).

König e Schemmel (1975), apud Sales (1999), qualificam 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 relevância, já que a sua resistência a quente é ultrapassada antes que a superfície exiba 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 impedem a oxidação.

A região de oxidação normalmente se confere 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 desenvolvidos óxidos complexos de tungstênio, cobalto e ferro, que em consequência da sua expansão volumétrica em relação ao carbeto de tungstênio, desenvolvem elevações na superfície da ferramenta, facilitando o lascamento e a quebra da aresta de corte (GAMA 2014).

No desgaste por oxidação, detritos podem ser retirados da camada de óxido formada. A oxidação que acontece sob condições de contato em escorregamento é muito mais rápida do que em condições estáticas e o óxido desenvolvido pode crescer no tempo de minutos durante o desgaste por escorregamento. Evidências experimentais recomendam que sob certas condições uma apreciável quantidade de óxido destaca-se como partículas procedendo na ocorrência de um desgaste abrasivo posterior (GAMA 2014).

Todos os mecanismos ou processos de desgaste citados podem ser observados na prática. Mas, certamente, um prevalecerá sobre os demais, dependendo sobretudo 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 (GAMA 2014).

Segundo Diniz et al. (2010) a separação quantitativa da contribuição de cada um desses fenômenos para o desenvolvimento 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 alto por causa do cisalhamento da aresta postiça de corte e da aderência. Em velocidades de corte maiores, o

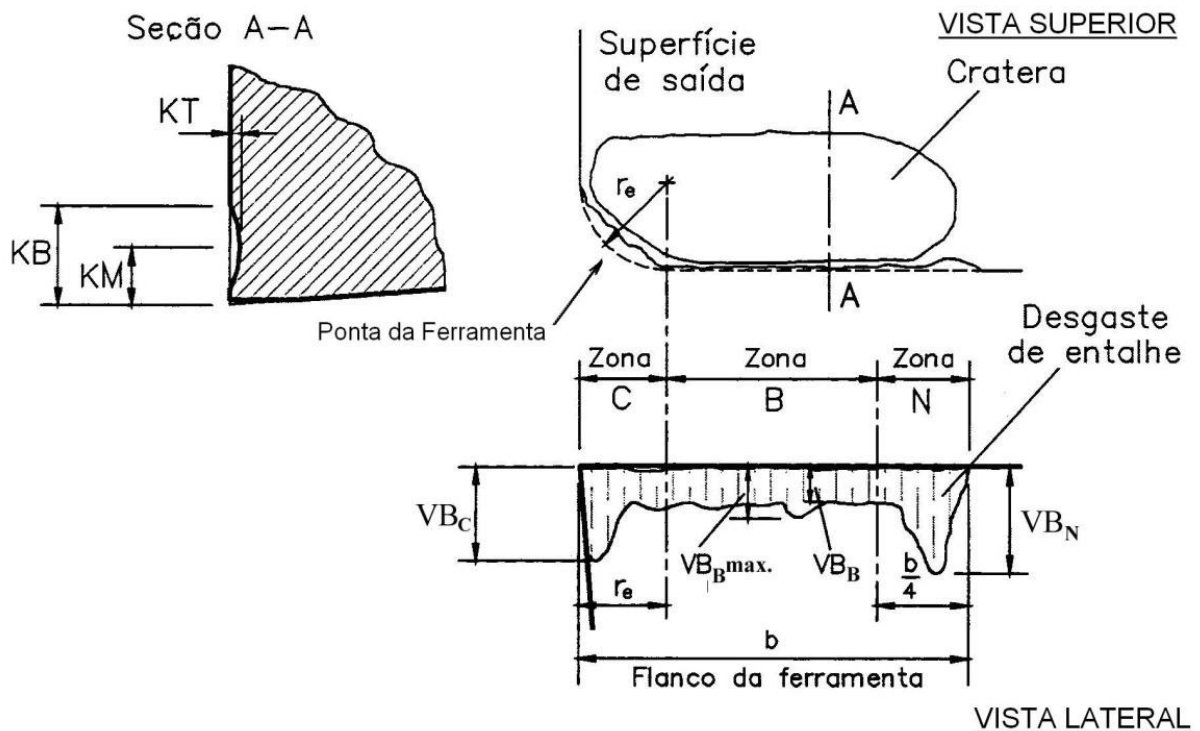
desgaste é ocasionado principalmente pelos fatores cuja intensidade depende da temperatura de corte, como a abrasão, a difusão e a oxidação.

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

Na Figura 4.11 pode-se observar os parâmetros empregados pela ISO 3685 (1993) para quantificar esses desgastes. Os principais desgastes são:

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

Figura 4.11 - 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 cerâmicas é:

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

A norma ainda sugere 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 $VB_N = 1,0 \text{ mm}$ como critério de fim de vida. Desta forma, quando algum dos limites de desgaste for ultrapassado, recomenda-se a afiação ou substituição da ferramenta de corte.

Gama (2014) realizou um trabalho cujo o objetivo era o estudo da formação do cavaco em relação aos diversos parâmetros de usinagem, fazendo uso de três diferentes tipos de superliga de níquel, a Nimonic 80A, a Pyromet A31 e a Inconel 718 todas fabricadas e fornecidas pela empresa Villares Metals. Todos os três materiais fornecidos na condição laminado a quente. As ligas foram torneadas utilizando-se diversos parâmetros de usinagem: velocidades de corte (75 e 90 m/min), avanço (0,15 e 0,18 mm/rot), profundidade (0,8 mm), Mínima Quantidade de Fluido (MQF), Fluido abundante e ferramenta de metal duro com recobrimento (TiAlN).

Nas ferramentas das Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 pode-se notar que o desgaste de flanco foi maior na imagem (b) cujos parâmetros utilizados foram 90-15-8, também cabe salientar uma provável adesão de material, tais alterações na geometria da ferramenta podem diminuir sua capacidade de remoção de material e sua vida consideravelmente. Na imagem (a) cujos parâmetros usados foram 75-15-8 fica evidente a presença de entalhe na aresta da ferramenta e o desgaste flanco em menor intensidade. Portanto tem-se para maiores velocidades desgaste de flanco mais acentuado com a presença de outros tipos de desgastes que acontecem devido a maior energia de ativação gerada pelo processo, sem contar que invariavelmente existe mais de um tipo de desgaste associado ao processo.

Figura 4.12 – Desgaste das ferramentas usadas na usinagem da Nimonic 80A (a) parâmetros 75-15-8 e (b) parâmetros 90-15-8 (Gama, 2014)

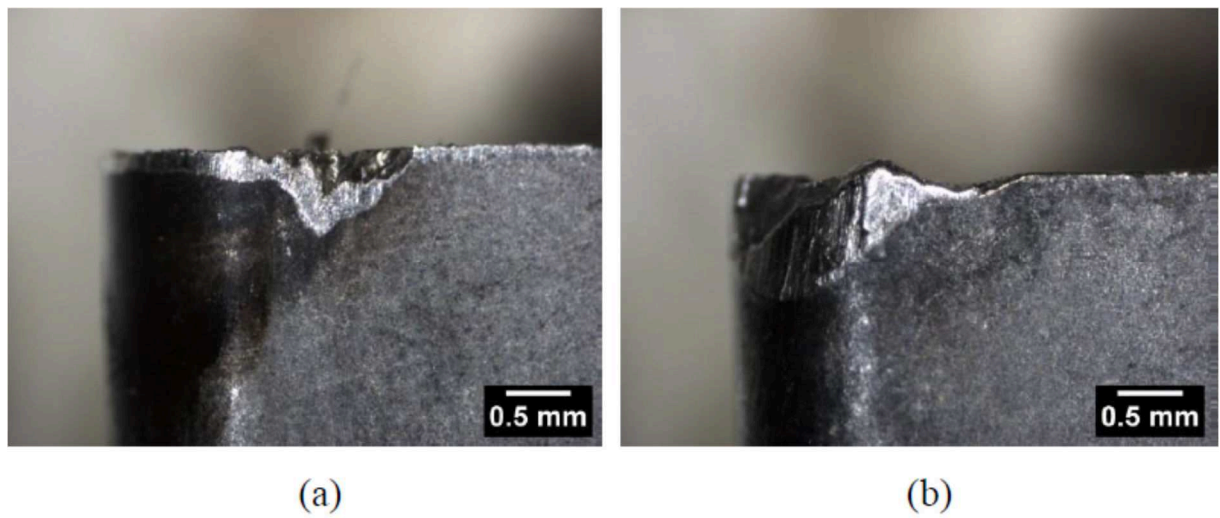


Figura 4.13 – Desgaste das ferramentas usadas na usinagem da Inconel 718 (a) parâmetros 75- 15-8 e (b) parâmetros 90-15-8 (Gama, 2014)

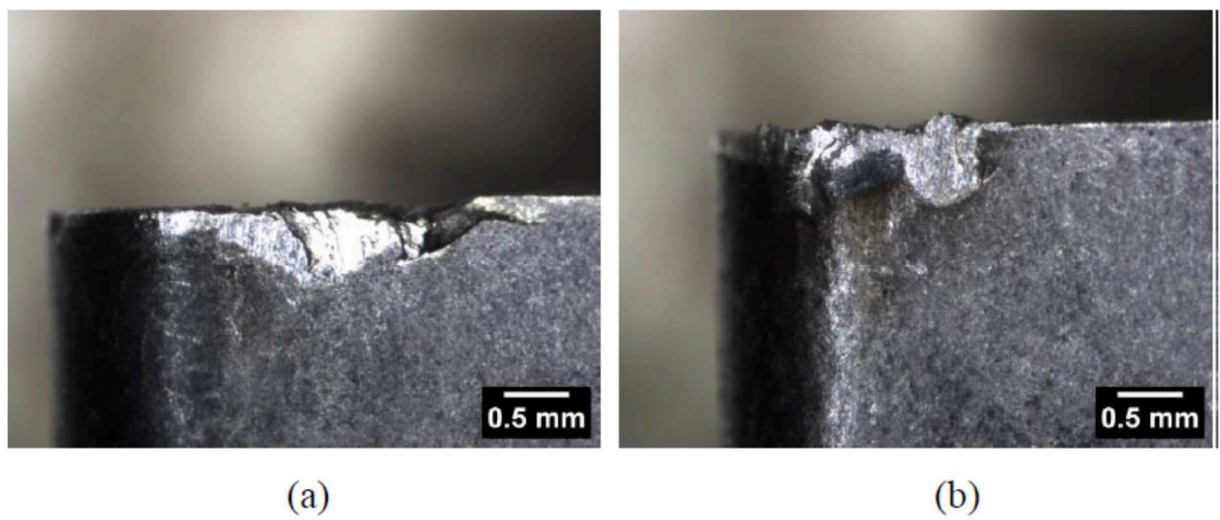
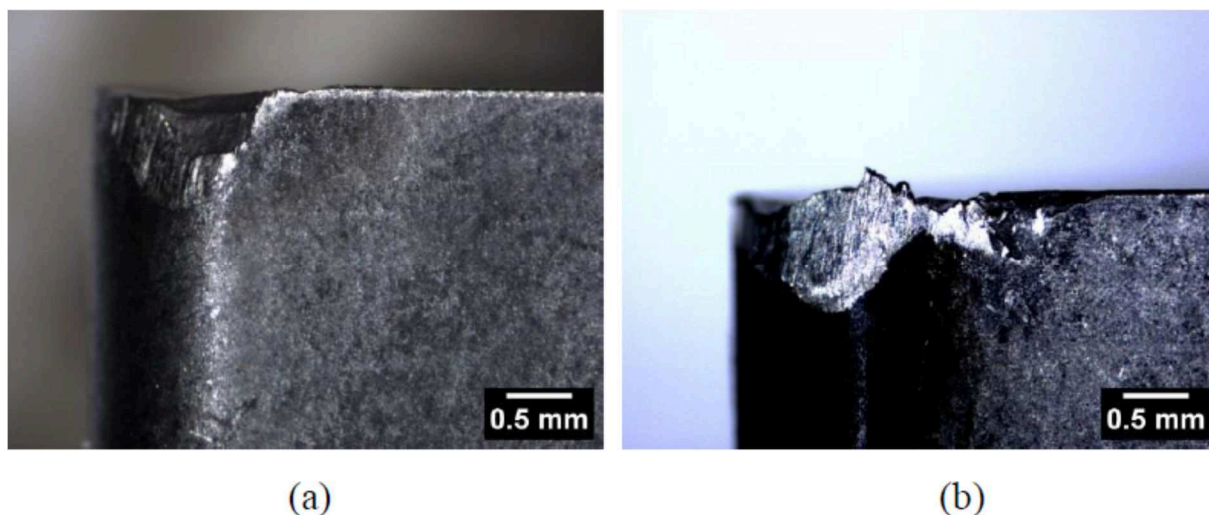


Figura 4.14 – Desgaste das ferramentas usadas na usinagem da Pyromet A31 (a) parâmetros 75-15-8 e (b) parâmetros 90-15-8 (Gama, 2014)



4.3. FLUIDOS DE CORTE EMPREGADO

As principais funções dos fluidos de corte são a diminuição do atrito (lubrificação), eliminação do calor (refrigeração) e assistência no transporte dos cavacos (limpeza). Com a falta de lubrificação, a camada de separação entre a ferramenta e o material da peça não será mais satisfatoriamente garantida e o atrito aumentará. Uma consequência para a ferramenta é o aumento do desgaste abrasivo e por adesão. Prevê-se ainda um aumento da temperatura no processo. Com o aquecimento, os cavacos possuirão mais dificuldade para obter uma forma mais definida e podem soldar-se à ferramenta. A reduzida refrigeração influencia o comportamento térmico da máquina e, como consequência, a precisão dimensional e geométrica das peças. (NOVASKI E DÖRR, 1999)

Durante a usinagem a seco incide uma maior exigência sobre as ferramentas, decorrente sobretudo da elevação da temperatura do processo. A dureza e a resistência ao desgaste a quente das ferramentas exercem um papel fundamental nestes casos. (NOVASKI E DÖRR, 1999)

Os custos de refrigeração relacionados com o processo de usinagem são comumente relegados a um segundo plano, mas é interessante que eles sejam observados ao lado dos custos fixos da instalação dos sistemas de refrigeração. Neles estão embutidos, por exemplo, os gastos produzidos com fornecimento, tratamento e eliminação dos resíduos nocivos ao meio ambiente.

(NOVASKI E DÖRR, 1999)

Uma das maneiras de se minimizar os efeitos dos tempos improdutivos ocasionados pelos desgastes das ferramentas é o ingresso, no processo, de sistemas de lubrificação e refrigeração eficientes. Porém, na última década as pesquisas incluíram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerantes e/ou lubrificantes na produção metal mecânica. Os fatores importantes que justificam esse procedimento compreendem os custos operacionais da produção, questões ecológicas, as exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano (MACHADO e DINIZ, 2000).

No trabalho com materiais de difícil usinagem, o efeito refrigerante dos fluidos de corte (responsáveis pela retirada de calor da região do corte), é bastante limitado devido a sua evaporação prematura originado pelas altas temperaturas obtidas nesta região. Esta evaporação não admite o acesso do fluido na interface cavaco ferramenta e/ou ferramenta peça. Devido a isto o efeito lubrificante se enfatiza pela formação de um filme de óleo que diminui significativamente o atrito reduzindo com isto, a geração de calor e consequentemente diminuindo a temperatura da região do corte, (EZUGWU e BONNEY, 2004). Outra técnica possível é o emprego de um sistema de alta pressão que não só fornece refrigeração apropriada na interface ferramenta peça, mas também fornece uma remoção eficaz de cavacos da área de corte. O jato de refrigerante com alta pressão é capaz de produzir uma cunha hidráulica entre a ferramenta e a peça, entrando profundamente a interface com uma velocidade superior ao necessário, mesmo para a usinagem de alta velocidade. Este fenômeno também muda as condições de fluxo do cavaco. (KOVACEVIC, CHERUKUTHOTA e MAZURKIEWICZ 1995). Conforme Shaw (1984), o uso de fluido refrigerante/lubrificante tem as seguintes funções em uma operação de usinagem:

1º Diminuir a adesão entre o cavaco e a ferramenta e proporcionar baixo atrito e desgaste, além da redução da aresta postiça de corte;

2º Refrigerar a ferramenta e a peça além da condução do calor gerado na zona de corte para fora desta;

3º Remover os cavacos da região de corte;

4º Proteger a superfície usinada contra corrosão.

Com base nestas informações é possível avaliar que o calor e o atrito exercem

grande influência na escolha do uso do fluido refrigerante/lubrificante.

Em processos de usinagem com baixa velocidade de remoção do cavaco ou dificuldades geométricas de acesso para a região de corte, faz-se obrigatória o emprego de pontos auxiliares de refrigeração/lubrificação para auxiliar na retirada do cavaco.

O aumento de temperatura na região de corte poderá comprometer materiais devido à corrosão, porém em superligas a base de níquel, este efeito é desprezível devido à sua alta resistência.

Diniz, Marcondes e Coppini (2006), acrescentam às funções descritas acima que o uso de fluido refrigerante/lubrificante também irá proceder em:

5º Redução de distorções de origem térmica da peça com finalidade de facilitar o alcance de tolerâncias apertadas;

6º Impedir danos na estrutura e o crescimento excessivo de tensões residuais na superfície da peça usinada.

A necessidade da aplicação de fluido refrigerante/lubrificante pode ser feita pela escolha de um tipo de fluido selecionando a característica refrigerante em relação à lubrificante e vice-versa (THEREZANI 2012).

Conforme THEREZANI (2012), durante o torneamento do níquel e suas ligas, o calor produzido concentra-se na aresta de corte da ferramenta com uma intensidade superior àquela alcançada no torneamento de aços e ferros e ferros fundidos frequentemente processados, visto que a condutividade térmica deste material é baixa, tornando esta liga refratária. A tabela 4.1 a seguir ilustra determinados valores do coeficiente de condutividade térmica de alguns materiais.

Tabela 4.1. – Condutividade térmica de materiais comumente utilizados na indústria, (ASM - Metals Handbook – Vol.1)

<i>Material</i>	<i>Condutividade térmica*</i>	<i>Material</i>	<i>Condutividade térmica*</i>
Alumínio 5005	0,48	Ti-6Al-4V	0,039
Bronze fosforoso de corte livre	0,18	Óxido de alumínio	0,07
Aço H13	0,095	Aço rolamento 52100	0,12
Aço Inoxidável 18Cr-8Ni	0,035	Aço 1040	0,115
Aço Inoxidável 304	0,033	Inconel	0,036

*Valores em cal/cm x s x °C

A função lubrificante age no somatório das fontes de calor presentes na formação do cavaco, ou seja, nas três zonas de atrito. O caráter refrigerante não age na redução da geração do calor, mas sim na extração do mesmo depois de sua geração. A figura 4.15 ilustra as fontes de calor (A, B e C) na formação do cavaco, segundo Ferraresi (1995).



Figura 4.15 – Fontes de geração de calor na formação do cavaco, (adaptado de FERRARESI 1995).

Observando a figura 4.15, pode-se observar (THEREZANI 2012):

Zona A – Zona de geração de calor devido ao atrito entre uma face do cavaco e a superfície de saída da ferramenta, zona secundária de cisalhamento;

Zona B – Zona de geração de calor devido ao atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a peça que está sendo processada;

Zona C – Zona de geração de calor devido a deformação plástica sofrida ao longo do plano de cisalhamento do cavaco.

Durante o torneamento das superligas a base de níquel, o atrito produzido entre a superfície de saída, superfície de folga primária e secundária da ferramenta e o cavaco, resultam em calor e desgaste da ferramenta de corte. Uma terceira fonte de calor, que é a principal, é o atrito interno que acontece no plano de cisalhamento ao longo da formação do cavaco. Distinto da ação refrigerante que atua na extração de calor, a ação lubrificante atua na redução dessa, ou seja, o seu efeito é tornar mínimo o atrito (THEREZANI 2012).

Analisando a figura 4.15, pode-se alegar que o fluido irá diminuir o coeficiente de atrito entre as partes, ou seja, entre o cavaco e a ferramenta e entre a ferramenta e a peça (zonas A e B). A diminuição do calor na zona C se faz pela redução do coeficiente de atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, que consequentemente expande o ângulo (ϕ) que define a orientação do plano de cisalhamento. Este acréscimo reduz a taxa de deformação do cavaco originado, resultando em uma diminuição na força necessária para realizar o corte, que conduz por sua vez à redução da temperatura. O aumento de (ϕ) também aumenta a velocidade de escoamento do cavaco formado, impedindo, desta forma, a troca de calor por condução entre o cavaco e a superfície da ferramenta de corte (THEREZANI 2012).

Em relação à discussão clássica da acessibilidade do fluido na região do corte, Trent e Wright (2000), asseguram que o fluido refrigerante não age diretamente nas zonas A, B e C, mas sim no cavaco, na peça e na ferramenta em regiões que o acesso se faz possível, ou seja, próximo às zonas A, B e C, mas não exatamente nelas. Porém, os fluidos lubrificantes tornam a lubrificação da região de contato um caso particular da lubrificação limite, em que o aditivo de extrema pressão age de maneira importante, diminuindo as forças de corte e a geração de calor além da melhora do acabamento superficial.

Therezani (2012) em sua dissertação de mestrado cujo tema era “*Avaliação de diferentes ferramentas no torneamento da liga Inconel 713C*” foram utilizadas ferramentas de cerâmicas com geometria S e ferramentas de metal duro com geometria C, na qual nos experimentos com ferramentas de metal duro, os parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de corte foram estabelecidos de acordo com valores indicados em catálogos e ensaios preliminares. Nos ensaios com as ferramentas de metal duro foi utilizado um fluido de corte aquoso, cujo alto poder refrigerante é capaz de diminuir o efeito do calor originado sobre a ferramenta. Empregou-se nos experimentos um óleo miscível de base vegetal (nome comercial Vasco 1000®), fornecido pela Blaser Swissslube, com concentração de 10 % brix, aplicado externamente à ferramenta e a uma vazão de aproximadamente 8 l/min. Precisou-se do fluido de corte para diminuir a temperatura na região de corte, haja vista que o Inconel 713C possui elevada resistência mecânica à quente.

4.4. ACABAMENTO SUPERFICIAL DAS PEÇAS

O acabamento superficial depois da usinagem é influenciado pela geometria da ferramenta, geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta, material da peça, material da ferramenta e condições de corte como o avanço (f), a profundidade de usinagem (a_p) e velocidade de corte (v_c) (FARIA 2007).

A rugosidade da superfície final é considerada como a soma de dois efeitos independentes (Figura 4.16) (FARIA 2007):

- ✓ A rugosidade da superfície teórica (padrão) que é o resultado da geometria da ferramenta e do avanço.
- ✓ A rugosidade da superfície real que é o resultado das irregularidades da operação de corte.

Quando se trata de definir a rugosidade, o fator a ser extinto é a ondulação, pois a esta curva estar superposta a rugosidade, o que pode induzir a resultados enganosos ao pretender-se sua medição. A ondulação ou textura secundária pode ser ponderada como um erro macrométrico, entretanto a tendência atual é avaliá-la com os mesmos meios com que avalia a rugosidade. A figura 4.17 significa o perfil efetivo de uma superfície com visualização de sua rugosidade e ondulação, dando a ideia de erro de forma e salientando seus componentes nas

operações de torneamento (SENAI 2002).



Figura 4.16 - Comparação da superfície teórica com a superfície real obtida em operações de torneamento (Cunha et al., 2005).

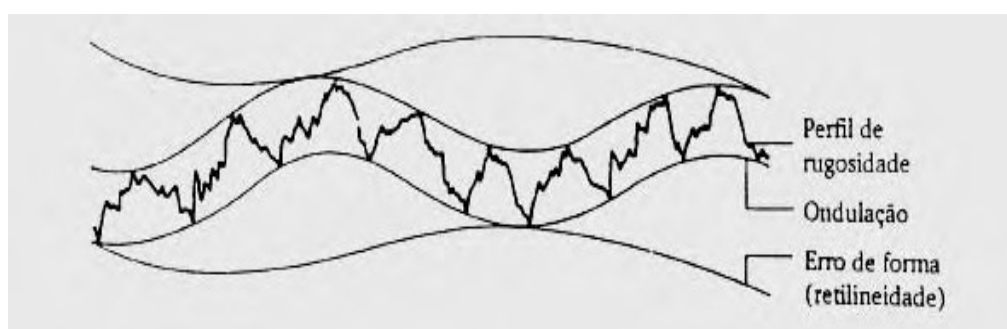


Figura 4.17 - Classificação dos erros superficiais - Rugosidade (Senai 2002)

Os resultados recebem certas distorções pela utilização de filtros para excluir a ondulação quando se deseja definir a rugosidade. O comprimento de amostragem também conhecido como comprimento de onda limite, *cut-off* ou módulo de medição, tem o propósito de filtrar a ondulação (FARIA 2007).

Conforme FARIA (2007), para esclarecer a ideia da exclusão da ondulação, considera-se uma curva de perfil efetivo composto (rugosidade sobreposta a ondulação), na qual é determinado um valor de *cut-off* (nome comumente utilizado nos rugosímetros eletrônicos), apropriado ao comprimento (l_e), um percurso de cinco vezes, curva A, (figura 4.18).

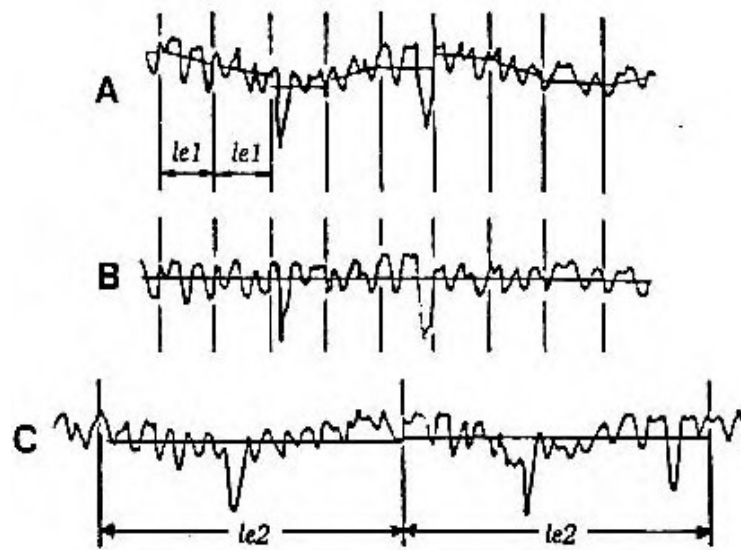


Figura 4.18 - Conceito de valor de cut-off e exclusão da ondulação Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento (SENAI 2002)

Para cada segmento ($le1$), traça uma linha média e constata que os extremos destas linhas pode proporcionar descontinuados de um segmento para o outro, porém se alinhar a linha média de cada segmento, formando uma só linha reta horizontal, e se obtém o perfil da rugosidade, conforme a curva B, onde a ondulação foi filtrada (FARIA 2007).

Segundo FARIA (2007), se o valor de *cut-off* fosse maior que o necessário ($le2$) curva C, valores do perfil de ondulação que influenciariam os resultados da avaliação da rugosidade, seriam inseridos.

A rugosidade Ra é o parâmetro de medição mais usado na maioria dos processos de fabricação. Os riscos superficiais inerentes ao processo, não modificam substancialmente o seu valor. Para o maior número das superfícies o valor da rugosidade neste parâmetro, está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude (FARIA 2007).

O valor de Ra , em um comprimento de amostragem, representa a média da rugosidade; entretanto, se um pico ou vale atípico surgir na superfície, o valor da média não sofrerá ampla alteração, ocultando tal defeito; mas se o equipamento de medição (rugosímetro) produzir simultaneamente os gráficos Ra e Ry , tal como o equipamento usado em nossos ensaios, o gráfico Ry fornecerá as informações complementares ao parâmetro Ra , Rugosidade superficial nas operações de torneamento (SENAI 2002).

König e Gerschwiler (1999) revelaram que o desgaste de entalhe na aresta de corte secundária leva a um pobre acabamento superficial e na aresta principal resulta em formação de rebarbas na peça. Estes pesquisadores asseguram também que deformação plástica da microestrutura ocorre na superfície da peça por causa da operação de usinagem, originando endurecimento e aumentando a dureza final da peça.

A extensão da deformação e o valor da dureza estendem dependendo dos parâmetros de corte, geometria e desgaste da ferramenta. A deformação plástica da superfície pode estar associada à modificação na forma do grão. Deformação plástica é visível com microscópio óptico e comumente estende-se acima de 20 μ m da superfície. Medida da microdureza mostra um significativo aumento da dureza na superfície ocasionada pela deformação plástica (FARIA 2007).

O objetivo do trabalho realizado por BURIAN e GAMA (2011) na qual o tema era **“O ESTUDO DA USINAGEM EM TORNEAMENTO DA SUPERLIGA À BASE DE NÍQUEL PYROMET 31V”** foi gerar resultados para demonstrar informações mais específicas a respeito da real influência de recobrimentos, em ferramentas de corte, e dos fluidos de corte, no torneamento e assim promover a otimização da usinagem destas ligas. A super liga Pyromet 31v utilizada nos ensaios de usinagem, foi produzida pelo processo de laminação a quente, com dureza final entre 41,5 e 42,5 HRC e passou por torneamento, sendo este realizado com diversos parâmetros de usinagem como velocidades de corte, avanço, profundidade, em condições de Mínima Quantidade de Fluido (MQF), Fluido abundante, ferramentas de corte com recobrimento e sem recobrimento no início de sua vida de trabalho e com desgaste.

O Gráfico 4.1 compara o acabamento superficial (Ra) obtido em função do tipo de aplicação de fluido (MQF ou abundante). Os resultados obtidos variam de acordo com os parâmetros e as condições de usinagem.

Apesar de adquirir uma vida de ferramenta bem inferior com o uso de MQF, nas condições de ensaio realizadas, os valores de rugosidade (Ra) com MQF foram melhores que em condição de lubrificação convencional (abundante).

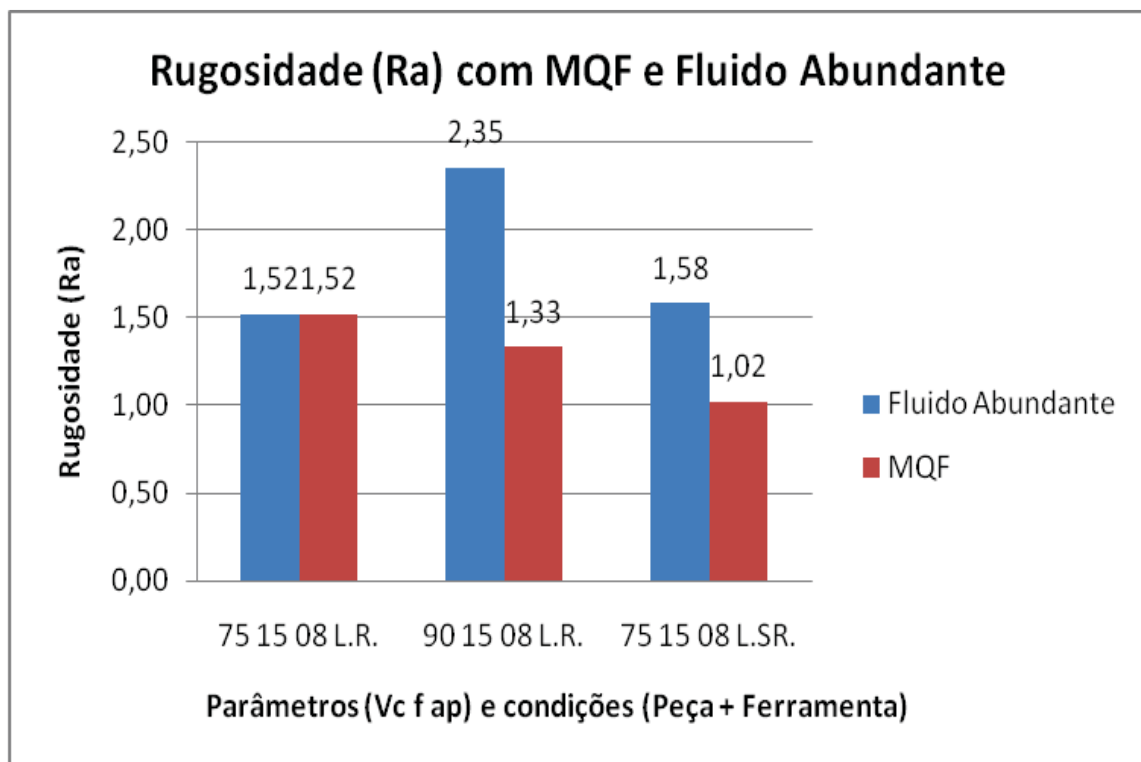


Gráfico 4.1 – Rugosidade Ra em ligas laminadas do Pyromet 31V com uso de MQF e Lubrificação abundante
(Burian e Gama, 2011)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível concluir que a usinabilidade do níquel e suas ligas influi-se fortemente pelo tipo de ferramenta empregada, a determinação da velocidade de corte, dos ângulo de posições da ferramenta, bem como a escolha e o uso devido do fluido de corte.

Percebe-se que na usinagem do níquel puro com ângulos de posição da ferramenta (χ_r) iguais a 12° , 45° e 90° , no momento em que foi empregado $\chi_r = 12^\circ$ a força de usinagem apresentou os maiores valores, devido ao alto avanço utilizado.

Com relação a aplicação de fluido na usinagem da liga de níquel Inconel 713C utilizando inserto de metal duro e usando um óleo miscível de base vegetal, alcançou-se resultados bastante satisfatórios, visto que sua indicação é ideal para usinagem média e pesada.

Além do desgaste de flanco diferentes tipos de desgastes estão associados ao torneamento das ligas de níquel em questão uma vez que ficaram constatados casos de ferramentas com entalhe (lubrificação abundante) na usinagem das ligas Nimonic 80A, a Pyromet A31 e a Inconel 718.

O acabamento superficial (R_a) foi melhor quando foi utilizado o MQF ao invés da lubrificação comumente utilizado (abundante) para o torneamento da liga Pyromet 31v.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o desempenho de fresamento frontal de níquel puro empregando altas velocidades de corte (HSM) com insertos de metal duro visando redução do custo de usinagem.
- Estudar a variação da deformação nos cavacos gerados para as diferentes condições de corte no níquel puro;
- Estudar o efeito da estratégia de aplicação de fluido de corte, MQF e sem fluido no níquel puro;
- Analisar o comportamento de insertos empregando materiais como cerâmicas à base de Al_2O_3 e CBN buscando condições de usinagem para maior taxa de remoção de material no níquel e suas ligas.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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.

ARUNACHALAN, R.; MANNAN, M. A. **Machinability of nickel-based high temperature alloys**. *Machining Science and Technology*, v.4 (1), 2000. p. 127-168.

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

ASM Specialty Handbook, *Nickel, Cobalt, and Their Alloys*, First Edition, ASM International, New York, USA, 2000.

BAHIA, A. L. H., **Estudo do torneamento da liga de níquel Pyromet 31v (SAE HEV8)**, p. 4-6, 2010.

BETTERIDGE, W., *Nickel and its alloys*, Ellis Horwood Limited, New York, 1984.

BETTERIDGE, W., SHAW, S.W.K., “Development of Superalloys – Overview”, *Materials Science and Technology*, v. 3, pp.682-694, 1987.

BRADLEY, E. F. Superalloy, a technical guide. Metals Park, ASM Internacional, 1988, pag. 280.

BRESCIANI, E.F. Seleção de metais não ferrosos. Campinas, Editora da UNICAMP, 1997, pag. 6.

BUDINSK, K. G.; BUDINSK, M. K. **Engineering materials**: properties and selection. 6. Ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. p.719.

BURIAN, E. C.; GAMA, R. P. **O estudo da usinagem em torneamento da superliga à base de níquel Pyromet 31v**, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

CÂMARA, M. A. **Influência do ângulo de posição sobre o fresamento frontal de níquel puro com insertos de metal duro.** Dissertação de Pós-Graduação, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

CHILDS, Thomas. **Metal machining theory and applications.** 1th ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000.

COPPINI, Nivaldo Lemos et al. **MEDIDA DA RESISTÊNCIA À USINAGEM EM AÇO AISI 316.** 2013.

CUNHA, E. A. et al. Influência do avanço na variação da rugosidade do alumínio. **Máquinas e Metais**, v. 41 (474), p. 40 -52, 2005.

DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L.; MARCONDES, F. C. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** São Paulo: Editora M.M., 1999, 242pp.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 3º ed. São Paulo: Artliber Editora, 2003.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 5 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 254 p.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., **Tecnologia da usinagem dos materiais.** São Paulo: 6ª. Ed. Art Líber Editora, 2008.

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

DONACHIE, M. J. Superalloys. In: *Metals Handbook - desk edition - ASM.* Ohio, Metals Park, 1985, pag. 6/5.

dos Santos, J. C. **Estudo do uso de ferramentas cerâmicas na usinagem de inconel 718,** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

EVERHART, J.L., *Engineering properties of nickel and nickel alloys*, Plenum Press, New York, 1971.

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

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, N° 7, May 2004b, p.311 – 316.

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

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, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1977.

FERRARESI, D **Fundamentos da Usinagem dos Metais** Ed. Edgard Blucher Ltda - 9º reimpressão – 1995

GAMA, R. P. **Estudo da formação do cavaco no torneamento de superligas de níquel**, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

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

KIRK, D. C. **Cutting Aerospace Material (Nickel, Cobalt and Titanium-Based Alloys)** Proc. Conf. Tools and Dies for Industry, Metals Society, London, England, 1976/1977. p.77-98.

KONIG, W.; GERSCHWILER, K. Machining nickel-based superalloys. **Manufacturing Engineering**. v. (3), p. 102 – 108, 1999.

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

KOVACEVIC, R.; CHERUKUTHOTA, C.; MAZURKIEWICZ, M. High pressure waterjet cooling lubrication to improve machining efficiency in milling. **J. Mach. Tools Manufact.** Vol. 35, No. 10, pp. 1459-1473, 1995

KUO.C.M. YANG, Y.T., BOR, H.Y., WEI, C.N., TAI, C.C., “Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy”, *Materials Science and Engineering A*, v. 510-511, pp.289-294, 2009.

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.; DINIZ, A. E. Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte. **Máquinas e Metais**. v. 37 (419), p. 134 – 151, 2000.

MACHADO, A. R; da SILVA, M. B. **Usinagem dos metais**. 4. ed. Uberlândia: UFU, 1999. 224p.

MEETHAM, G.W., VOORDE, M.H.V., *Materials for High Temperature Engineering Applications*, Springer, Germany, 2000.

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

MEI, P. R; SILVA, A. L. C. Aços e ligas especiais. Eletrometal S/A. Metais Especiais, 2ª edição, Sumaré, SP, 1988, pag.528.

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.

MUDD, G.M., “Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites”, *Ore Geology Reviews*, doi: 10.1016/j.oregeorev.2010.05.003, 2010.

NOVASKI, O. DÖRR, J. Usinagem sem refrigeração. **Máquinas e Metais**, v. 35 (398), p 18-27, 1999.

PATEL, S. J., “A Century of Discoveries, Inventors, and New Nickel Alloys”, *JOM*, v. 58, pp. 18-20, 2006.

PESQUISA EM FOCO: INVESTIGAÇÃO DA USINABILIDADE DE AÇOS E LIGAS NÃO-FERROSAS. Vol. 17, n.2, p. 53-59, 2009.
Disponível em < <http://ppg.revistas.uema.br/>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

REED, R.C., *The Superalloys: fundamentals and applications*, Cambridge, Cambridge University Press, 2006.

RIBEIRO, M. V.; BAHIA, A. L. H. **Study of the turning nickel alloy Pyromet® 31V (SAE HEV8)**. In: European Symposium on Superalloys and their Applications. Kreuth - Germany, May. 25-28, 2010, Proceedings in Cd-rom.

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.

SANTOS, J. A. B. O.; SALES, W. F.; SANTOS, S. C.; MACHADO, A. R.; da SILVA, M. B.; BONNEY, J.; EZUGWU, E. O. **Tribological evaluation of TiN and TiAlN coated PM-HSS gear cutter when machining 19MnCr5 steel**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. v.31 p. 629-637, Springer London. Artigo, 2007. 9 p.

SCHNEIDER Jr, G. **Principle of tungsten carbide engineering**. 2nd. ed. Southfield, MI, USA: Society of Carbide and Tool Engineers. American Society for Metals – ASM. 1989. 212 p.

SCHWEITZER, P.A., *Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and Media Corrosion of Metals*, Corrosion Engineering Handbook, Second Edition, CRC Press, USA, 2007.

SENAI/SP Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento- Santa Bárbara do Oeste-Fundação Romi Formação de Formadores, 2002.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. New York: Oxford University Press, 1984. 594p.

SOUZA, T. F. de. **Usinagem da liga de níquel Inconel 718 com pastilhas de cerâmica**, Trabalho de Graduação, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

THE NICKEL INSTITUTE, disponível em http://www.nidi.org/index.cfm/ci_id/16/la_id/1.htm. Acesso em 08 dez. 2007.

THEREZANI, D. F. **Avaliação de diferentes ferramentas no torneamento da liga Inconel 713C**, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2012.

THOMAS, A., EL-WAHABI, M., CABRERA, J.M., PRADO, J.M., “High temperature deformation of Inconel 718”, *Journal of Material Processing Technology*, v. 177, pp. 469-472, 2006.

Tooling Technology II, 1st ed. Mitsubishi Materials Corporation, 2006. 290p.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 2. ed. London: Butterworths, 1984. 245p.

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

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K., **Metal Cutting**. 4.ed. Butterworth Heinemann, 446p, 2000.

VALLE, L. C. M. **Efeitos da solubilização e do envelhecimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas da superliga Inconel 718**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2010.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984. 567p.

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