

JULIO CESAR DOS SANTOS

ESTUDO DO USO DE FERRAMENTAS CERÂMICAS
NA USINAGEM DE INCONEL 718.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá
2010

S237e Santos, Julio Cesar dos
Estudo do uso de ferramentas cerâmicas na usinagem de inonel 718 /
Julio Cesar dos Santos – Guaratinguetá : [s.n], 2010.
65 f. : il.
Bibliografia: f. 61-64

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá, 2011.
Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

1. Usinagem I. Título

CDU 621.9

JULIO CESAR DOS SANTOS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MARCOS VALERIO RIBEIRO
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. HUMBERTO LOPES RODRIGUES
Unesp-Feg



Prof. Dr. JOSE VITOR CÂNDIDO DE SOUZA
INPE / SJC

DADOS CURRICULARES

JULIO CESAR DOS SANTOS

| | |
|------------|---|
| NASCIMENTO | 07.02.1966 – TAUBATÉ/SP |
| FILIAÇÃO | Joaquim Albino dos Santos Aidesulema Pirola dos Santos |
| 1980/1982 | Curso de Técnico Técnico em Mecânica – UNITAU |
| 1983/1987 | Curso de Graduação Engenharia Mecânica - Universidade de Taubaté UNITAU |
| 2006/2008 | Curso de Graduação Pedagogia – UNISUL |

Dedico este trabalho, a meus pais Juca e Aide, meu irmão Douglas, minha querida esposa Waldineia e meus amados filhos Wagner, Henrique e Giovanna que com seu amor, afeto e carinho sempre me deram força para continuar.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a *Deus* que sempre iluminou meu caminho.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* que sempre me incentivou, com sabedoria e paciência, os caminhos e principalmente os atalhos a serem percorridos.

aos meus amados pais *Aide e Juca* que apesar de nos ter deixado tão cedo, ainda são parte presente em minha vida, sempre me colocando no caminho certo em todos os momentos da minha vida.

a meu querido irmão *Prof. Msc Douglas* que me incentivou a seguir esta carreira que tanto amo.

a minha esposa *Waldineia* amor da minha vida que soube me incentivar e jamais desistir nos momentos de dificultados..

aos meus filhos *Wagner, Henrique e Giovanna* obrigado por existirem, minha vida não teria sentido sem vocês.

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

ao amigo *Prof. Msc Elias Alves da Cunha*, que com sua inteligência e sabedoria prestou imensa ajuda com os estudos ensaios, e elaboração desta dissertação.

ao amigo *Prof. Dr Oliveira M. Macedo e Silva* que sempre me aconselhou no decorrer do trabalho.

aos amigos *Professores do SENAI. Nikolas, Cleiton, Paulo de Tarso e, Marco Xavier* que muito me ajudaram nos ensaios e testes.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

- CTA – através de seu grupo de pesquisadores que cedeu a ferramenta de corte desenvolvidas em seus laboratórios, utilizada neste trabalho.
- SECO TOOLS – Com as doações dos suportes utilizados nos estudos.
- ESCOLA SENAI “FELIX GUIARD” – Com a disponibilização do laboratório de Metalografia e oficina de usinagem para a execução dos ensaios do trabalho.
- VILLARES METALS – pela doação do INCONEL 718

“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota”

Franklin D. Roosevelt

DOS SANTOS, J. C. **Estudo do uso de ferramentas cerâmicas na usinagem de inconel 718**. 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

RESUMO

A usinagem de superligas de níquel e ligas resistentes a altas temperaturas como o inconel 718 sempre representou uma tarefa difícil no chão-de-fábrica. Mas as aplicações industriais desses materiais passaram por rápida evolução nos últimos anos. Na indústria aeroespacial, o crescimento da popularidade destes materiais tem sido evidenciado na forma de palhetas de turbina, peças de compressor, suportes e elementos de conjuntos para aviação. Devido a suas propriedades e aos benefícios que trazem à indústria, o uso destes materiais se expandiu aos setores automotivo, médico, químico, indústria de miniaturas e outras indústrias. Para as superligas e ligas resistentes a altas temperaturas estima-se que a dificuldade na usinagem vai da combinação de forças de corte relativamente altas, combinadas com altas temperaturas que se desenvolvem durante o processo de usinagem. Estes níveis de calor podem causar a deterioração da aresta de corte, com quebras ou deformações. Os tipos comuns de desgaste de ferramenta para estes materiais são primeiramente reconhecidos como desgaste do flanco, entalhes e formação de arestas postizas. O presente trabalho consiste no torneamento cilíndrico externo da liga a base de níquel inconel 718, utilizando ferramenta cerâmica (Si_3N_4) visando à otimização da usinagem desta liga e buscando proporcionar aumentos reais de produtividade sem a necessidade de investimentos em novos meios de produção. Os ensaios de usinagem foram realizados em um corpo de prova da liga, considerando os parâmetros de usinagem: velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanços próprios de acabamento. Os ensaios foram realizados em um torno CNC e ferramentas com pastilha de cerâmica à base de Nitreto de Silício Si_3N_4 . Após cada etapa do torneamento foram realizadas as medidas do comprimento de corte, do desgaste das ferramentas e a rugosidade das peças (avaliada em cada fase do processo), com o auxílio de um rugosímetro portátil. Por meio de microscopia óptica, foi possível observar o desgaste das ferramentas de corte para cada condição avaliada.

Analisando-se os resultados referentes ao desgaste da ferramenta em função do seu comprimento de corte foi possível perceber um melhor desempenho da ferramenta na condição 200 m/min, avanço de 0,5 mm e profundidade de corte 0,5 mm.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem, Torneamento, Superligas de Níquel, Inconel, Ferramentas cerâmicas, desgaste.

DOS SANTOS, J. C. **Study of turning machining of the superalloys INCONEL 718**. 2010. __f. Dissertation (Master Science in mechanical engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista-UNESP, Guaratinguetá, 2010.

ABSTRACT

The nickel superalloys and resistant alloys machining to discharges temperatures as the inconel 718 always represented a difficult task in the job-shop. But the industrial applications of those materials went by fast evolution in the last years. In the aerospace industry, the growth of the popularity of these materials has been evidenced in the form of turbine blades, compressor parts, holders and elements of parts for aviation. Due to its properties and to the benefits that bring to the industry, the use of these materials expanded to the automotive sector, medical, chemical, in the industry of miniatures and other industries. For the superalloys and resistant alloys to high temperatures is considered that the difficulty in the machining is going relatively of the combination of high cutting forces, combined with high temperatures that grow during the machining process. These levels of heat can cause to deterioration of the cutting edge, with breaks or deformations. The types common of tool wear for these materials are recognized firstly as flank wear, incisions and formation of build up edge. The present work seeks to develop study of the machining for external cylindrical turning of the nickel base alloy inconel 718, using ceramic tool (Si₃N₄) seeking to the optimization of machining of this alloy and looking for to provide real increases of productivity without the need of investments in new production means. The machining tests were accomplished in a sample of the alloy, considering the machining parameters: cutting speed, cutting depth and own progresses of finish. The rehearsals were accomplished in a lathe CNC and tools with ceramic insert of Silicon Nitride. After each stage of the turning the measures of the cutting length were accomplished, of the tool wear and the roughness of the pieces (appraised in each phase of the process), with the aid of a portable roughness meter. Through optical microscopy, it was possible to observe the wear of the cutting tools for each appraised condition.

KEYWORDS: Machining, Turning, Nickel Superalloys, Inconel alloy 718, Ceramic tool, wear.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 – Divisão dos custos de produção. | 20 |
| FIGURA 2 – Materiais de corte mais comuns para usinagem de ligas metálicas..... | 25 |
| FIGURA 3 – Classificação dos materiais de corte mais comuns para usinagem de ligas metálicas pela dureza e tenacidade. | 26 |
| FIGURA 4 – Composição Química Nominal (% peso) e densidade – liga forjada a base de níquel. adaptado de (Ezugwu et al, 1999). | 29 |
| FIGURA 5 – Variação do tempo de envelhecimento para várias temperaturas, adaptada de Shuangqun et al., (2004)..... | 31 |
| FIGURA 6 – Composição dos elementos de liga e o estado da estrutura determinam a usinabilidade de uma liga (WITTING,2002)..... | 32 |
| FIGURA 7 – Cargas geradas na aresta de corte: (a) usinagem de aço; (b) usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas (superligas), (adaptado de Witting, 2002)..... | 33 |
| FIGURA 8 Distribuição da temperatura quando se usina titânio e aço (Ezugwu e Wang, 1997) | 34 |
| FIGURA 9 – Forno utilizado para solubilização (980°C / 3h) do INCONEL 718.... | 42 |
| FIGURA 10 – Forno utilizado para precipitação (720°C / 8h) do INCONEL 718.... | 42 |
| FIGURA 11 – Microestrutura da liga INCONEL 718 aumento 1000x..... | 43 |
| FIGURA 12 – Microestrutura da liga INCONEL 718 após solubilização e envelhecimento aumento 1000x..... | 44 |
| FIGURA 13 – Representação dos corpos-de-prova..... | 44 |
| FIGURA 14 – Foto das ferramenta utilizada nos ensaios de torneamento..... | 45 |
| FIGURA 15 Estereoscópio Olympus SZ-TZ Rugosímetro (Senai Taubaté)..... | 45 |
| FIGURA 16 – Duromêtro digital (Senai Taubaté)..... | 46 |
| FIGURA 17 – Rugosímetro (Senai Taubaté)..... | 46 |
| FIGURA 18 – Torno CNC (Senai Taubaté)..... | 47 |
| FIGURA 19 – Torneamento cilíndrico externo CNC..... | 48 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 20 – Desgaste de flanco da ferramenta “Vb” x Comprimento de corte “Lc” | 50 |
| FIGURA 21 – Curva de vida da ferramenta..... | 51 |
| FIGURA 22 – Influência do avanço na vida da ferramenta..... | 52 |
| FIGURA 23 – Influência da profundidade de corte na vida da ferramenta.. | 53 |
| FIGURA 24 – Rugosidades “Ra” | 53 |
| FIGURA 25 – Rugosidades “Ry” | 54 |
| FIGURA 26 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para Vc=60 m/min..... | 55 |
| FIGURA 27 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para Vc=85 m/min..... | 56 |
| FIGURA 28 - fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para Vc=110 m/min..... | 56 |
| FIGURA 29 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para Vc=150 m/min..... | 57 |
| FIGURA 30 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para Vc=200 m/min..... | 57 |
| FIGURA 31 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para Vc=300 m/min..... | 58 |
| FIGURA 32 – fotos dos cavacos típicos obtidos nos ensaios com INCONEL 718... | 59 |

LISTA DE TABELAS E QUADROS

| | |
|--|----|
| TABELA 1 – Composição química nominal da liga INCONEL 718..... | 41 |
| TABELA 2 – Composição química da liga INCONEL 718..... | 41 |
| TABELA 3 – Parâmetros de corte usados nos ensaios | 49 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

| | |
|--------------------------------|------------------------------------|
| CNC | - Comando Numérico Computadorizado |
| f | - Avanço |
| N | - Nitrogênio |
| Si | - Silício |
| SP | - Estado de São Paulo |
| vc | - Velocidade de corte |
| (n) | - Numero de ordem da utilização |
| ® | - Registro |
| APC | - Aresta postiça de corte |
| ap | - Profundidade de corte |
| Ni | - Níquel |
| Ti | - Titânio |
| Al | - Alumínio |
| W | - Tungstênio |
| Ta | - Tântalo |
| Co | - Cobalto |
| Ra | - Rugosidade média |
| Ry | - Rugosidade máxima |
| Lc | - Comprimento de corte |
| Vm _{xp} | - Velocidade de máxima produção |
| MQF | - Mínima quantidade de fluido |
| CFC | - Cúbico de faces centradas |
| TiN | - Nitreto de titânio |
| TiC | - Carbetos de titânio |
| Al ₂ O ₃ | - Alumina |
| Si ₃ N ₄ | - Nitreto de silício |
| TiAlN | - Nitreto de titânio e alumínio |
| PVD | - Physical Vapor Deposition |
| PCD | - Polycrystalline Diamond |
| CBN | - Cubic Boron Nitride |
| HSM | - High Speed Machining |
| HRC | - Hardness Rockwell C |
| Vb | - Desgaste de flanco |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 - Objetivos do trabalho..... | 18 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1 Usinagem | 19 |
| 2.2 Usinagem a seco..... | 21 |
| 2.3 Materiais das ferramentas de corte | 22 |
| 2.4 Ferramenta de cerâmica a base de Nitreto de Silício | 24 |
| 2.5 Propriedades das ferramentas de corte | 24 |
| 2.6 Características das ligas a base de Níquel | 26 |
| 2.7 Usinagem das ligas a base de Níquel | 31 |
| 2.8 Características da liga INCONEL 718 | 35 |
| 2.9 Dificuldades na usinagem das super ligas a base de níquel | 36 |
| 3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS | 41 |
| 3.1 Material..... | 41 |
| 3.1.1 Tratamento térmico do material | 42 |
| 3.1.2 Corpos de prova..... | 44 |
| 3.1.3 Ferramenta de corte | 45 |
| 3.2 Equipamentos | 45 |
| 3.2.1 Estereoscópio..... | 45 |
| 3.2.2 Duromêtro digital | 46 |
| 3.2.3 Rugosímetro | 46 |
| 3.2.4 Torno CNC | 47 |
| 4 METODOLOGIA | 48 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 50 |
| 6 CONCLUSÕES | 60 |
| REFERÊNCIAS | 61 |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 65 |

1. INTRODUÇÃO:

O desenvolvimento dos materiais metálicos está intimamente associado aos avanços tecnológicos. A necessidade de materiais mais resistentes ao desgaste, mais tenazes, com maior resistência à corrosão e oxidação, tem sido o impulso para a pesquisa de muitos materiais, com essas características e propriedades. Originalmente, para esses tipos de aplicações, são utilizados os aços inoxidáveis e aços ligados, porém a exigência de temperaturas de operação cada vez maiores, maiores potências e motores mais eficientes, impulsionaram o desenvolvimento das ligas refratárias ou “superligas”.

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

As ligas de níquel possuem uma composição química com elevado teor de elementos de liga, os quais são responsáveis por suas propriedades mecânicas e térmicas, porém estas características e a afinidade para reagir com o material da ferramenta, dificultam demasiadamente sua usinagem, podendo ser classificada como um material de “difícil corte” levando a ocorrência de alguns problemas durante o processo. Uma usinagem com a geração de um bom acabamento superficial tem sido um desafio para engenheiros na prática. (THAKUR, 2009 et. al)

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

De acordo com Ezugwu *et al* (2003), genericamente as principais dificuldades encontradas na usinagem das super ligas de níquel, podem ser resumidas como:

- elevada resistência e dureza à quente, causando deformação na ferramenta durante a usinagem;
- a matriz austenítica da liga de níquel promove um rápido endurecimento, fator de maiores causas do desgaste severo da ferramenta, sofrida durante o processo;

- presenças de carbeto duros e abrasivos na microestrutura destas ligas, levam a excessivos desgastes por abrasão, podendo levar a ferramenta à falha prematura;
- a baixa condutividade térmica destas ligas leva à concentração da temperatura de corte aproximadamente 1000 °C na ferramenta, causando elevados gradientes térmicos; e
- a soldabilidade do material da peça na aresta de corte da ferramenta, forma uma aresta postiça de corte, comprometendo a integridade superficial da peça, assim como a ferramenta de corte.

É importante salientar que a alteração na superfície, tal como a tensão residual, induzida durante a usinagem, pode resultar em distorções desfavoráveis à peça. Por essa razão, cuidados especiais devem ser tomados para assegurar a vida da ferramenta, a integridade superficial da peça usinada e o controle dos principais parâmetros de usinagem (SILVA *et. al*, 2001), para se obter condições de usinagem satisfatórias, é necessário que se tenha um bom conhecimento da microestrutura dos materiais envolvidos, dos efeitos sobre o comportamento das ferramentas de corte e sobre a eficiência dos processos de usinagem empregados (VIGNEAU, 1997).

A superliga INCONEL 718 é uma das mais importantes ligas à base de níquel hoje utilizada, têm encontrado seu nicho na indústria aeronáutica, na indústria automobilística, marinha, na produção de turbinas a gás e turbinas a vapor, em usinas de energia, agora também em veículos espaciais, na engenharia de foguetes, aviões experimentais, reatores nucleares, indústrias petroquímicas, aplicações médicas, e equipamentos de controle de poluição e em muitas outras aplicações. Sua vasta utilização nestas áreas deve-se principalmente ao seu desempenho em altas temperaturas, que é dado por algumas de suas características intrínsecas, como: alta resistência mecânica em temperaturas elevadas, alta resistência à fluência, alta resistência à fadiga, boa resistência à corrosão e baixa condutividade térmica.

1.1 - Objetivos do trabalho

Os principais objetivos do presente trabalho são:

- comportamento em usinagem, especificamente o torneamento, da liga à base de níquel Inconel 718 com ferramentas a base Si_3N_4 ;
- relação entre rugosidade (R_a e R_y), desgaste de flanco (VB) e o comprimento de corte “Lc”, em função dos parâmetros de corte;
- avaliação do aspecto do desgaste das ferramentas de corte;
- análise da forma do cavaco removido com relação à variação dos parâmetros de corte.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Usinagem

Uma definição simples de usinagem pode ser entendida como sendo um processo de fabricação com remoção de cavaco, conferindo à peça a forma, ou as dimensões ou acabamento necessários, baseado no movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça. Por cavaco entende-se como sendo uma porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por possuir forma geométrica irregular (DINIZ, *et al* 2008).

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10 % da produção de metais e empregando milhões de pessoas. Apesar de toda essa popularidade, trata-se de um processo ainda bastante imprevisível. A usinagem possui ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático, mas envolvendo um número bastante grande de variáveis, tornando muito difícil fazer uma previsão do que ocorre durante o andamento do processo. Assim, se torna necessário para um aumento da performance das operações de usinagem, através de estudos de vida da ferramenta, forças de corte, potência consumida e superfície final para uma melhoria da performance econômica das operações de usinagem (MACHADO, *et al* 2009).

A evolução dos materiais de um modo geral tem demandado muito dos processos de fabricação, dentre eles os de usinagem. O surgimento de novos materiais e coberturas para ferramentas de corte vêm como resposta a esse desafio, pelo lado dos fabricantes. Os fabricantes de máquinas por sua vez acompanham essa evolução com máquinas cada vez mais rápidas e eficientes, assim como há atualmente a disponibilidade de programas CAD/CAM. Materiais para ferramentas de corte, como o diamante sintético policristalino (PCD), nitreto cúbico de boro (CBN) e as ferramentas cerâmicas abriram novas possibilidades de usinagem. Com essa evolução, surgiu recentemente a Usinagem a Altas Velocidades (HSC), que utiliza velocidades de corte bem acima das anteriormente utilizadas (MAY, 1995).

As máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) tiveram como objetivo inicial solucionar a usinagem de peças de grande complexidade e,

posteriormente, vieram auxiliar na redução de tempos improdutivos, ou seja, no posicionamento e retirada da ferramenta. Contudo, a utilização destas máquinas só se torna economicamente viável quando for garantido o emprego eficiente destas máquinas e ferramentas durante o processo de usinagem, ou seja, é necessário extrair das mesmas o máximo rendimento possível para garantir o retorno dos investimentos efetuados. A eficiência do processo de usinagem depende da utilização de dados de corte otimizados, atualizados e adequados às condições reais de trabalho.

Pires *et al* (1996) realizaram um trabalho em uma fábrica de usinagem média e pesada no qual verificaram, em um levantamento inicial, que cerca de 68 % das arestas de pastilhas de torneamento utilizadas eram trocadas antes (e às vezes bem antes) do momento adequado. Após treinamento e conscientização dos funcionários esta percentagem caiu 16,6%.

Os custos envolvidos no processo de usinagem são divididos entre ferramentas, equipamento, fluidos de corte (quando utilizado) entre outros. A Figura 1 mostra a parcela do custo de usinagem que cabe a cada parte.

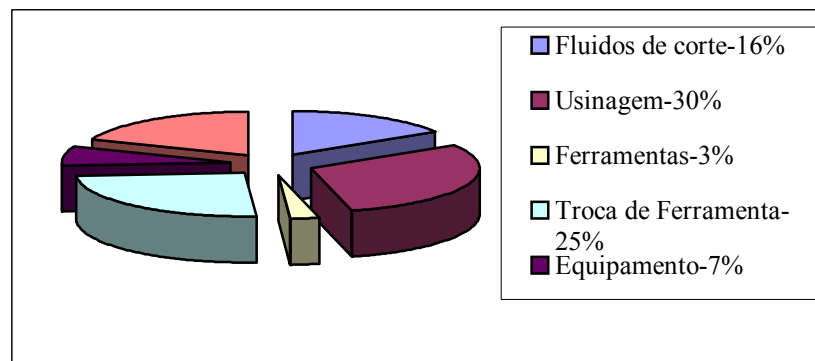


Figura 1 - Divisão dos custos de produção [Kopac, 1998].

Apesar do custo com ferramentas ser apenas 3 % do custo total de produção, indiretamente a ferramenta tem grande influência nos custos de usinagem. Dentre estas ferramentas destacam-se as ferramentas cerâmicas como sendo um seguimento muito promissor na área de ferramentas de corte. A demanda mundial para aplicação de insertos cerâmicos gira em torno de 5 % do volume total de insertos.

Os processos de fabricação por usinagem mais conhecidos são: torneamento, fresamento, furação e retificação. A seguir é apresentado com mais detalhe o processo de fabricação por torneamento.

2.2 Usinagem a seco :

Uma das maneiras de se minimizar os efeitos dos tempos improdutivos causados pelos desgastes das ferramentas, pode ser alcançado pela introdução de sistemas de lubrificação e refrigeração eficientes no processo. Porém, na última década, as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerante e/ou lubrificante na produção metal mecânica. Os fatores importantes que justificaram esse procedimento incluem os custos operacionais da produção, as questões ecológicas, as exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano (MACHADO, *et al* 2000). Segundo Novaski, (1999), os gastos relacionados com a ferramenta representam apenas de 2 a 4% contra 17% em refrigeração. Adicionalmente, na usinagem com refrigeração, ocorre a necessidade de se separar os cavacos, o que ocasiona mais desembolso.

De acordo com Silva (2001), Mason (2001) e Heisel (1998), apesar das insistentes tentativas de eliminar completamente os fluidos refrigerantes, em muitos casos a refrigeração ainda é essencial para se obter vidas econômicas de ferramentas e as qualidades superficiais requeridas. Isto é particularmente válido quando há exigência de tolerâncias estreitas e alta precisão dimensional e de forma ou quando se trata de usinagem de materiais críticos (de corte difícil), como no caso das superligas.

Segundo Faria (2007) 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 restrito, devido à sua evaporação prematura ocasionado pelas altas temperaturas alcançadas nesta região. Esta evaporação não permite o acesso do fluido na interface cavaco-ferramenta e/ou ferramenta-peça. Devido a isto, o efeito lubrificante se destaca pela formação de um filme de óleo que reduz significativamente o atrito, reduzindo com isto a geração de calor e conseqüentemente, diminuindo a temperatura da região do corte. Segundo Ezugwu *et al.* (2003), os resultados para o sistema (MQF) são encorajadores, mas o mesmo alerta para a necessidade de mais pesquisas com o objetivo de se formar um amplo entendimento sobre o potencial desta nova tecnologia.

Muitos trabalhos têm sido publicados nos últimos anos em relação à necessidade de restringir, na medida do possível, o uso dos fluidos de corte em razão do alto custo operacional, problemas ambientais, danos à saúde humana e exigência legal a respeito (MIRANDA, 1997; MOREIRA, 2002). A proteção ao meio ambiente assume cada vez maior importância nas técnicas de fabricação. Por exemplo, os fluidos de corte necessários para a usinagem convencional recebem aditivos como cloro, enxofre e fósforo nocivos ao meio ambiente.

Para atender as normas da série ISO 14000 (Gerenciamento Ambiental), isto é, controle rigoroso da produção sem causar danos ao meio ambiente e garantia de segurança, é necessário o aumento nos custos podendo chegar a 16% dos custos da produção (NAKAGAWA, 2000). Um estudo conduzido pela Daimler Chrysler AG afirma que estes custos podem chegar a 17% (NOVASKI, 1999). Segundo Narutaki, *et al.*, (1997) as vantagens da usinagem a seco são custo menor, meio ambiente saudável, melhor segurança do trabalhador, proteção contra efeitos químicos, isenção de sistema de bombeamento, isenção de coleta e filtração, não necessidade de armazenamento, etc.

São cada vez mais freqüentes os argumentos a favor da usinagem de materiais sem uso de fluido de corte, tendo conseqüentemente crescido o interesse pelo torneamento sem refrigeração através do desenvolvimento de modernas pastilhas, permitido o torneamento de materiais com alta dureza, com alta desempenho, sem o uso de fluidos de corte (SILVA, 2000).

2.3 Materiais das Ferramentas de Corte, segundo CHRISTOPHER (1994).

- Aços rápidos: a composição química destes aços incorpora C em teores mais altos que os dos aços comuns, e Cr, Mo, W, V, Co e outros elementos com o propósito de formar carbeto que aumentam a resistência ao desgaste, para proporcionar resistência ao revenimento e para melhorar as propriedades mecânicas em altas temperaturas. Podem ser elaborados pelo processo convencional de lingotamento, laminação ou forjamento, e pelo processo de sinterização, que assegura propriedades mecânicas mais isotrópicas.

- Metal duro: elaborado pela sinterização de carbetos em pó (W, Ta, Ti, e outros) com um ligante metálico (normalmente Co). Pelo controle do tamanho do grão e da proporção/ composição química dos carbetos, são obtidas diferentes classes de metal duro apropriadas a usinagem de aços, ferros fundidos, aços inoxidáveis, aços refratários, não metálicos, compostos, etc.
- Metal duro revestido: os revestimentos são aplicados habitualmente pelos processos de PVD (Deposição física de vapor), ou CVD (Deposição química de vapor), em camadas simples ou múltiplas de Al_2O_3 , TiN, TiC e diamante, e outros compostos; aumentando a resistência ao desgaste.
- Cermets: produzidos pela sinterização de óxidos e outros compostos (TiC, TiN, TaC), ligados com Ni (ou também Co e Mo) como ligante metálico. O metal duro pode ser definido como um cermet, aonde o WC é o constituinte cerâmico. São efetivos para usinagem de aços, resistentes ao desgaste e à cratera durante a formação do cavaco contínuo. Os cermets são mais populares no Japão, chegando a representar na década de 90, 30% das vendas de ferramenta de corte.
- Cerâmicas: produzidas por sinterização de pós cerâmicos refinados em grande variedade de composições químicas, as cerâmicas para usinagem em uso atualmente são baseadas em alumina (Al_2O_3) ou em variedades de nitreto de silício (Si_3N_4). Também são utilizadas cerâmicas compostas (reforçadas com fibras cerâmicas), e cerâmicas revestidas com revestimentos cerâmicos.
- Diamante policristalino: sintetizado a grandes pressões e temperaturas, é utilizado em ferramentas de corte e abrasivos. Encontra campo de aplicação na usinagem de ligas de alumínio silício e diferentes tipos de materiais compostos. A orientação randômica do PCD constitui uma melhoria com relação ao diamante natural, devido à possível presença neste, de planos de clivagem.
- Nitreto Cúbico de Boro (CBN): sintetizados a grandes pressões e temperaturas, são utilizados como ferramentas de corte e abrasivos. Utilizados na usinagem de aços temperados, ferros fundidos duros, e superligas. O CBN pode ser usado para tornear ligas de níquel, mas dificilmente compete em custo neste campo contra os insertos de alumina com whiskers (relação de custo 3:1). Outra aplicação é a de tornear ligas ferrosas duras (65 a 68 HRC). Este tipo de peça é

habitualmente retificado e não usinado. A taxa de remoção da usinagem é aproximadamente 10 vezes maior que a de retificação.

2.4 Ferramentas de Cerâmicas a base de Nitreto de Silício.

Segundo Wertheim (1986), apud Souza (2005) essa classe de ferramentas de corte é mais recente, surgiu no mercado nos anos 80 e foram desenvolvidas para possibilitar a fabricação de ferramentas com melhores propriedades em relação às anteriores, maior tenacidade à fratura e menos frágeis do que os óxidos e mantendo sua boa resistência aos choques térmicos. O nitreto de silício mantém estável sua dureza até a temperatura de 1200 °C, sendo importante nos processos de usinagem com altas velocidades de corte e a seco, onde as temperaturas podem chegar a 1200 °C e assim reduzir a resistência dos metais (MOSTAGHACI, 1996). Um dos produtos desse grupo são os SiAlONs, nome que tem origem nos símbolos dos elementos que o formam, que são, Si, Al, O e N. Esse material tem mostrado excelentes resultados na usinagem de superligas de níquel, ferros fundidos e aços endurecidos. Suas características principais são um pouco diferentes do Si_3N_4 puro, pois a presença de oxigênio faz com que seu comportamento seja um intermediário entre as cerâmicas covalentes e aquelas à base de óxidos. Os SiAlONs são ótimos em termos de dureza a quente, resistência ao choque térmico e são bons com relação à tenacidade, porém são deficitários com relação à estabilidade química (JACK, 1986).

Os compostos carbono-carbonos, ferros fundidos e as ligas a base de níquel são os materiais mais indicados para serem usinados com ferramentas à base de Si_3N_4 . As taxas de remoção de material com as ferramentas de Si_3N_4 são muito superiores às possíveis com ferramentas convencionais. Esse tipo de ferramenta é utilizado na usinagem desses materiais, com alta velocidade de corte, nas indústrias automobilística, aeronáutica, aeroespacial e outras (LANNA, 2004).

2.5 Propriedades das ferramentas de corte.

Na Figura 2, adaptada de Mehrotra, (1998), os materiais de corte mais comuns para usinagem de ligas metálicas, são classificados (qualitativamente) pela sua

resistência à deformação térmica (nas ordenadas) e pela sua tenacidade à fratura (nas abscissas).

Os campos desenhados para cada material representam sua resistência relativa à deformação a quente e à fratura respectivamente.

Durante a usinagem, a principal variável com influência sobre a temperatura é a velocidade de corte (SHAW, 1994); portanto quanto maior a velocidade, maior deverá ser a resistência à deformação a quente do material utilizado para assegurar uma vida conveniente a pastilha.

O aumento nominal das variáveis mencionadas nas abscissas (avanço, profundidade de corte, choque térmico e mecânico), provoca solicitações mecânicas crescentes nas pastilhas. Com isto, o material utilizado para confeccionar os mesmos deve apresentar uma resistência à fratura crescente.

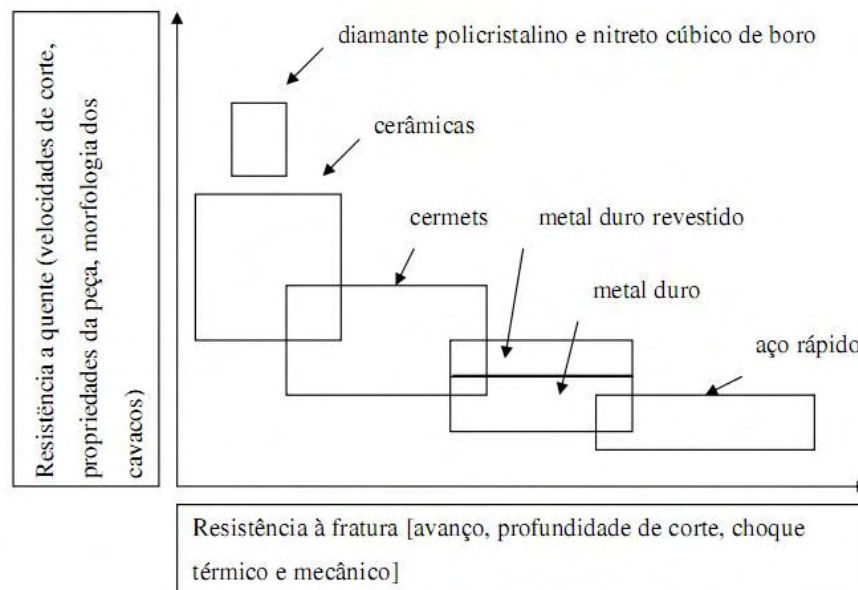


Figura 2 - Materiais de corte mais comuns para usinagem de ligas metálicas.

O processo de usinagem, que utiliza como ferramenta um material mais duro que o da peça, é a operação mais comum entre os processos de fabricação existentes. Baseado no princípio da dureza relativa é óbvio que o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuiu para o aparecimento de materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem. Neste processo, as ferramentas de corte exercem importância

fundamental, tanto no aspecto econômico quanto no resultado final da peça (tolerância dimensional e acabamento superficial) (DINIZ, 2008).

Como dureza e tenacidade são propriedades antagônicas, em uma análise superficial, alta dureza significa baixa tenacidade e assim se torna necessário um balanço entre estas duas propriedades dos materiais de ferramentas, o que se tornou um grande desafio aos fabricantes de ferramentas. Por isso, hoje encontramos no mercado uma infinidade destas ferramentas com variados valores de tenacidade e dureza. Essa variedade de ferramentas foi obtida através de diferentes composições químicas, tamanhos de grãos, um maior controle nos processos de fabricação e tratamento térmico destas ferramentas. Na Figura 3, é mostrada a relação entre dureza e tenacidade para os principais materiais de ferramentas de corte (MOSTAGHACI, 1996).

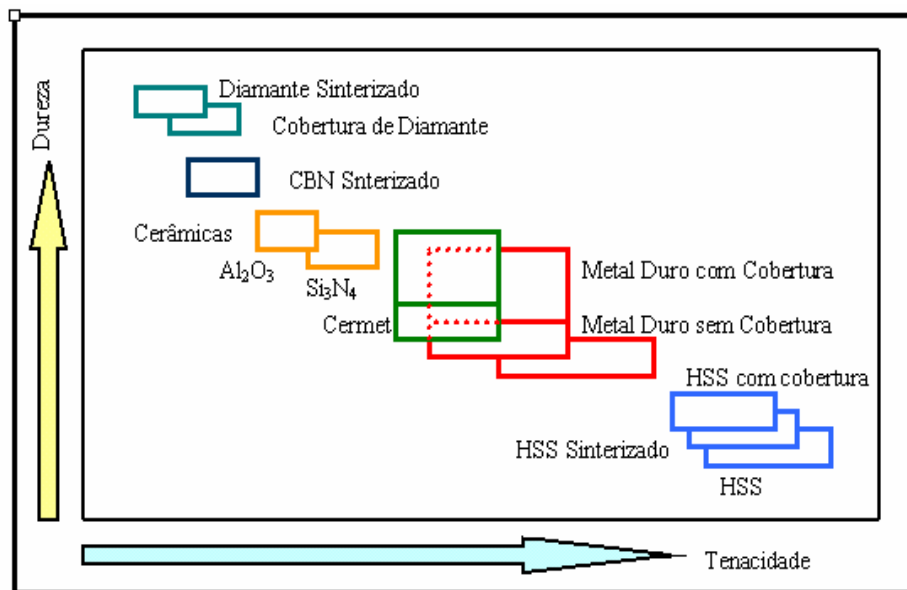


Figura 3 – Classificação dos materiais de corte mais comuns para usinagem de ligas metálicas pela dureza e tenacidade adaptada de (MITSUBISHI, 2001).

2.6 Características das ligas a base de Níquel

Segundo Mendes (2005) dentre os materiais projetados para funcionar por longos períodos em atmosferas altamente oxidantes e corrosivas, submetidos a temperaturas acima de 650°C, estão as chamadas superligas de níquel, que demandam o segundo maior consumo de nióbio depois da indústria do aço.

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

Segundo Vilella (1988), uma das maneiras de otimizar a produção diária de peças é diminuir os tempos de usinagem. Uma análise do processo permite a redução destes tempos, através da escolha correta da ferramenta, utilização de avanços e profundidade de corte coerentes com a capacidade da máquina-ferramenta, utilização adequada do fluido de corte, etc. O aumento da velocidade de corte também permite obter uma maior taxa de remoção de cavaco e, conseqüentemente, reduzir o tempo de usinagem. Entretanto, o aumento da velocidade de corte tem efeito negativo sobre a vida da ferramenta (principalmente no torneamento de superligas), o que pode provocar o aumento do tempo de fabricação, devido à necessidade de trocas mais freqüentes de ferramentas. Segundo Diniz (2008) a velocidade de máxima produção ($V_{m\text{xp}}$) é a velocidade de corte para a qual a soma dos tempos de troca de ferramenta e de usinagem é mínimo, ou seja, é a velocidade na qual ocorre equilíbrio entre os efeitos positivos (maior taxa de remoção de cavaco) e negativos (maior freqüência de troca de ferramentas).

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

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

Ligas a base de níquel constituem em torno de 45 a 50 % do total do material usado

na fabricação de um motor aeronáutico, devido sua excepcional resistência à fadiga e a oxidação, em alta temperatura, acima de (650 °C). As ligas a base de níquel são manufaturadas de forjados (barras, chapas, grandes forjados) e fundidos. A quantidade de ligas a base de níquel forjado atualmente, foram desenvolvidas com 80 % de níquel e 20 % de cromo. Sua primeira aplicação, além das resistências elétricas, foi em paletas de turbinas, no início dos anos 40, por sua admirável resistência à oxidação e resistência mecânica. Essas características da liga a base de níquel, foram melhoradas consideravelmente, pela adição de uma pequena quantidade de titânio e alumínio em sua composição. A primeira liga a base de níquel nesta concepção foi a Nimonic 80, a qual foi posteriormente modificada para a Nimonic 80A. Mais tarde foi estabelecido que com a adição de 20 % de cobalto resultaria em uma liga, a Nimonic 90, a qual suporta em torno de 50 °C a mais em temperatura que a Nimonic 80A.

Com o crescimento das demandas solicitadas nos projetos de turbinas mais eficientes em altas temperaturas, foram aumentadas na composição da Nimonic 90, as quantidades de titânio e alumínio, e com o acréscimo do molibdênio, a liga foi conduzida para o desenvolvimento das Nimonic 105, 115 etc. Waspaloy e M-252 são duas importantes ligas a base de níquel forjadas, as quais foram desenvolvidas, respectivamente pela Pratt and Whitney e General Electric Company no fim dos anos 40 (EZUGWU, *et al* 2003).

Segundo Ezugwu *et al.* (1999), os elementos de liga e suas proporções percentuais e a microestrutura das ligas a base de níquel, são caracterizadas e reforçadas por alguns elementos que tendem a melhorar sua microestrutura ou fase. Na Figura 4 pode-se observar as ligas à base de níquel empregadas com seus elementos de liga.

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

Figura 4 - Composição Química Nominal (% peso) e densidade – liga forjada a base de níquel. adaptado de (Ezugwu et al, 1999).

As ligas a base de níquel possuem uma matriz constituída de uma fase austenítica, contínua, cúbica de face centrada (CFC) chamada de fase gama (γ'), que usualmente contém um alto teor de elementos em solução como o cobalto, molibdênio e tungstênio. Alumínio e titânio são adicionados em iguais proporções para precipitar um elevado volume da fase primária (γ'), que invariavelmente precipitam-se coerentemente com a matriz austenítica.

De acordo com Santos (1993) o aparecimento de nitretos e carbonitretos deve-se principalmente pela dificuldade na eliminação do nitrogênio durante a elaboração da liga. Os nitretos e carbonitretos formam-se durante a solidificação e não se alteram durante as etapas posteriores de processamento. Apesar da baixa fração volumétrica do nitrogênio, ocorre a formação do nitreto tipo TiN devido à forte afinidade do nitrogênio pelo titânio. Pouca informação está disponível com relação ao aspecto deletério da fase no material (tanto durante o processamento quanto no uso geral da liga).

- **Carbetos do tipo MC, M₆C e M₂₃C₆**

Estes carbetos podem precipitar-se durante a solidificação, processamento ou uso da liga.

- **Carbetos tipo MC:**

São estáveis, sendo o "M" geralmente Nb e/ou Ti. Encontram-se distribuídos pela matriz. Estes carbetos são dissolvidos completamente em temperaturas superiores a 1250°C. Precipitam-se durante a solidificação, trabalho à quente ou envelhecimento isotérmico na faixa de temperatura de 700 a 800°C.

- **Carbetos tipo M₆C e M₂₃C₆**

Precipitam-se durante a solidificação, envelhecimento a baixas temperaturas ou sob tensões combinadas (ensaio de fluência). O Cromo é predominante na composição "M" e precipitam-se preferencialmente nos contornos de grão.

As técnicas de tratamento térmico são utilizadas para a formação da fase primária (γ') nos contornos de grão, elevando a tensão de ruptura do material. As propriedades superiores apresentadas pelas superligas, foram estudadas por Shuangqun *et al.* (2004). Os autores demonstraram que, para diferentes temperaturas de envelhecimento, ocorrem alterações significativas da

microdureza para as superligas. No entanto, para tempos de envelhecimentos diferentes (500 – 4000 h), para a mesma temperatura, esta alteração ocorre de maneira bem menos significativa, o que implica que as propriedades desta liga podem ser mantidas durante longos períodos de trabalho, como pode ser observado na Figura 5.

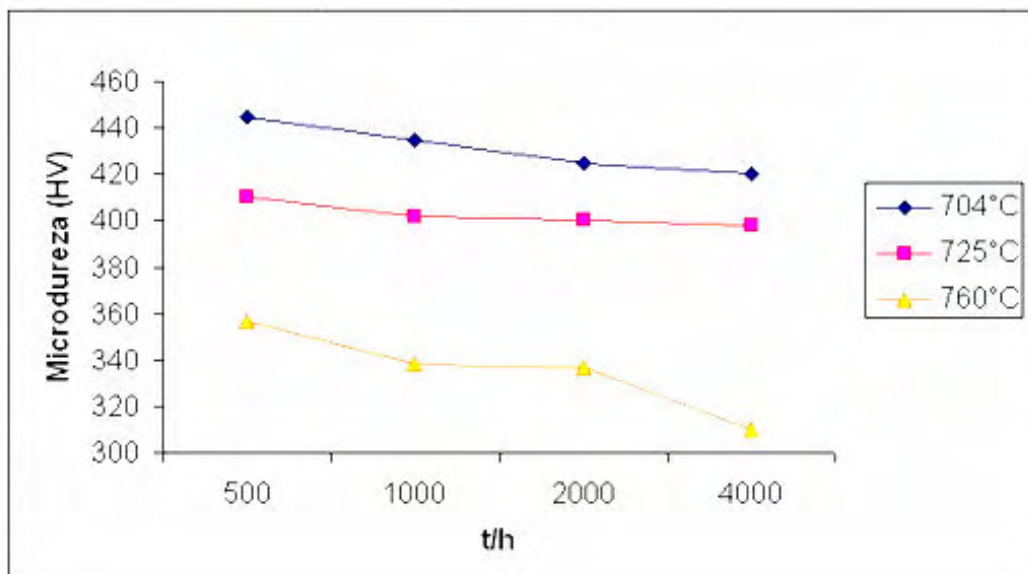


Figura 5 - Variação do tempo de envelhecimento para várias temperaturas, adaptada de Shuangqun et al., (2004).

2.7 Usinagem das ligas a base de Níquel

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

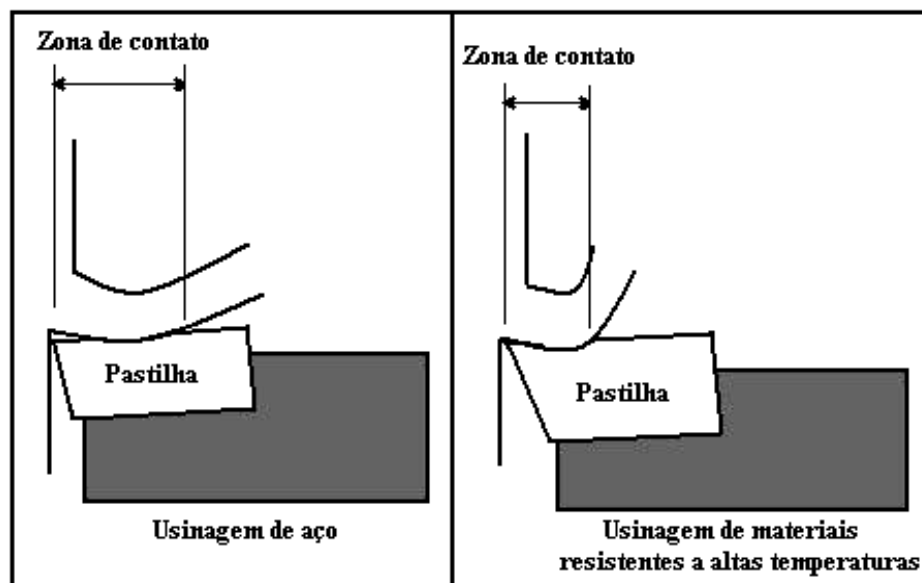
Os elementos de liga e suas proporções percentuais são decisivos para as propriedades mecânicas e térmicas. Por isso, as superligas foram classificadas em grupos conforme a sua composição e estrutura. O grupo 1 refere-se às de remoção fácil de cavacos, o 3 equivale à remoção média e o grupo 5 quer dizer remoção difícil. O fator que determina a vida útil é a alta resistência, ou dureza da estrutura, e a tendência à compactação a frio. Na Figura 6, estão relacionadas às superligas de níquel em função da usinabilidade das mesmas (KUNZ, 1982 apud WITTING, 2002).

| Grupo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------|------------|---|
| Exemplos de ligas | Ligas de Ni-Cu do grupo principal | Ligas não temperáveis | Ligas temperáveis | | Ligas fundidas de alta resistência ao calor |
| | Monel 400 | Hastelloy B | Inconel 718 | Nimonic 90 | IN-100 |
| | Monel 401 | Hastelloy X | Inconel X-750 | Rene 41 | Inconel 713C |
| | Monel 404 | Inconel 600 | Waspalloy | Udimet 500 | Nimocast 739 |
| | Monel R405 | Inconel 601 | | Udimet 700 | |
| | | <i>Nimonic80A</i> | | | |

Figura 6 - Composição dos elementos de liga e o estado da estrutura determinam a usinabilidade de uma liga (WITTING, 2002).

A estrutura especial do material das superligas faz com que haja requisitos especiais em relação às ferramentas. Isto é demonstrado por uma comparação da formação de cavaco na zona de contato, no torneamento do aço e de materiais resistentes a altas temperaturas, Figura 7. Na usinagem normal do aço, a aresta de corte da ferramenta recebe uma carga bem menor. Os cavacos são arrancados da

peça com raio relativamente grande e a direção da força principal é feita em uma área de contato mais estável. Ao contrário dos materiais resistentes a altas temperaturas, onde a ação da força faz com que o processo de deformação ocorra diretamente na aresta de corte. A energia necessária para a deformação da estrutura e cisalhamento dos cavacos é transformada diretamente na aresta principal de corte. (WITTING, 2002).



(a)

(b)

Figura 7 - Cargas geradas na aresta de corte: (a) usinagem de aço; (b) usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas (superligas), adaptado de Witting (2002)

Materiais resistentes a altas temperaturas possuem menor condutividade térmica, apresentando maiores temperaturas durante a formação dos cavacos e concentração de calor na região de corte. O controle da formação do cavaco e sua quebra ficam mais difíceis (CHOUDHURY *et al* 1998).

Um exemplo de usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas foi demonstrado por Ezugwu *et al* (1997), onde, na usinagem da liga Ti-6Al-4V, cerca de 80 % do calor gerado não pode ser removido com o fluxo do cavaco (Figura 8), ficando este calor retido na ferramenta. Para efeito comparativo, cerca de 50 % do calor gerado é absorvido na ferramenta com a usinagem do aço.

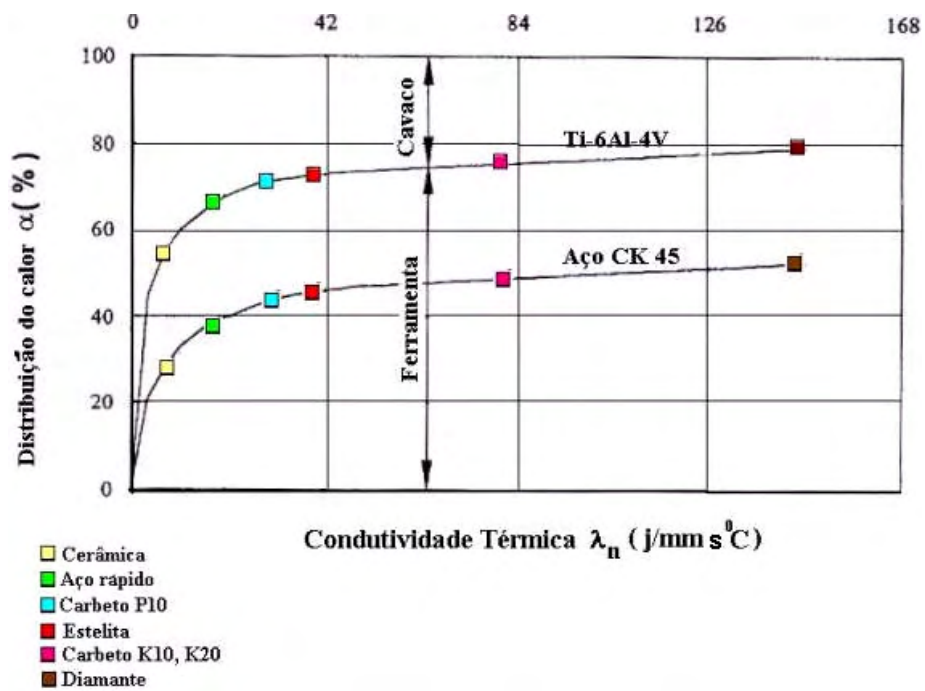


Figura 8 - Distribuição da temperatura quando se usina titânio e aço (EZUGWU, et al 1997).

Segundo Witting (2002) a usinagem convencional das ligas resistentes a altas temperaturas é feita com ferramenta de metal duro, classe K, com tempos de vida útil das ferramentas relativamente pequenos, em virtude das sobrecargas térmicas e mecânicas elevadas. As velocidades de corte, dependendo do material da peça, ficam entre 30 a 60 m/min. No entanto, arestas de corte com cantos vivos possibilitam o cisalhamento fácil dos cavacos, reduzindo a tendência ao encruamento do material.

A ferramenta de corte com revestimento adequado, pode ter sua vida útil aumentada. O mercado dispõe de classes de metal duro com revestimento à base de óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de titânio (TiN) e carbetto de titânio (TiC), além de revestimento de nitreto de alumínio-titânio (TiAlN). Comparando-se estes diferentes revestimentos com o metal duro, o Al_2O_3 é o mais resistente contra oxidação, porém sua dureza é reduzida. O TiC apresenta elevada dureza, a qual é reduzida em temperaturas elevadas.

A relação equilibrada entre dureza e a resistência ao desgaste por calor, torna o TiAlN o material mais indicado como revestimento, para usinagem de ligas à base de níquel. As ferramentas recobertas pelo processo de deposição física a vapor (Physical Vapor Deposition - PVD) apresentam arestas de corte

com cantos vivos. Como nesse processo são empregadas baixas temperaturas, o substrato e a aresta de corte da ferramenta não são afetados (Witting, 2002).

2.8 Características da liga INCONEL 718

Dezenas de superligas a base de níquel estão em uso nos mais diversos meios corrosivos ou operando em altas temperaturas. Entre todas, a liga mais importante é a Inconel 718, contendo de 5,0 a 5,5% de nióbio. Essa liga forma nada menos que a espinha dorsal dos motores a jato, tanto comerciais quanto militares.

Inicialmente desenvolvida como material de disco para turbofans de aeronaves, a liga 718 teve, nos últimos anos, seu uso estendido a outras peças de motores, como parafusos e eixos de rotor. E mais: descobriu-se que seu emprego é perfeitamente adequado às indústrias nuclear, criogênica e petroquímica.

Turbinas terrestres para geração de eletricidade estão adquirindo importância crescente, à medida que a eficiência dessas máquinas é elevada (56-58%) pelo aumento da temperatura de trabalho. A General Electric americana solucionou problemas associados à exposição de materiais a altas temperaturas utilizando as superligas Inconel 718 e Inconel 706. Outras empresas ainda estão tentando projetar sistemas de resfriamento mais eficientes que permitam dispensar o uso das superligas.

Contudo, a principal demanda pela liga 718 ainda vem dos fabricantes de motores para aeronaves. A indústria aeronáutica projeta, para os próximos dez anos, a entrega de pelo menos 6 mil jatos comerciais de grande porte, o que assegura uma forte e contínua demanda para o nióbio utilizado na Inconel 718. E como, historicamente, os níveis de ruído e consumo de combustível influenciam de modo considerável a escolha de determinada aeronave, a meta dos fabricantes tem sido reverter às deficiências nesses campos por meio do aumento da velocidade de rotação (o que também aumenta a temperatura de funcionamento) e do coeficiente de by-pass, progressos só possíveis com a melhora que tem sido

obtida na tecnologia de fabricação das superligas à base de níquel, especialmente a liga 718.

A capacidade de operar em condições de temperaturas mais elevadas e baixa densidade permanece como o pré-requisito básico para os materiais destinados à fabricação de motores para aeronaves. A liga 718 é adequada para trabalhar a uma temperatura equivalente a 85% de seu ponto de fusão, ficando claro que o ponto de fusão do níquel impõe um teto natural ao potencial de melhora dessa liga.

2.9 Dificuldades na usinagem das super ligas a base de Níquel

Até recentemente, ligas resistentes a altas temperaturas significavam reduzidas taxas de remoção de cavacos e grande desgaste de ferramentas. A utilização de metais duros de granulações superfinais, de cerâmicas de corte avançadas e de modernos materiais de corte de nitreto de boro policristalino ainda é reticente, embora existam expectativas de ganhos na forma de redução significativa de tempos de usinagem e aumento da eficiência econômica (WITTING, 2002).

Superligas a base de níquel, usado na indústria aeroespacial, estão entre os materiais mais difíceis de usar. Estas ligas são projetadas para manter a sua alta resistência a temperaturas elevadas, e sua usinagem implica, assim, forças que são consideravelmente mais elevadas do que aquelas encontradas na usinagem de aço. Além disso o comprimento de contato é menor, o que dá origem a elevadas tensões na interface ferramenta-cavaco (THAKUR, *et al* 2009).

Segundo Ezugwu *et al.* (2003), materiais aeroespaciais, tais como ligas de titânio e ligas de níquel apresentam uma usinabilidade ruim, devido a suas excelentes propriedades físicas o qual inclui baixa condutividade térmica e alta dureza a temperaturas elevadas. A baixa usinabilidade das ligas a base de níquel impõe uma extrema tensão térmica e mecânica à aresta de corte, levando a deformações plásticas e acelerados desgastes das ferramentas de corte. As ferramentas usadas para usinagem destas ligas devem possuir, portanto, adequada

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

De acordo com Kitagawa *et al.* (1997), devido à dificuldade no corte das superligas, a demanda por usinagem em velocidades mais elevadas está crescendo, em consequência do aumento da produtividade e da diminuição no custo de usinagem.

Com relação à superfície gerada após a usinagem de superligas, segundo Ezugwu *et al.* (1999), Vigneau (1997) e Ezugwu *et al.* (1997), esta operação induz efeitos que afetam sua integridade, como: rugosidade superficial; modificações na dureza da camada superficial devido ao endurecimento da peça; microtrincas ou macrotrincas, particularmente em retificação; deformações plásticas; transformações metalúrgicas atribuídas à alta temperatura; tensões residuais (tração e compressão) e alterações químicas devido à alta temperatura, provocando oxidação e difusão entre a peça e o material da ferramenta. Esse aspecto é crítico quando se trata de superligas a base de níquel, uma vez que suas aplicações são feitas em situações de grande exigência técnica, no qual a camada superficial do componente pode afetar as propriedades de fadiga, fratura/trinca por tensão de corrosão e fluência, tendo um grande impacto na sua vida em serviço (EZUQWU *et al.*, 1999), (EZUQWU, *et al.* 1997). Portanto, para se assegurar à vida da ferramenta e a integridade da superfície é necessário o controle dos principais parâmetros da usinagem, como escolha correta da ferramenta de corte (incluindo material e geometria), método de usinagem, velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, etc.

A usinagem no estado de fornecimento das ligas resistentes a altas temperaturas, torna-se vantajosa até próxima às dimensões finais da peça, para então ser tratada termicamente e finalmente usinada em acabamento. Essa operação em acabamento permite a obtenção da superfície final desejada da peça,

minimizando a preocupação quanto às distorções decorrentes do tratamento térmico. Onde for possível, usar geometrias de corte positivas para operações de semi-acabamento e acabamento, elas diminuem o encruamento da superfície, por remover cavacos da peça de maneira mais eficiente. Ângulos de saída mais positivos, também ajudam a minimizar o fenômeno da aresta postiça. Usar arredondamentos pequenos e arestas agudas nas ferramentas de corte promovem melhoria no acabamento superficial, porém, deve se ter em mente que as arestas agudas são mais frágeis e susceptíveis a lascamentos. Portanto, recomenda-se normalmente o uso de arestas arredondadas para operação em desbaste, onde as exigências quanto à integridade da superfície são mínimas e arestas agudas em operação de acabamento, onde o compromisso com integridade da superfície é maior.

Ferramentas de corte com raios de ponta maiores são vantajosas e devem ser usadas onde não existirem restrições geométricas por parte do perfil da peça a ser usinada. Esses raios tendem a aumentar o perímetro de contato da ferramenta de corte, distribuindo os esforços e prevenindo danos localizados.

Durante a usinagem é indispensável a estabilidade da ferramenta uma vez que, a rigidez previne vibrações, as quais danificam o acabamento superficial e causam a quebra da ferramenta. Preparações rígidas e estáveis possibilitam a manutenção de tolerâncias mais estreitas (CUNHA, 2004).

Cuidados especiais devem ser tomados para evitar a flexão dos componentes, particularmente em peças delgadas. As avarias e desgastes estão diretamente associados às propriedades mecânicas e físicas do material a ser usinado. Como as características metalúrgicas das ligas resistentes a altas temperaturas são muito variadas, é muito comum encontrar diferentes mecanismos de desgaste.

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

As falhas nas peças usinadas ocorrem principalmente em decorrência da

ativação de mecanismos de desgaste e avaria por, fadiga e/ou oxidação sob tensão. Tais falhas começam por pequenas trincas na superfície das peças e são propagadas para o centro ocorrendo quebra súbita. Estas falhas dependem da ferramenta usada e também da força da ferramenta na superfície e o tipo de corte ortogonal ou não, e a temperatura do cavaco. A superfície usinada do material contém tensões residuais, onde sua grandeza e natureza dependem dos parâmetros de corte adotados.

De acordo com Witting (2002) no torneamento, na zona de contato entre a ferramenta e a peça, formam-se elevadas pressões e temperaturas. Na usinagem dos aços, 75% do calor são retirados pelos próprios cavacos. Nas ligas resistentes a altas temperaturas, devido à sua reduzida condutibilidade térmica, a condução de calor para o cavaco ocorre em pequena escala. Estas temperaturas elevadas podem produzir tensões indesejáveis na estrutura das peças. Tendo em vista que a velocidade de corte exerce uma influencia decisiva sobre as necessidades de energia, e conseqüentemente sobre a temperatura do processo, desta forma estas ligas só podem ser usinadas com velocidades reduzidas (em media 60 m/min). A usinagem ainda é dificultada pelo encruamento e pela formação de aresta postiça de corte. Além disso, devem ser consideradas a elevada tenacidade do material e a formação desordenada de cavacos em forma de fita e espirais.

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

Os problemas se agravam quando essas ligas são tratadas termicamente para modificar suas propriedades de fundição ou solubilização. São formados carbeto abrasivos precipitados ou mesmo outros tipos de partículas de segunda fase. No caso das ligas reforçadas por óxidos dispersos, partículas relativamente grandes e duras passam a fazer parte da estrutura da liga. Essas partículas causam rápido desgaste das arestas de corte da ferramenta, levando a um endurecimento

superficial durante a usinagem. Com isto é formada uma faixa endurecida na linha da profundidade de corte, promovendo o desgaste de entalhe.

A microestrutura e as propriedades mecânicas de metais e ligas podem ser alteradas utilizando processos envolvendo deformação plástica, como recuperação, recristalização e crescimento de grão. Devido à heterogeneidade microestrutural comumente encontrada nos cavacos, a superposição desses fatos é esperada (BAYOUMI, *et al* 1995).

A resistência do material de uma peça aumenta quando este é deformado plasticamente. O crescimento da resistência depende da taxa de deformação e da capacidade de encruamento (KOPAC, *et al* 1999). Materiais com alta taxa de encruamento requerem muita energia para formação do cavaco (valor alto da pressão específica de corte - baixa usinabilidade). Com isto, o corte acarretará um substancial aumento de dureza numa fina camada da superfície usinada, facilitando a formação de aresta postiça (DINIZ *et al*, 1999).

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

A formação de cavaco influencia diversos fatores ligados a usinagem, tais como: desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado durante a usinagem, penetração do fluido de corte, dentre outros. Dessa forma, estão envolvidos aspectos econômicos, qualidade da peça, segurança do operador, utilização correta da máquina-ferramenta, etc. (DINIZ, *et al*, 2008).

Além disso, a morfologia micro e macroestrutural final do cavaco podem revelar indícios das dificuldades encontradas no processo de corte. Para diferentes condições de usinagem, isto ocorre devido à influência que estas situações exercem no processo de formação normal de cavaco.

3 – MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1 MATERIAL

O material utilizado para a realização dos ensaios foi à liga INCONEL 718, de uso aeronáutico, obtido junto à Empresa Villares Metals, o qual foi entregue na forma de barras cilíndricas com comprimento de 300 mm e diâmetro externo de 80 mm, apresentando dureza média de 24 HRC, que posteriormente foi submetida ao processo de endurecimento através de tratamento térmico de solubilização seguido de precipitação com a dureza média de 46 HRC. A composição química nominal da liga INCONEL 718, segundo o *site* da Villares Metals e apresentado na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química nominal da liga INCONEL 718

| C | Si | Mn | Cr | Ni | Fe | Ti | Al | Nb | Mo |
|--------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,03 % máx. | 0,1 % máx | 0,1 % máx. | 18,5 % | 53 % | Rest. | 1,0 % | 0,5 % | 5,1 % | 3,0 % |

A Tabela 2 mostra a análise química por espectrometria de emissão óptica, ao qual foi submetido o material recebido. Análise feita no laboratório de ensaios Metalúrgicos da escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo, Osasco –SP sendo utilizado espectrômetro de emissão óptica Metal LAB modelo 7580 J.

Tabela 2 - Composição química da liga INCONEL 718

| C | Si | Mn | Cr | Ni | Fe | Ti | Al | Nb | Mo |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,027 % | 0,057 % | 0,021 % | 18,98 % | 54,516 % | 16,775 % | 0,965 % | 0,50 % | 4,447 % | 3,331 % |
| P | S | Cu | Co | V | W | Sn | Zr | Mg | B |
| 0,006 % | 0,004 % | 0,069 % | 0,089 % | 0,018 % | 0,060 % | 0,004 % | 0,019 % | 0,001 % | 0,004 % |

3.1.1 Tratamento Térmico do material

Para aumento das propriedades mecânicas do INCONEL 718 o mesmo foi submetido ao tratamento térmico de solubilização seguido de precipitação. Foram utilizados dois fornos do laboratório da faculdade de tecnologia em metalurgia do SENAI “Nadir Dias de Figueiredo” de Osasco, para a solubilização foi utilizado um forno resistivo marca Brasimet capacidade de 1200 °C mostrado na Figura 9, e para o tratamento de solubilização foi utilizado um forno resistivo marca Jung capacidade de 1000 °C conforme mostrados na Figura 10.



Figura 9 – Forno utilizado para solubilização (980°C / 3h) do INCONEL 718.



Figura 10 – Forno utilizado para precipitação (720°C / 8h) do INCONEL 718.

Os tratamentos térmicos consistiram na solubilização e envelhecimento do material. A solubilização do material foi realizada em um forno resistivo Brasimet a uma temperatura de 980 °C por 3 horas com posterior resfriamento ao ar.

A última etapa do tratamento térmico para se envelhecer o material foi realizado em um forno tipo resistivo modelo 160 da Jung, a temperatura de 720 °C por 8 horas, em seguida as amostras sofreram um resfriamento lento dentro do próprio forno por 16 horas.

Após o tratamento térmico foram realizados ensaios de dureza e o material apresentou dureza média de 46 HRC.

Na seqüência foram preparadas as amostras para análise metalográfica, seguindo-se os procedimentos tradicionais de metalografia, da amostra do material como recebido e uma do material solubilizado e envelhecido, analisadas em microscópio óptico metalográfico com aumento de 1000x.

Na amostra do material como recebido pode se observar uma matriz austenítica e presença de carbeto duros na microestrutura da liga à base de níquel, como mostrado na Figura 11.

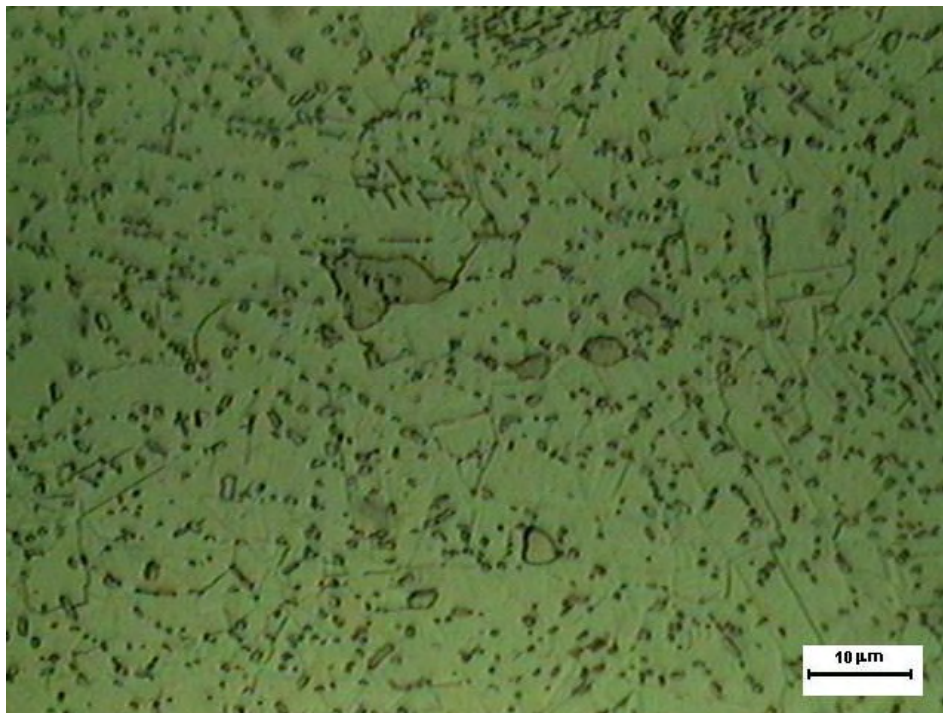


Figura 11 – Microestrutura da liga INCONEL 718 aumento 1000x.

Na amostra do material solubilizado e envelhecido podemos observar que não houve mudança significativa na microestrutura do material apenas um crescimento dos grãos que resultou num aumento da dureza de 24 HRC para 46 HRC (dureza média) mostrado na Figura 12.

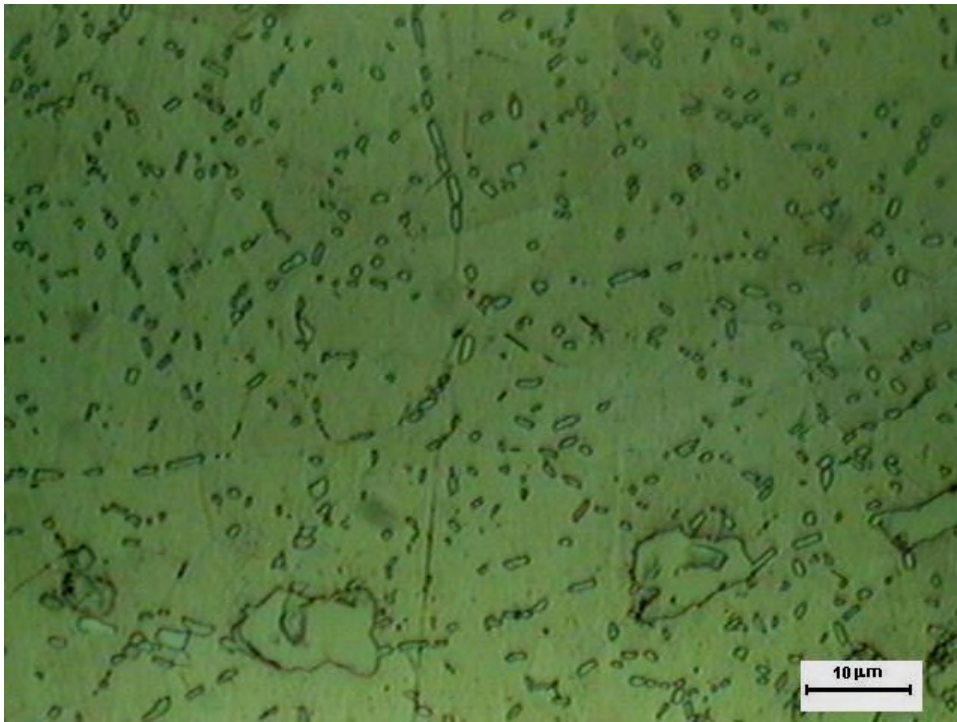


Figura 12 – Microestrutura da liga INCONEL 718 após solubilização e envelhecimento aumento 1000x.

3.1.2 Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova, foram fornecidos no formato cilíndrico com comprimento de 300mm e diâmetro de 80 mm, mostrado na Figura 13.



Figura 13 - Representação dos corpos-de-prova

3.1.3 Ferramenta de corte

Para os ensaios foram utilizadas pastilhas cerâmica à base de Si_3N_4 geometria SNMN 120408 T02520 mostradas na (Figura 14) montadas no suporte CSBNR 2525M 12-4 :

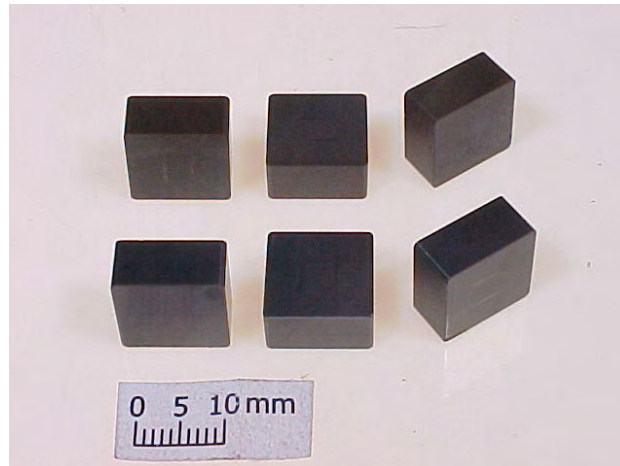


Figura 14 – Foto das ferramentas utilizadas nos ensaios de torneamento

3.2 EQUIPAMENTOS

3.2.1 ESTEREOSCÓPIO

Para a análise dos desgastes das ferramentas foi utilizado Estereoscópio Olympus SZ-TZ, ampliação de 25x do SENAI Taubaté-SP mostrado na Fig. 15.



Figura 15 – Estereoscópio Olympus SZ-TZ

3.2.2 Durômetro Digital

Para os ensaios de dureza foi utilizado duromêtro digital Future Tech modelo LC-200RB do SENAI – Taubaté – SP mostrado na Figura 16.



Figura 16 – Duromêtro digital (Senai Taubaté)

3.2.3 Rugosímetro

Para as análises de rugosidade foram feitas medições com um Rugosímetro portátil SurfTest SJ-201 da Mitutoyo (com apalpador mecânico tipo estilete e raio de ponta de $5\ \mu\text{m}$), Senai – Taubaté mostrado na Figura 17.

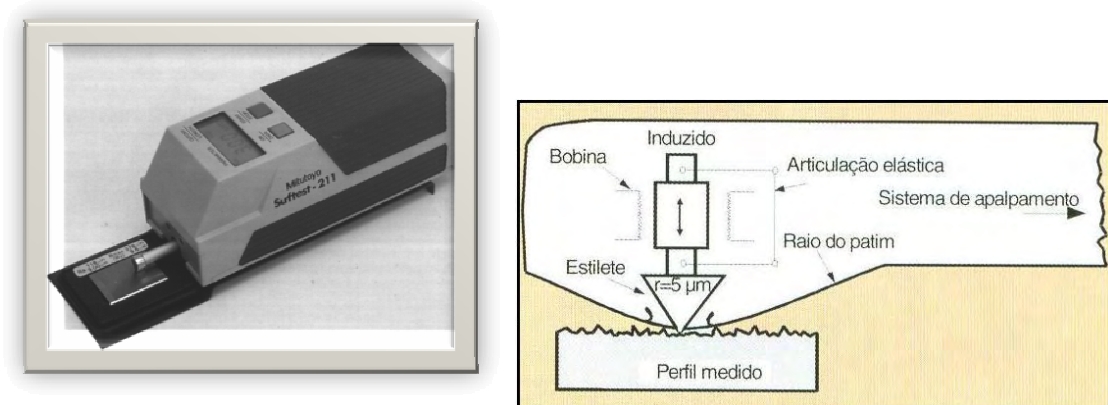


Figura 17 – Rugosímetro (Senai Taubaté) em foto e detalhe do apalpador.

3.2.4 Torno CNC

Para os ensaios de usinagem foram utilizados um torno CNC Hardinge – Ergomat GS 200 / 66 – 30 KW, Senai – Taubaté, mostrado na Figura 18.



Figura 18 – Torno CNC (Senai Taubaté)

4. METODOLOGIA

Foram realizados ensaios de torneamento cilíndrico externo (Figura 19), com parâmetros de usinagem típicos de acabamento (baixos valores de avanço e profundidade de corte). Como parâmetros iniciais foram utilizados dados de testes preliminares para a velocidade de corte de 60 m/min. Nestes testes pode-se observar que com a profundidade de corte $a_p = 0,5$ mm houve um melhor comportamento da ferramenta e este parâmetro serviu como referência para os demais ensaios. Estes testes foram ainda posteriormente comprovados na velocidade de corte de melhor rendimento, como será demonstrado com os resultados a seguir.

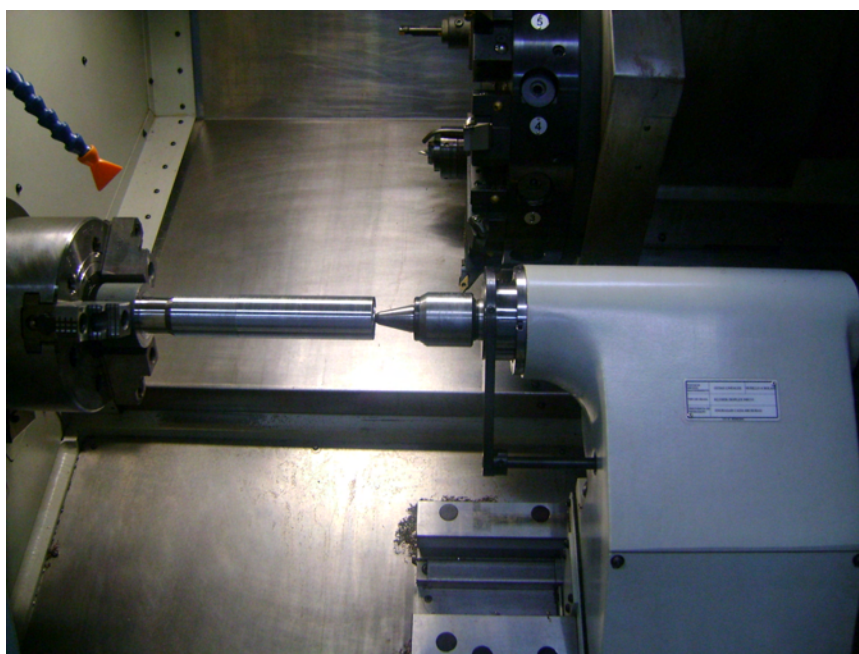


Figura 19. Torneamento cilíndrico externo CNC.

De acordo com a literatura as ferramentas de corte a base de nitreto de silício (Ni_3Si_4) apresentam melhores desempenhos em altas velocidades de corte, que foi utilizado como referência para o início dos testes.

Nos ensaios foram selecionados os parâmetros apresentados na Tabela 3.

Visando facilitar a visualização dos dados referentes aos parâmetros de corte utilizados, os valores serão apresentados da seguinte forma: **110-05-05**, que significa uma velocidade de corte de 110 m/min , um avanço de 0,05 mm/rot e

uma profundidade de corte de 0,5 mm. Não havendo qualquer informação quanto à unidade de cada parâmetro deverão ser consideradas as unidades de medida indicadas acima.

Tabela 3 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios

| <i>vc</i> (m/min) | <i>ap</i> (mm) | <i>f</i> (mm/volta) |
|----------------------|-------------------|------------------------|
| 60 | 0,5 | 0,1 |
| 60 | 0,5 | 0,15 |
| 60 | 0,5 | 0,2 |
| 60 | 1 | 0,2 |
| 85 | 0,5 | 0,05 |
| 85 | 0,5 | 0,1 |
| 85 | 0,5 | 0,15 |
| 110 | 0,5 | 0,05 |
| 110 | 0,5 | 0,1 |
| 110 | 0,5 | 0,15 |
| 150 | 0,5 | 0,05 |
| 150 | 0,5 | 0,1 |
| 150 | 0,5 | 0,15 |
| 200 | 0,25 | 0,05 |
| 200 | 0,5 | 0,05 |
| 200 | 0,75 | 0,05 |
| 200 | 0,25 | 0,1 |
| 200 | 0,5 | 0,1 |
| 200 | 0,75 | 0,1 |
| 200 | 0,5 | 0,15 |
| 300 | 0,5 | 0,05 |
| 300 | 0,5 | 0,1 |
| 300 | 0,5 | 0,15 |

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram inicialmente analisados os resultados referentes ao desgaste da ferramenta em função do seu comprimento de corte como mostrado na Figura 20.

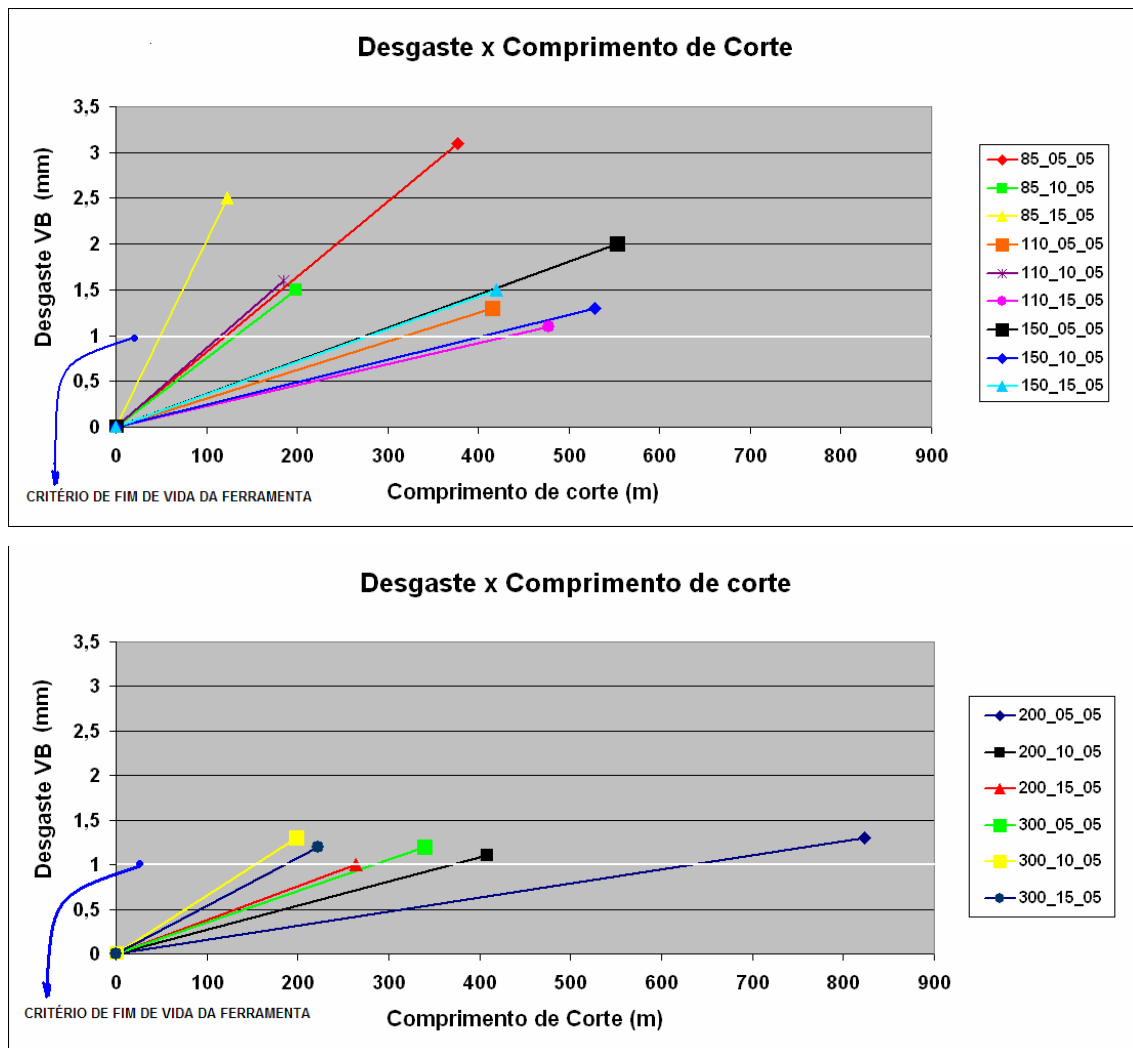


Figura 20 - Desgaste de flanco da ferramenta “Vb” x Comprimento de corte “Lc”.

Analisando-se os resultados referentes ao desgaste da ferramenta em função do seu comprimento de corte é possível perceber a grande vantagem encontrada quando se trabalha na condição do ensaio 200-05-05.

Esse melhor desempenho foi percebido durante os ensaios, no tipo de cavaco formado e nas demais condições de estabilidade do processo como ruído, vibração, condições estas somente observadas e não mensuradas.

É preciso destacar o excelente desempenho em termos de vida da ferramenta na condição de ensaio 200-05-05, o que supera as expectativas construídas com base nas bibliografias consultadas.

Como mostrado no gráfico da Figura 20 o critério de fim de vida da ferramenta adotado para análises posteriores foi de desgaste de flanco $V_B = 1 \text{ mm}$, pois em todos os ensaios realizados conseguiu-se atingir este valor.

O gráfico da Figura 21, representa a vida da ferramenta para o critério de fim de vida adotado com profundidade de corte fixa $a_p = 0,5 \text{ mm}$.

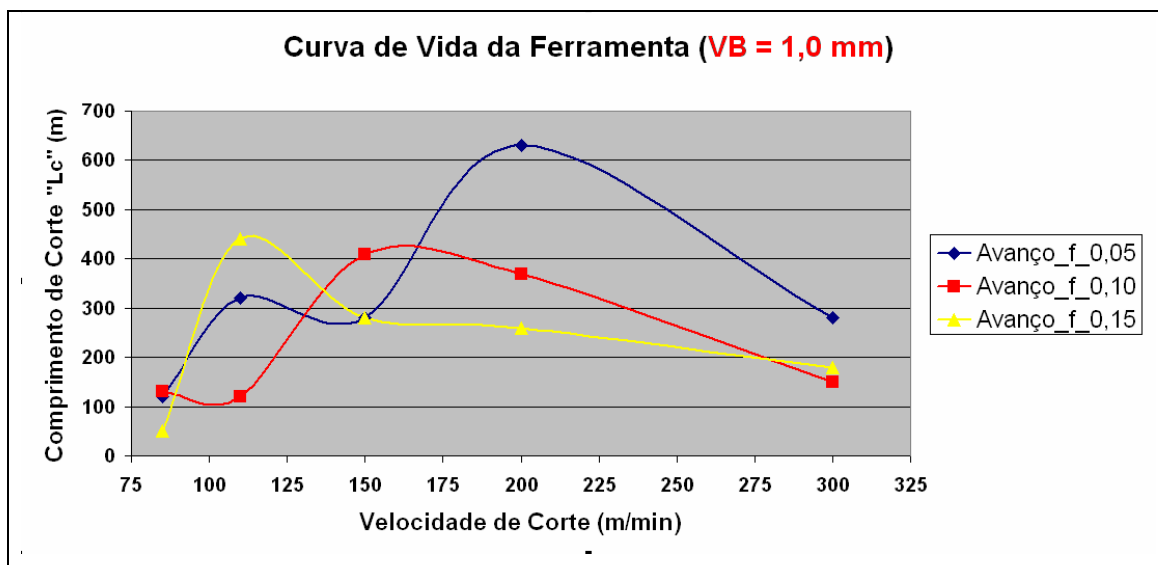


Figura 21 – Curva de vida da ferramenta.

Percebe-se claramente neste gráfico o melhor desempenho obtido pela ferramenta na condição de ensaio 200-05-05 e o declínio nas condições adjacentes, tanto nas condições de menores velocidades de corte, quanto nas condições de maiores velocidades de corte.

Outro fator importante que deve ser observado na figura 21 é que de uma maneira geral quando se deseja trabalhar com maiores taxas de avanço deve-se diminuir a velocidade de corte para se obter o melhor desempenho da ferramenta.

É possível observar também na Figura 22, a influência do avanço na vida da ferramenta, mostrando um declínio do comprimento de corte com o aumento do mesmo, principalmente para a velocidade de melhor condição 200 m/min.

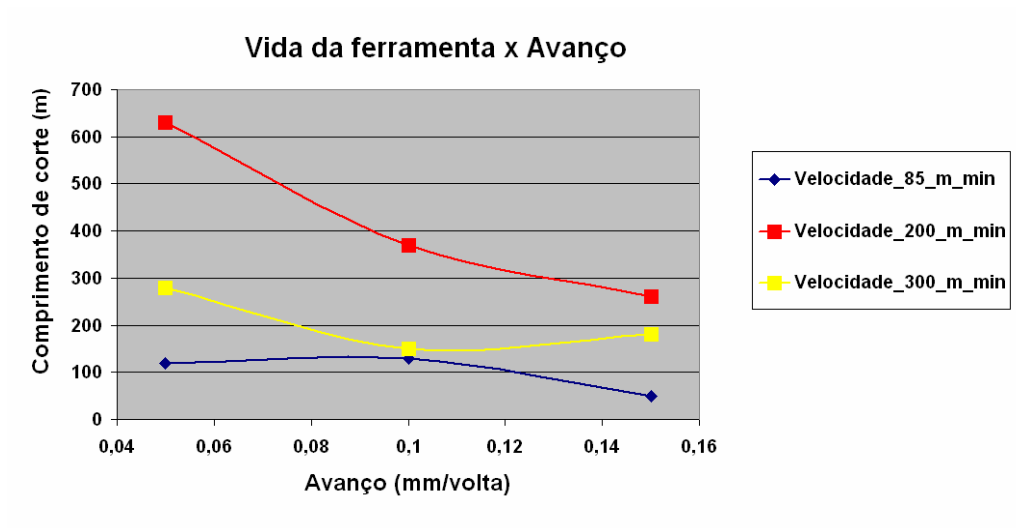


Figura 22 – Influência do avanço na vida da ferramenta.

Pode ser observada pelos resultados apresentados na Figura 23, uma tendência na diminuição da vida da ferramenta quando são aumentados os parâmetros de profundidade de corte (a_p). Tanto os resultados da figura 22, como os resultados da figura 23, se devem principalmente ao fato de que estes parâmetros, quando aumentados, levam a um aumento na zona de aderência e na zona de escorregamento imposta a interface cavaco ferramenta, devido ao aumento da área de contato entre o cavaco e a ferramenta, o que impõe uma maior carga à aresta de corte. Esta maior área de contato intensifica os mecanismos de desgaste por causa do calor gerado pelo atrito excessivo, levando a uma maior deterioração da aresta de corte. Como as cerâmicas não conduzem calor este calor se acumula principalmente na aresta de corte possibilitando o início do processo de desgaste.

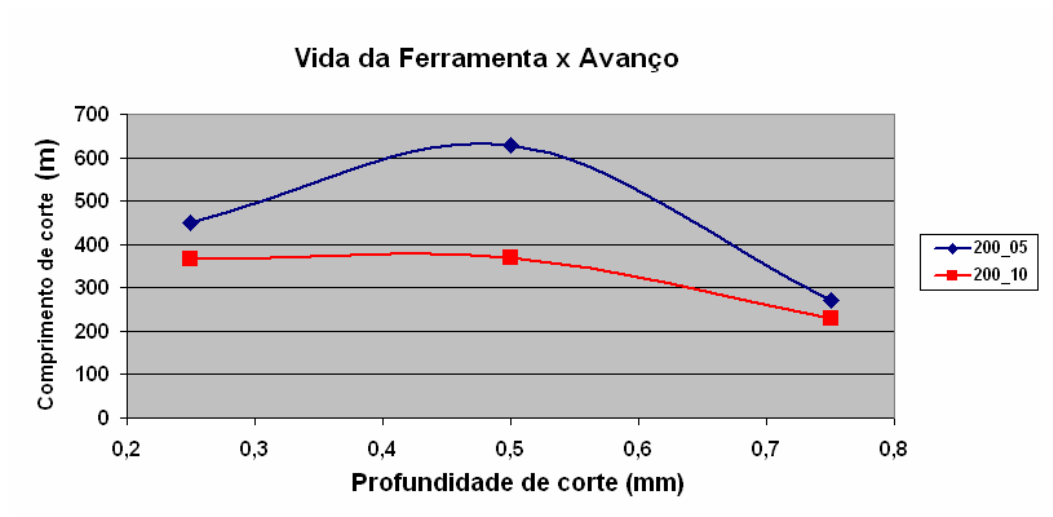


Figura 23 – Influência da profundidade de corte na vida da ferramenta

Os próximos gráficos contêm as informações a respeito das rugosidades “Ra” (Figura 24) e “Ry” (Figura 25) obtidos nas operações de corte:

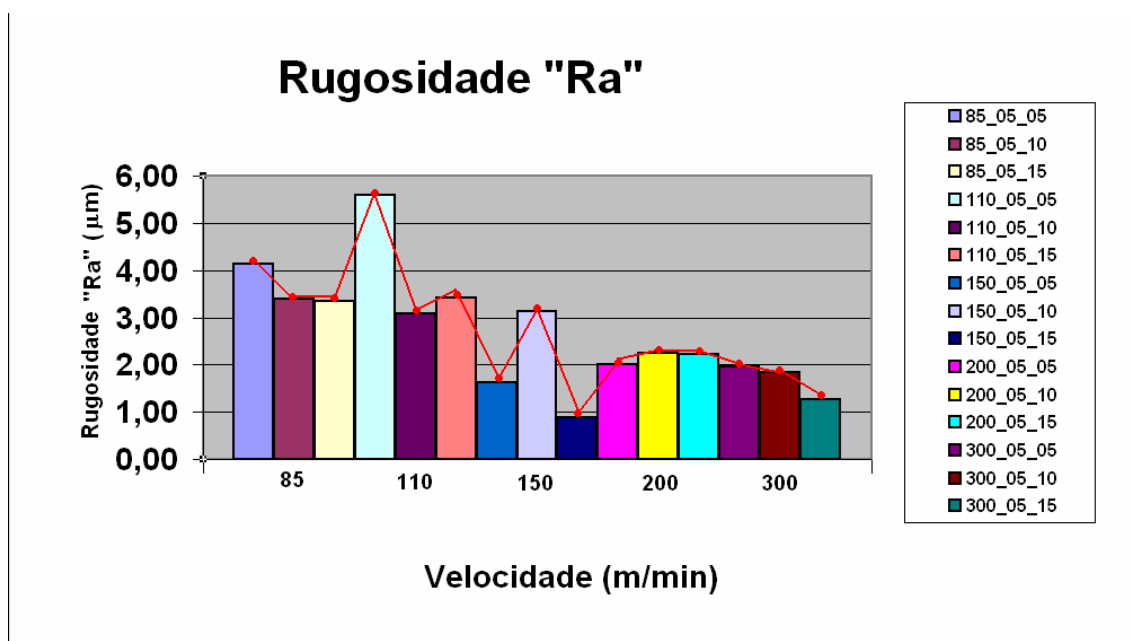


Figura 24 – Rugosidades “Ra”

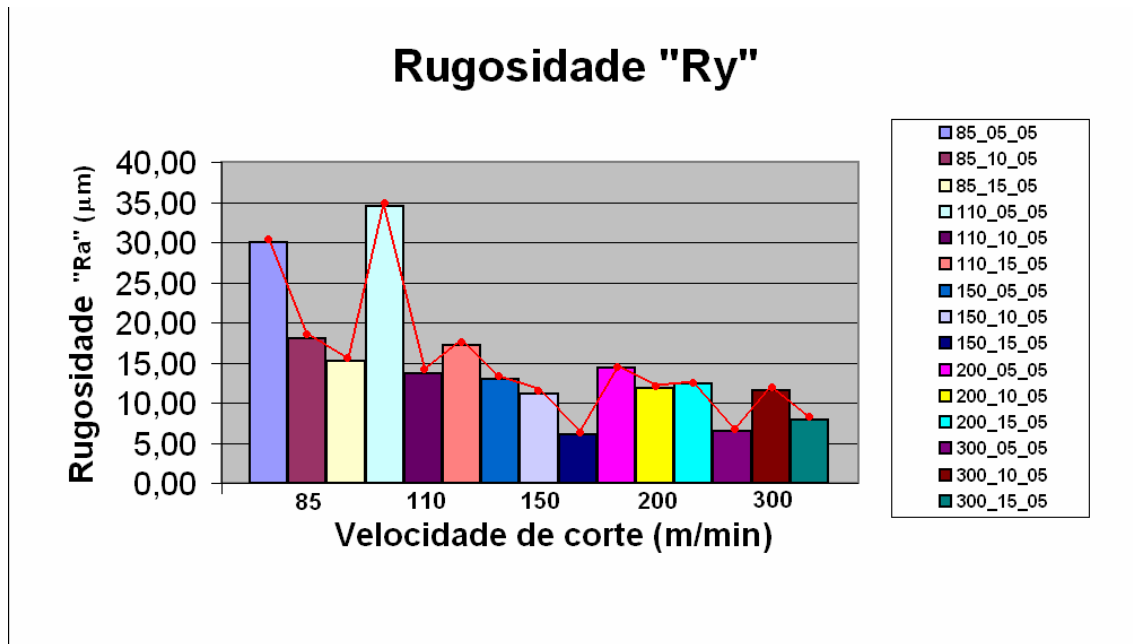


Figura 25 – Rugosidades "Ry"

Ao se observar os gráficos referentes às rugosidades, tanto "Ra", quanto "Ry" percebe-se uma nítida queda de seus valores com o aumento da velocidade de corte, isto se deve em parte a diminuição dos processos de adesão (attrition) e ou aresta postiça de corte por parte do cavaco na superfície da ferramenta, o que proporciona um corte mais uniforme sem grandes interferências na superfície gerada.

Os ensaios de rugosidade, foram obtidos a partir da realização de 3 medições em linha, utilizando-se a média dos resultados

Na Figura 26 estão representadas as fotos das arestas de corte das ferramentas usadas nos testes preliminares de 60 m/min e suas respectivas condições de trabalho.

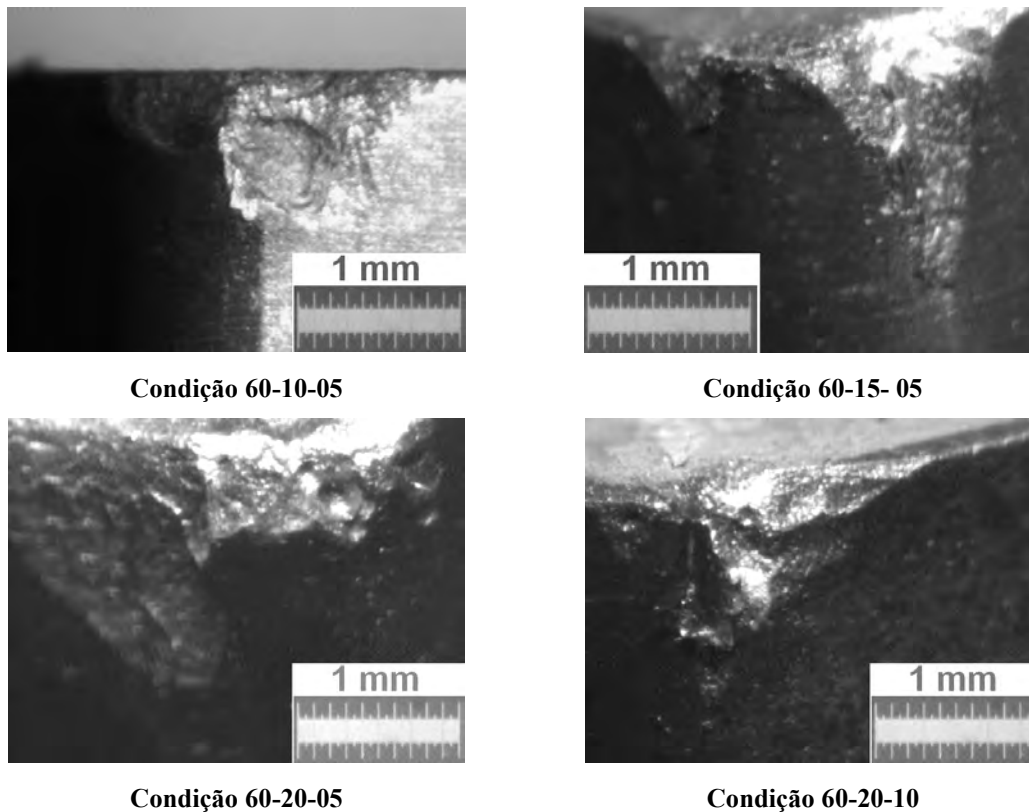


Figura 26 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para $V_c = 60\text{m/min.}$

As fotos das arestas de corte nos ensaios da Figura 26 revelam que os desgastes predominantes nestas condições foram desgastes de flanco, devido ao atrito da ferramenta com a peça, observa-se, porém a excelente resistência desta ferramenta com relação ao desgaste de cratera, pois os mesmos não foram observados durante os ensaios. Isto demonstra uma grande estabilidade química (ausência de difusão) por parte da ferramenta o que evita o aparecimento deste tipo de desgaste.

Na Figura 27 estão representadas as fotos das arestas de corte das ferramentas usadas nos testes com $v_c = 85\text{ m/min}$ e suas respectivas condições de trabalho.

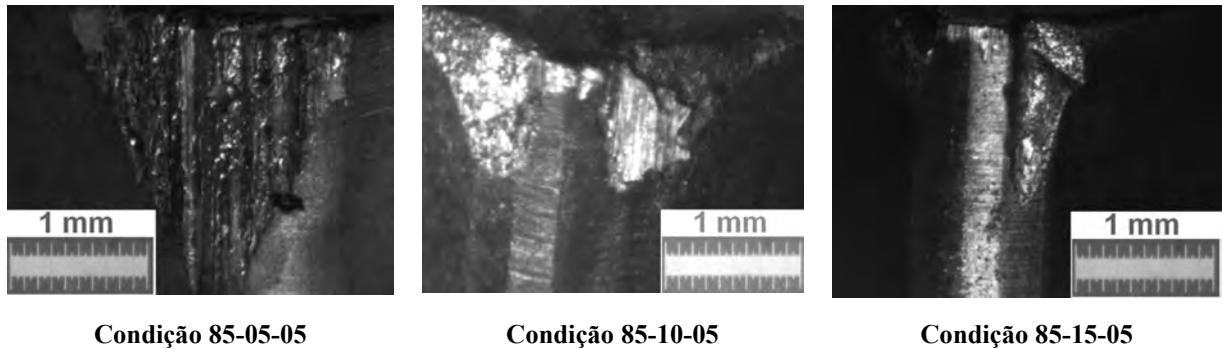


Figura 27 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para $V_c = 85\text{m/min}$...

No ensaio da ferramenta (85-05-05) ocorreu um desgaste de flanco com um ligeiro aumento da rugosidade, porém ainda se encontra na região de variação normal do processo, no ensaio das ferramentas (85-10-05) e (85-15-05) ocorre também a presença do desgaste por entalhe.

Na Figura 28 estão representadas as fotos das arestas de corte das ferramentas usadas nos testes com $V_c = 110\text{ m/min}$ e suas respectivas condições de trabalho.

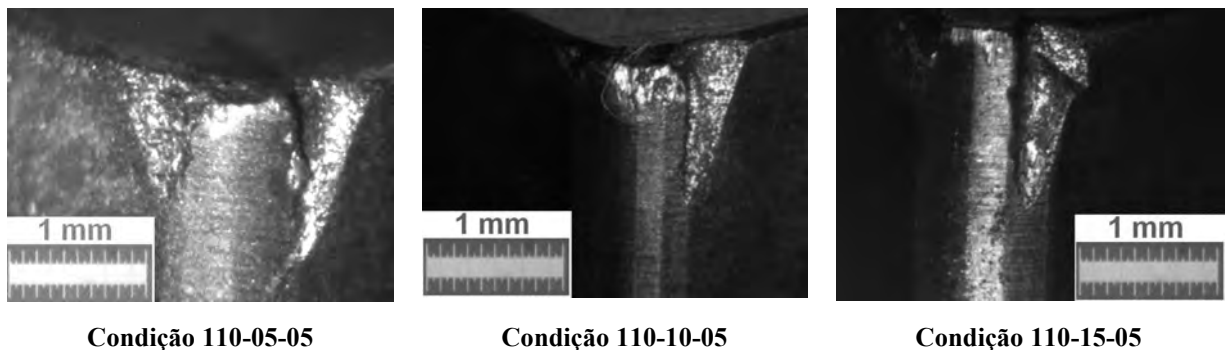


Figura 28 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para $V_c = 110\text{m/min}$...

As fotos das arestas nas condições da Figura 28 mostram desgastes por entalhe muito evidentes, com grandes dimensões, que ocorrem simultaneamente ao desgaste de flanco. Este tipo de desgaste ocasiona na maioria dos casos deterioração do acabamento superficial (explicando o aumento da rugosidade nos gráficos), ocasionando uma modificação, substancial na forma da aresta de corte original.

Na Figura 29 estão representadas as fotos das arestas de corte das ferramentas usadas nos testes com $V_c = 150\text{ m/min}$ e suas respectivas condições

de trabalho. Pode-se observar a presença do desgaste de flanco em todas as condições ensaiadas

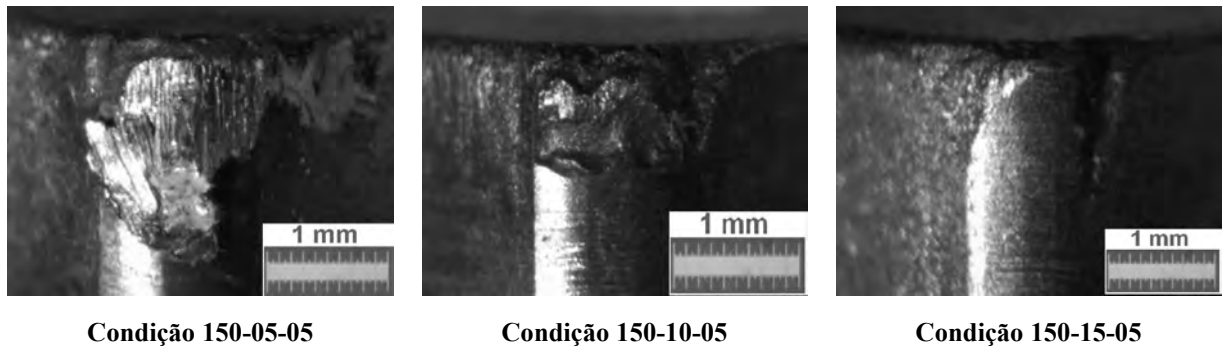


Figura 29 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para $V_c = 150\text{m/min}$.

Na Figura 30 estão representadas as fotos das arestas de corte das ferramentas usadas nos testes com $V_c = 200\text{ m/min}$ e suas respectivas condições de trabalho.

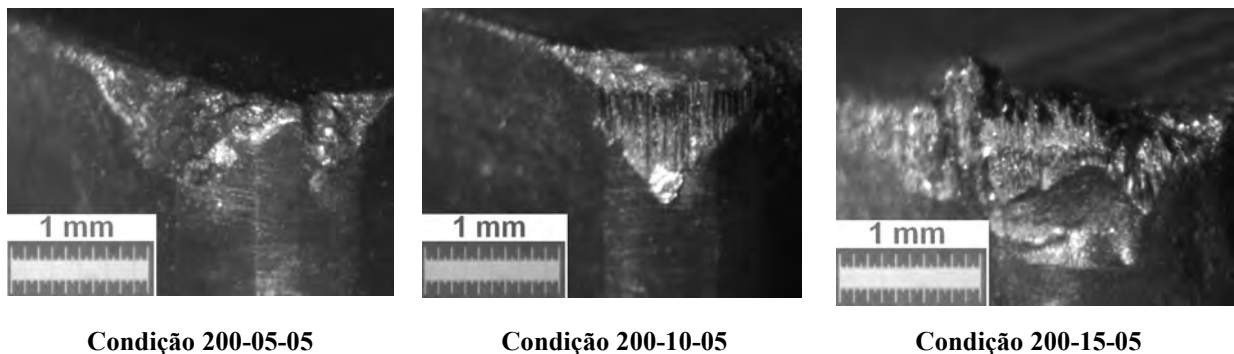
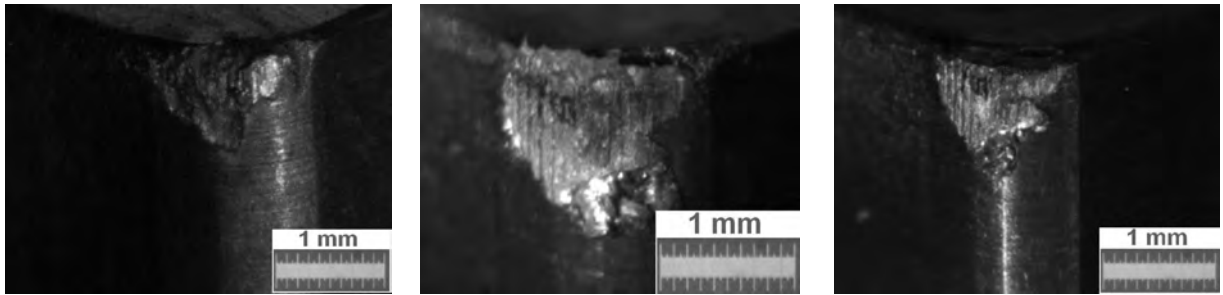


Figura 30 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para $V_c = 200\text{m/min}$...

Pode-se notar nas fotos dos testes na condição de ensaio (200-05-05) que ainda há predominância de desgastes por entalhe, por isso os valores de rugosidade para esta condição ainda permanecem elevados, apesar de seu excelente desempenho em termos de vida da ferramenta. Nas outras condições dos ensaio (200-10-05) e ensaio (200-15-05) correram apenas desgastes de flanco conforme o processo se desenvolvia.

Na Figura 31 estão representadas as fotos das arestas de corte das ferramentas usadas nos testes com $V_c = 300\text{ m/min}$. e suas respectivas condições de trabalho.



Ensaio 01 – ferramenta 300-05-05 Ensaio 02 – ferramenta 300-10-05 Ensaio 03 – ferramenta 300-15-05

Figura 31 – fotos das ferramentas utilizadas nos ensaios para $V_c = 300\text{m/min}$.

Foi possível notar durante os ensaios que sob as condições representadas nas fotos anteriores houve um desgaste acelerado da aresta de corte na condição 300-10-05, que foi minimizado ao se diminuir o avanço, (30-05-05) observa-se então um aumento da vida da ferramenta de maneira considerável.

Na figura 32 estão apresentados os cavacos típicos obtidos nos ensaios com INCONEL 718 para o conjunto de parâmetros testados. Pode ser observada a predominância dos cavacos em fita em função da ductilidade do material. Vale comentar que mesmo para a melhor condição de teste (200-05-05) os cavacos também foram na forma de fita e emaranhados.



60 m/min



85 m/min



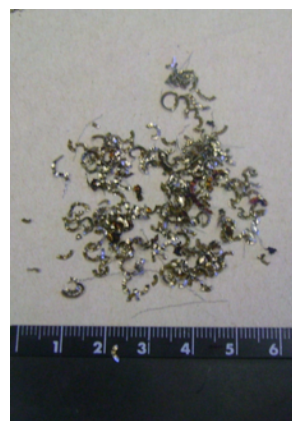
110 m/min



150 m/min



200 m/min



300 m/min

Figura 32 – fotos dos cavacos típicos obtidos nos ensaios com INCONEL 718.

6. CONCLUSÕES

Observa-se no gráfico da Figura 20 o pobre desempenho obtido em termos de vida da ferramenta para velocidades descritas nos ensaios com baixas velocidades de corte (entre 60 m/min até 85 m/min). Isto ocorre em parte, pois existe uma maior tendência à formação de aderência mais intensa devido ao maior tempo de contato entre o cavaco e a ferramenta, que pode em alguns casos levar ao aparecimento de aresta postiça de corte (APC).

Em velocidades intermediárias (entre 110 m/min até 200 m/min) ocorre uma diminuição drástica destes fenômenos o que se reflete na melhoria da vida da ferramenta, o que ocorre em maior escala no ensaio 200-05-05.

Nos ensaios com velocidade de corte 300 m/min ocorre uma maior influência da temperatura gerada pelo atrito da ferramenta com o cavaco e com a peça devido à alta velocidade o que acelera de maneira intensa os processos de desgaste da aresta de corte.

A deterioração geral das ferramentas utilizadas nos ensaios apresentam pouco ou nenhum desgaste de cratera, este fato evidencia a grande resistência ao desgaste químico, principalmente por difusão apresentado pelo nitreto de silício (Si_3N_4) na usinagem destas ligas.

Outro fato revelador foi à interferência da profundidade de corte e do avanço na vida da ferramenta, mostrando que o aumento destes parâmetros não só impõe carga mais excessiva a aresta de corte como leva ao surgimento de desgastes mais severos na ferramenta de corte.

Em termos de acabamento superficial existe uma tendência muito forte da ocorrência da diminuição dos níveis de rugosidade com o aumento da velocidade de corte, infelizmente para velocidades elevadas acima de 300 m/min, o desgaste prematuro da ferramenta não permite uma usinagem eficiente.

Ficou evidente que a melhor condição de trabalho em termos de vida da ferramenta foi a 200-05-05. Podendo comentar ainda que em termos de rugosidade superficial apresentou resultados significativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

BAYOUMI, A. E., XIE, J. Q., Some metallurgical aspects of chip formation in cutting Ti-6wt.%Al-4wt.%V alloy. **Materials Science & Engineering**, A190, p. 173–180, 1995.

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

CHRISTOPHER, J. D. Selection of cutting tool materials, Ceramic cutting tools- Materials, **development and performance**, Noyes Publications, 1994.

CUNHA, E. A. **Estudo da usinagem por torneamento da liga ASTM AA-7050 T7451**. 2004, 84f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Lorena.

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

DINIZ, A. E.; NORITOMI, P. Y. Influência dos parâmetros de corte na rugosidade. **Máquinas e Metais**. São Paulo, v. 35 (391), p. 92 - 101, 1999.

DI RAIMO, E.; PORTO, A. J. V. **Rugosidade e Espalhamento Luminoso em Superfícies de Alumínio Torneadas com Ferramenta de Diamante Monocristalino**. In: Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM, p.23-26, Uberlândia: 2001.

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

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

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

FARIA, J.C. , **Estudo da usinagem em torneamento da superliga a base de níquel NIMONIC 80A**, 2007, 88f Dissertação de Mestrado, FEG–UNESP, SP

HEINZ, A. et al. Recent development in aluminum alloys for aerospace applications. **Materials Science & Engineering A**, v. 280, (1), p. 102 - 107, 2000.

HEISEL, U.; LUTZ, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. A técnica da quantidade mínima de fluidos e suas aplicações nos processos de corte. **Máquinas e Metais**, v 34 (386), p. 22 -38, 1998.

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

JEELANI, S., RAMAKRISHNAN, K. Surface damage in machining titanium 6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy. **Journal of Materials Science**, v. 20, p. 3245 - 3252, 1985.

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

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

Kunz, H. (1982). **“Zerspanbarkeitsklassen als Grundlage für die Hartmetall-Klassifizierung**. WT-Z. in der Fertigung 72.

LANNA, M.A. et al., **Torneamento de ferro fundido cinzento com ferramentas cerâmicas a base de nitreto de silício produzidas por sinterização normal**, In.48 Cong. Brasileiro de Cerâmica, 2004, Curitiba – P.R. Anais.

LÓPEZ DE LACALLE, L.N., LLORENTE, J.I., SÁNCHEZ, J.A. **Improving the cutting Parameters the machining of Nickel and Titanium alloys**, in **Annals of the CIRP**, v. 47, 1998.

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

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.

MASON, F. Usinando a seco, ou quase a seco. **Máquinas e Metais**. v.37 (424), p 160-173, 2001.

MAY, P.W., CVD Diamond – a new Technology for the Future?, copy of an article which appeared in **Endeavour Magazine** 19(3), 1995 pp101-106.

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

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

MIRANDA, G. W. A., “**Uma contribuição para aplicações em controle adaptativo otimizado no torneamento**”, Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 1997. 100p, Tese (Mestrado).

MITSUBISHI CARBIDE, Ferramentas de Metal Duro para Usinagem, **Mitsubishi Materials Corporation**, 2001-20025, CB005PB.

MOREIRA, M.R.V., **Estudo da usinagem por torneamento da liga Ti-6Al-4V**, Faculdade de Engenharia Química de Lorena- FAENQUIL, Lorena-SP, 2002, 119p, Tese (Mestrado).

MOSTAGHACI, H., Advanced Ceramic Materials, **Key Engineering Materials**, vols. 122-124, Copyright, 1996.

NAKAGAWA, H., “Mínima quantidade de lubrificação não agride o meio ambiente”, **Máquinas e Metais**, No. 415, pp. 40-49, agosto, 2000.

NARUTAKI, N., UAMANE, Y., TASHIMA, S., KUROKI, H., 1997, “**New advanced ceramic for dry machining**”, CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 46, No. 1, pp. 43-46.

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

PIRES, J. R. E DINIZ, A. E. Evitando o desperdício de ferramentas de toronar: uma aplicação em chão de fábrica. **Máquinas e Metais**, v. 32 (370), p. 73-75, 1996.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

WERTHEIM R., Improved Tool Life with Silicon Nitride, **Machine and Tool Blue Book**, 1986, 66.

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

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Utilização ferramentas cerâmicas com variações de geometrias.
- 2- Monitoramento da variação da microdureza da superfície usinada quando do torneamento de INCONEL 718 com ferramentas cerâmicas.
- 3- Estudo da influência da velocidade de corte e avanço na formação do cavaco na usinagem do inconel 718 com ferramentas cerâmicas.
- 4- Estudo do comportamento da rugosidade superficial em operação de torneamento externo das superligas de níquel em termos de textura da peça.