

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
UNESP - Guaratinguetá**

**TARCÍSIO ANTUNES DOS SANTOS JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DA USINAGEM DO INCONEL 718**

**Guaratinguetá  
2011**

**TARCÍSIO ANTUNES DOS SANTOS JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DA USINAGEM DO INCONEL 718**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

**Guaratinguetá  
2011**

S237a Santos Junior, Tarcisio Antunes dos  
Avaliação da usinagem do INCONEL 718 / Tarcisio  
Antunes dos Santos Junior. - Guaratinguetá: [s.n.], 2011  
53 f.: il.  
Bibliografia: f. 51-53

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica –  
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de  
Guaratinguetá, 2011  
Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

1. Usinagem I. Título

CDU621.9

AVALIAÇÃO DA USINAGEM DO INCONEL 718

TARCISIO ANTUNES DOS SANTOS JUNIOR

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

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

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO  
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA  
UNESP-FEG



Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO  
UNESP-FEG

dezembro de 2011

## **DADOS CURRICULARES**

### **TARCÍSIO ANTUNES DOS SANTOS JÚNIOR**

NASCIMENTO	12.08.1980 – APARECIDA / SP
FILIAÇÃO	Tarcísio Antunes dos Santos Neli Aparecida Teixeira dos Santos
1997/1999	Curso Técnico em Mecânica Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá – UNESP
2005/2011	Curso Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista – UNESP - Guaratinguetá

de modo especial a meus pais Neli e Tarcisio Santos que tanto me inspiraram durante minha infância e a minha noiva Talita que vêm me inspirando desde que a conheci.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me dar saúde, esperança e fé, e que nos caminhos diversos me guiou com sabedoria,

ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Valério, por todo apoio e orientação para que pudéssemos realizar este trabalho,

aos meus pais, Neli e Tarcisio Santos, por sempre terem me incentivado nos estudos,

à minha noiva Talita, por ser meu suporte, me auxiliando e apoiando em todos os momentos, principalmente nos momentos que mais precisei,

ao professor Júlio Cesar dos Santos, cujo trabalho anterior serviu de inspiração para elaboração do presente trabalho,

aos meus colegas e amigos, que já formados, formandos ou que ainda irão se formar em anos seguintes, contribuíram de algum modo para o êxito dessa minha caminhada, pois entre momentos de estudo e descontração, nos apoiamos mutuamente e todos iremos alcançar nossos objetivos,

à UNESP de Guaratinguetá, em especial aos funcionários, técnicos e professores, que contribuíram de alguma forma para minha formação profissional e pessoal.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

- **VILLARES METALS** – pela doação do INCONEL 718,
- **SECO TOOLS** – pela doação do suporte e ferramentas utilizadas no desenvolvimento do trabalho,
- **SANDVIK COROMANT** – pela doação de ferramentas utilizadas no desenvolvimento do trabalho,
- **UNESP de Guaratinguetá** – pela disponibilização do laboratório de usinagem e de pessoal técnico para que pudéssemos desenvolver os trabalhos.

"Não sabendo que era impossível, foi lá e fez"

Jean Cocteau

SANTOS JR, T. A. DOS **Avaliação da Usinagem do Inconel 718**, 2011. 53 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

## **RESUMO**

As superligas de níquel são conhecidamente um material de difícil usinagem, possuem algumas propriedades como alta dureza, alta resistência a altas temperaturas, afinidade para reagir com o material da ferramenta em altas temperaturas, etc. As indústrias aeroespacial, biomédicas e petroquímicas necessitam cada dia mais da utilização de materiais que resistam a processos e ambientes agressivos, onde o uso de materiais metálicos se torna inviável. Nessas utilizações, torna-se crescente o uso das superligas à base de níquel, como o Inconel 718, e cada vez mais se faz necessário o estudo de técnicas e ferramentas que melhorem a qualidade da usinagem desse tipo de material. Para as superligas e ligas resistentes a altas temperaturas estima-se que a dificuldade na usinagem se dá pela combinação de forças de corte relativamente altas, combinadas com as altas temperaturas que se desenvolvem durante o processo de usinagem causando deformações ou quebra na ferramenta de corte. Este trabalho tem por objetivo desenvolver o estudo da usinagem por torneamento cilíndrico externo da liga à base de níquel Inconel 718, visando a otimização da usinagem desta liga, buscando proporcionar aumentos reais de produtividade sem a necessidade de investimentos em novos meios de produção. Os ensaios de usinagem foram realizados com ferramentas de metal duro comerciais e os resultados comparados entre si a fim de se identificar quais as melhores ferramentas e parâmetros para usinagem dessa liga. Concluiu-se que a ferramenta TNMG160408-23-classe 1005 – com cobertura e com parâmetros de corte 60\_15\_08 foi a que apresentou melhor rendimento nesse ensaio realizado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Usinagem, Superligas de Níquel, Torneamento, Inconel 718, Ferramenta Metal Duro.

SANTOS JR, T. A. DOS; **Evaluation of Inconel 718 machining**, 2011. 53 f. - Graduation Work for Mechanical Engineering - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista – UNESP - Guaratinguetá, 2011.

### **ABSTRACT**

The nickel superalloys are known as being a material with poor machinability, they have some properties like high hardness, good resistance at high temperature, tendency to weld with the tool material at high temperature, etc. In the aerospace, biomedical and petrochemical industry, are increasing the need to use materials that resist to aggressive process and environment. In these uses, it has increased the use of nickel-based superalloys like Inconel 718 and consequently the need to research new techniques and tools to improve the machinability of this material. For the superalloys and resistant alloys at high temperatures is considered that the difficulty in the machining regards to the combination of the relatively high cutting forces and high temperatures that grow during the machine process, causing deformation or breakage of the cutting tool. This work purpose is to develop the study of the machining of external cylindrical turning of the nickel based alloy Inconel 718, using ceramic tools, seeking the optimization of machining this alloy, looking to provide real productive increases without the need of investments in new production means. The machining test were accomplished using commercial hard metal tools and the results were compared each other to find the best tool and the best parameter. The conclusion is that the tool TNMG160408-23 -class 1005- was the better one, when used with the parameter 60\_15\_08.

**KEYWORDS:** Machining, Nickel Superalloys, Inconel Alloy 718, Hard Metal Tool

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de tipos de cavacos na usinagem de metais .....	15
Figura 2 - Corpo de prova Inconel 718 – 80x290mm .....	37
Figura 3 - Inserto de Metal Duro Revestido e Sem Revestimento .....	38
Figura 4 - Suporte para inserto – Fabricante Seco Tools .....	38
Figura 5 - Máquina Ferramenta – CNC Romi Centur 30S.....	39
Figura 6 - Rugosímetro portátil Mitutoyo .....	40
Figura 7 - Lupa aumento 8x Sandvik Coromant .....	40
Figura 8 - Usinagem Inconel 718 .....	41
Figura 9 - Gráficos de desgaste em função do comprimento de corte .....	43
Figura 10 - Gráficos de rugosidade “Ra” em função do comprimento de corte para as ferramentas com cobertura .....	45
Figura 11 - Gráficos de rugosidade “Ry” em função do comprimento de corte para as ferramentas com cobertura .....	45
Figura 12 - Gráficos de rugosidades “Ra” e “Ry” em função da velocidade de corte para as ferramentas sem cobertura .....	46
Figura 13 - Cavacos da usinagem com ferramentas com cobertura.....	47
Figura 14 - Cavacos da usinagem com ferramentas sem cobertura .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de nomes comerciais de Ligas de níquel .....	22
Tabela 2 - Composição típica do Inconel 718 .....	30
Tabela 3 - Composição química do Inconel 718 (fornecimento Villares) .....	36
Tabela 4 - Parâmetros de corte utilizados no ensaio .....	41

## SUMÁRIO

1	<b>-Introdução</b> .....	13
1.1	-Objetivo do trabalho.....	14
2	<b>-Revisão Bibliográfica</b> .....	15
2.1	-Usinagem.....	15
2.2	-Fluido Lubrificante.....	17
2.3	-Usinagem de ligas especiais.....	18
2.4	-Ligas a base de Níquel .....	20
2.4.1	- Tipos de ligas de Níquel segundo Zavaglia et al. (2004) .....	22
2.4.1.1	-Níquel e Níquel ligado .....	23
2.4.1.2	-Ligas de Níquel-Cobre .....	24
2.4.1.3	-Ligas de Níquel com Cromo, Ferro e Molibdênio .....	25
2.4.2	-Superliga Inconel 718 .....	27
2.5	- Ferramentas de corte .....	31
2.5.1	-Ferramenta de Metal Duro .....	34
3	<b>-Materiais e métodos</b> .....	36
3.1	-Material utilizado .....	36
3.1.1	-Corpo de prova .....	36
3.1.2	-Ferramentas de corte .....	37
3.2	-Equipamentos .....	38
3.2.1	-Torno CNC .....	38
3.2.2	-Rugosímetro Portátil .....	39
3.2.3	-Lupa.....	40
3.3	-Metodologia .....	41
4	<b>-Resultados e discussão</b> .....	43
5	<b>-Conclusões</b> .....	49
	<b>-Referências Bibliográficas</b> .....	51

## 1 INTRODUÇÃO

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

A demanda desse tipo de material parte das indústrias petroquímicas, biomédicas, estruturais e principalmente das aeroespaciais, onde superligas são utilizadas em componentes de grande exigência, principalmente quanto à estabilidade e resistência a altas temperaturas, como na turbina e peças de fixação da mesma.

As superligas designam uma ampla variedade de ligas à base de níquel, cobalto, titânio e ferro, desenvolvidas principalmente para aplicações que exigem propriedades físicas e químicas excepcionais a elevadas temperaturas.

As ligas à base de níquel são manufaturadas de forjados (barras, chapas, grandes forjados) e fundidos e 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 à oxidação, em alta temperatura. As ligas a base de níquel forjado, atualmente, são desenvolvidas com aproximadamente 80% de níquel e 20% de cromo (EZUGWU, *et al.* 2003).

Dentre essas ligas à base de níquel o Inconel 718 se destaca por suas excepcionais características de resistência a altas temperaturas. O Inconel é uma marca registrada da *Special Metals Corporation* que se refere a uma família de austeníticos de níquel-cromo com base em superligas. Essas ligas são normalmente utilizadas em aplicações de altas temperaturas e muitas vezes referidas em inglês como “Inco” ou como “Iconel”.

O Inconel 718 é conhecidamente um material difícil de usar, devido algumas de suas propriedades como alta dureza, alta resistência a altas temperaturas, afinidade para reagir com o material da ferramenta e por sua baixa difusibilidade térmica (CHOUDHURY, *et al.* 1998).

Segundo Ezugwu *et al.* (2003), algumas das principais dificuldades encontradas na usinagem das superligas de níquel são devido sua alta resistência e dureza a quente, ocasionando deformação ou quebra da ferramenta, à matriz austenítica da liga que promove rápido endurecimento que causa desgaste da ferramenta, à baixa condutividade térmica desses materiais (o que gera altas temperaturas na interface ferramenta-cavaco-peça) e também à soldabilidade do material da peça formando aresta postiça de corte, o que compromete a qualidade do acabamento superficial da peça usinada.

Para se obter uma boa qualidade de usinagem dessas ligas, deve-se controlar alguns dos principais parâmetros de corte, como avanço, profundidade e velocidade de corte, sendo que, para tal, deve-se ter um bom conhecimento da estrutura dos materiais envolvidos, dos efeitos destes sobre o comportamento da ferramenta e sobre a eficiência do processo. A grande dificuldade está em achar quais são os melhores parâmetros para cada tipo de usinagem.

## **1.1 Objetivo**

O principal objetivo deste trabalho é o estudo da usinagem por torneamento cilíndrico externo de uma liga Inconel 718 utilizando ferramentas de metal duro, analisando alguns fatores como o tipo de rugosidade encontrada, tanto média ( $R_a$ ) como total ( $R_y$ ), o tipo de desgaste em função do comprimento de corte, o tipo de cavaco formado, e tudo isto para vários diferentes parâmetros de corte e diferentes tipos de ferramenta, a fim de se identificar qual o melhor parâmetro aliado a melhor ferramenta para usinagem dessa superliga.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Usinagem

Operações de usinagem são aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, que produzem cavaco. O cavaco é definido como a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1970).

Segundo Chiaverini, (1986), nas operações de usinagem uma porção de material das peças é retirada pela ação de uma ferramenta que é chamada de ferramenta de corte, produzindo então o cavaco, que é caracterizado por forma geométrica irregular, como ilustrado na figura 1.

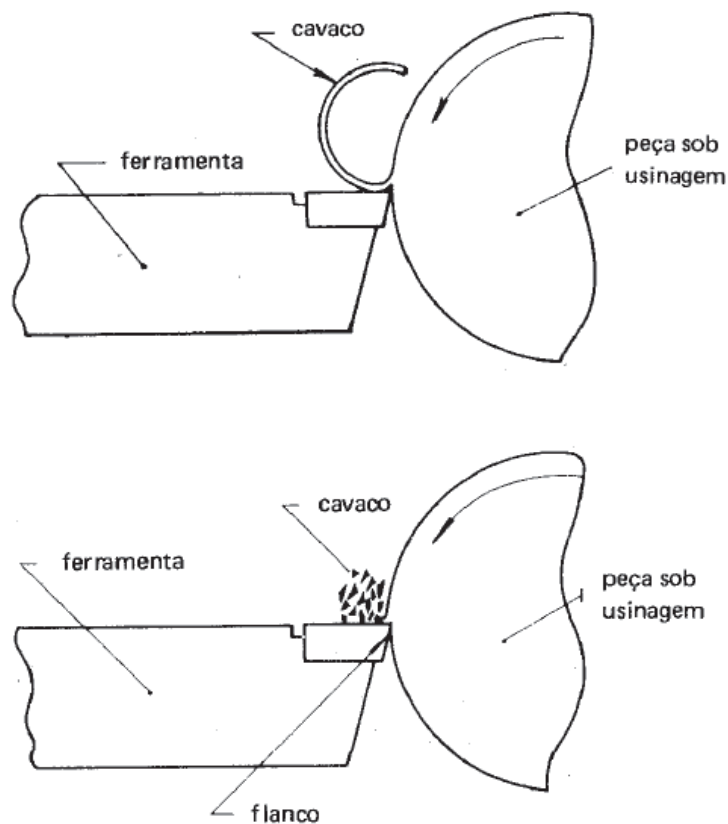


Figura 1- Exemplo de tipos de cavacos na usinagem de metais

A variedade de máquinas operatrizes e ferramentas de corte disponíveis é muito grande, assim como é grande o número de operações de usinagem. De modo geral, as operações de usinagem podem ser classificadas como: torneamento, aplainamento, furação, mandrilamento, fresamento, serramento, brachamento, roscamento, retificação entre outros como brunimento, lapidação, espelhamento, polimento, afiação, limagem, etc ( CHIAVERINI, 1986).

A importância da remoção de materiais pela usinagem é verificada quando se considera o total dos custos associados a esta atividade, incluindo o custo despendido com ferramenta, mão-de-obra e todo capital investido. Por exemplo, nos Estados Unidos, o custo anual associado com esse tipo de remoção de material é estimado em cerca de 10% do Produto Nacional Bruto (SHAW, 2005).

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavaco em torno de 10% da produção de metais e empregando milhões de pessoas. Mas apesar dessa popularidade, trata-se de um processo ainda bastante imprevisível. A usinagem possui ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático, porém, que envolve um número bastante grande de variáveis, o que torna muito difícil fazer uma previsão do que ocorre durante o andamento do processo. Para um aumento de desempenho das operações de usinagem, torna-se necessário um estudo de vida da ferramenta, das forças de corte, potência consumida e superfície final para uma melhoria da performance econômica das operações de usinagem ( MACHADO, *et al.* 2009).

Podemos definir usinabilidade como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro, que é tomado como padrão. Em outras palavras, usinabilidade pode ser entendida como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Pode-se ter um material que tenha uma boa usinabilidade quando se leva em conta um propriedade de usinagem, como a vida da ferramenta, e quando se leva em conta outra propriedade, como a rugosidade da peça usinada, essa usinabilidade pode não ser tão boa (DINIZ, *et al.* 2001).

Na usinagem, o desenvolvimento de novas geometrias e novos materiais para a fabricação de ferramentas associado a novos projetos de máquinas-ferramenta

abreviaram radicalmente os tempos diretos de processo. Para as máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado), em específico, o fator tempo de processo é reduzido substancialmente pela eliminação dos tempos improdutivos englobando várias operações em uma só máquina (MASTELARI, 1996).

## 2.2 Fluido Lubrificante

A introdução dos sistemas de lubrificação e refrigeração, quando feitos de maneira eficiente, é umas das maneiras de se minimizar os efeitos dos tempos improdutivos causados pelos desgastes das ferramentas. 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. Pesquisas mostram que 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 (MACHADO, *et al.* 2000).

Em 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 (FARIA, 2007).

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.

Para atender as normas da série ISO 14000, é necessário aumentar os custos de

produção em torno de 16% para que se tenha um controle rigoroso da produção sem causar danos ao meio ambiente e garantia de segurança. 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 (NAKAGAWA, 2000

Segundo Santos (2010), são cada vez mais freqüentes os argumentos a favor da usinagem de materiais sem uso de fluido de corte, para tal se desenvolveu novas pastilhas que possibilitassem essa aplicação, permitindo o torneamento de materiais com alta dureza, com alta desempenho, sem o uso de fluidos de corte.

### **2.3 Usinagem de ligas especiais**

As indústrias aeronáutica e aeroespacial, diante das mudanças ocorridas nos últimos anos no transporte aéreo e no desenvolvimento de novos produtos, exigem disponibilidade de novos materiais que contenham quantidade de informações suficientes para seu processamento (HEINZ, *et al.* 2000).

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

As superligas são designadas para um ampla variedade de ligas à base de níquel, cobalto e ferro, desenvolvidas especificamente para aplicações que exigem propriedades químicas e mecânicas excepcionais em elevadas temperaturas. Estas ligas possuem elevado teor de elementos de liga, os quais são responsáveis por suas propriedades térmicas e mecânicas, por outro lado, essas características e a afinidade para reagir com o material da ferramenta dificultam demasiadamente a usinagem, podendo classificá-las como um material de “difícil usinagem” (SANTOS, 2010).

Materiais especiais como ligas para motor de avião, aço temperado e cerâmica estrutural fornecem um sério desafio para o corte durante a usinagem devido à sua combinação única de propriedades como resistência a altas temperaturas, dureza e

resistência ao desgaste químico. Embora essas propriedades sejam requisitos desejáveis de projeto, as altas tensões e temperaturas geradas dificultam muito o processo de usinagem. A baixa condutividade térmica dessas ligas resulta em concentração de altas temperaturas na interface ferramenta-peça, o que é agravado com a redução significativa na resistência e na dureza da ferramenta de corte, acelerando o desgaste da ferramenta por processos mecânicos (abrasão e atrito) e térmicos (difusão e deformação plástica). Com isso, pode-se dizer que as ferramentas de corte utilizadas para usinagem de materiais especiais, como os aeroespaciais, devem ser capazes de manter sua dureza e outras propriedades mecânicas mesmo em altas temperaturas produzidas na usinagem de alta velocidade (EZUGWU, *et al.* 2003).

O efeito do fluido refrigerante no trabalho de materiais de difícil usinagem é bastante restrito, devido à sua evaporação prematura, ocasionado pelas altas temperaturas alcançadas nessa região. Essa evaporação não permite o acesso do fluido na interface cavaco-ferramenta e/ou peça-ferramenta. Logo, 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 na região de corte (FARIA, 2007).

A produtividade de uma usinagem pode ser significativamente aumentada empregando-se a correta combinação entre ferramenta de corte, condições de corte e máquina-ferramenta. Isso tudo irá promover alta velocidade de usinagem sem comprometer a integridade do material usinado. Isso é essencial na parte econômica, principalmente para as ligas aeroespaciais que são geralmente de difícil usinabilidade (EZUGWU, 2004).

Ainda segundo Ezugwu (2004), a usinagem de ligas especiais, principalmente as resistentes a altas temperaturas possuem aplicação maior na indústria aeroespacial e mais especificamente na produção de componentes da turbina. Essas superligas podem ser divididas em ligas à base de níquel, à base de cobalto e ligas à base de titânio. Estudos mostraram que dois terços dessas ligas são utilizados na indústria aeronáutica e o restante principalmente nas indústrias médica, química e estrutural.

A usinagem de superligas a altas velocidades também vêm recebendo grande interesse devido ao acréscimo de produtividade que acarreta, além do melhor

acabamento superficial. Alguns experimentos mostraram o impacto da ferramenta de corte (cerâmicas diversas) e parâmetros de corte na rugosidade de materiais usinados em alta velocidade variando-se parâmetros como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. O experimento mostrou que a rugosidade tende a diminuir à medida que se aumenta a velocidade de corte, mas a partir de um determinado momento o aumento da velocidade de corte gera um aumento da rugosidade superficial. Isso mostra que um bom nível de rugosidade é obtido conciliando velocidade de corte com os outros parâmetros de corte e não apenas um deles em especial (LIU *et al.* 2004).

Conforme relatado por Jemielniak (2008), devido à vasta aplicação do Inconel 718 na indústria aeronáutica e suas várias qualidades, aliadas à sua dificuldade de usinagem, ele desenvolveu um estudo da usinagem do Inconel 718 utilizando ferramentas de corte de metal duro e CBN (Nitreto Cúbico de Boro), modificando os parâmetros de corte. Neste, pode-se observar que as ferramentas de CBN obtiveram resultados melhores que os alcançados pelas ferramentas de metal duro, o que é de se esperar, devido à melhor tecnologia das ferramentas de CBN para esse tipo de aplicação. Verificou-se também que o tipo predominante de desgaste foi o desgaste de flanco. De modo geral, observou-se que nessa usinagem, a velocidade de corte e o desgaste da ferramenta interferem em muito na qualidade da usinagem, assim como as forças de corte.

## **2.4 Ligas à base de Níquel**

Não existe uma classificação sistemática para as ligas à base de níquel assim como existe para as ligas de aço ou alumínio, por esta razão, a maioria das ligas de níquel é conhecida por seus nomes comerciais ou números atribuídos por seus fabricantes como ocorre com o Inconel e Hastelloy. (Dupont, *et al.* 2009).

Segundo Zavaglia *et al.* (2004), o metal níquel é utilizado na forma pura ou como metal base de diversas ligas para a constituição de peças e estruturas de diferentes produtos metálicos onde são exigidas as suas características fundamentais

de resistência mecânica associada à resistência à corrosão, tanto à temperatura ambiente como às temperaturas elevadas. O níquel e as ligas de níquel podem ser agrupados da seguinte forma:

- níquel (de diversos graus de pureza);
- níquel ligado (com pequenos teores de elementos de liga);
- ligas níquel – cobre;
- ligas níquel – cromo;
- ligas níquel – ferro – cromo;
- ligas níquel – molibdênio.

Ainda se encontra o níquel em importantes categorias de ligas: ligas cobre - níquel, superligas com níquel, ligas com níquel para fins elétricos e magnéticos, aços com baixo teor de níquel e aços inoxidáveis com níquel. Além da classificação pela composição básica, os materiais metálicos a base de níquel podem ainda ser reunidos em dois grupos, que são as ligas de níquel endurecidas pela formação de solução sólida e o segundo grupo que são as ligas de níquel endurecidas pelo tratamento térmico de solubilização e precipitação.

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).

As ligas a base de níquel são manufaturadas de forjados (barras, chapas, grandes forjados) e fundidos e 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. As ligas a base de níquel forjado atualmente, são desenvolvidas com aproximadamente 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 à 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 outra 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 à base de níquel forjadas, as quais foram desenvolvidas, respectivamente pela Pratt and Whitney e General Electric Company no fim dos anos 1940 (EZUGWU, et al 2003).

#### 2.4.1 Tipos de ligas de Níquel (Zavaglia *et al.*, 2004)

As ligas de níquel com molibdênio têm apenas uma designação comercial (Hastelloy) seguida de um código alfa numérico como B-2C, C-276, por exemplo, o que é estabelecido pela *Cabot Corporation*.

A tabela 1 abaixo mostra alguns exemplos de outros nomes comercialmente utilizados para as ligas de níquel.

Tabela 1 – Exemplo de nomes comerciais de Ligas de níquel

<b>LIGA</b>	<b>Endurecida por solução sólida</b>	<b>Endurecida por solubilização e precipitação</b>
Níquel – cobre	Monel 400	Monel K-500
Níquel – cromo	Inconel 600	Inconel 718
Níquel – ferro - cromo	Inconel 800	Ni-Span L 902

### 2.4.1.1 Níquel e níquel ligado

As impurezas possuem a capacidade de modificar as características do níquel. Então, é necessário inicialmente distinguir os tipos usuais com teores mínimos de níquel mais cobalto ao redor de 99,5% e aqueles de elevada pureza com teor mínimo somente de níquel de 99,98% ou 99,99%. Alguns elementos de liga, como alumínio e titânio, podem ser adicionados para elevar a resistência mecânica através de tratamentos térmicos. Os tipos usuais contêm cerca de 0,5% Co, contudo esse teor residual não afeta as propriedades para os usos comuns do níquel e da maioria de suas ligas.

O níquel 200 que apresenta teor máximo de carbono de 0,08%, pode se apresentar tanto recozido quanto encruado com diferentes graus de têmpera e é o emprego mais comum na condição trabalhada (ou dúctil). Como exemplos típicos de aplicações, podemos destacar os componentes de instalações de processamento de produtos alimentares e componentes de dispositivos eletrônicos, contudo com a restrição de não operar acima de 315°C pois em altas temperaturas, ocorre a precipitação de carbono (grafitização) que pode induzir o aparecimento de fissuras devido à ação corrosiva sob tensão. Esse metal tem particular resistência à corrosão às substâncias corrosivas com exceção do hidróxido de amônia.

O níquel 201, possui teor máximo de carbono de 0,01% e é indicado para operar a temperaturas maiores do que 300°C pois não ocorre a fragilização pela precipitação de carbono. O comportamento quanto à resistência à corrosão é semelhante ao níquel 200.

O níquel 205 de composição próxima ao níquel 200 é particularmente indicado para aplicação em dispositivos eletrônicos como terminais, contatos e fios condutores de ligação. Quando são exigidas características de emissão eletrônica, que podem ser afetadas pela presença de impurezas.

O níquel 270 é indicado; exemplos típicos de aplicação são os cátodos e ânodos de válvulas eletrônicas, trocadores e blindagens térmicos e de lâmpadas fluorescentes. As propriedades de resistência à corrosão são iguais aos outros tipos de níquel.

As propriedades mecânicas desses metais são próximas e no estado recozido apresentam os seguintes níveis: limite de resistência à tração, 345 à 550 MPa; limite de escoamento (0,2%), 70 à 205 MPa e alongamento, 50-60%. Na condição encruada, um arame de níquel 200 pode atingir um limite de resistência à tração de 1000 MPa, um limite de escoamento de 931 MPa, e um alongamento de 2%. A elevação da temperatura afeta esses valores e, por exemplo, para o níquel 201, a 649°C, o limite de resistência à tração cai para 153 MPa e o de escoamento para 70 MPa, e o alongamento sobe para 74%.

#### **2.4.1.2 Ligas de Níquel-Cobre**

O níquel e o cobre formam uma série contínua de ligas em solução sólida, e constituem dois grandes grupos de ligas de importância: as ligas níquel-cobre e as ligas cobre-níquel. A seleção entre elas é condicionada pelas suas características de resistência à corrosão e de custo. Normalmente as ligas com maior resistência à corrosão são as ligas com maiores teores de níquel, porém, esta maior porcentagem de níquel eleva também o custo já que o preço do níquel é em torno de duas a três vezes maior que o preço do cobre. As ligas mais utilizadas comercialmente possuem composição aproximada de 30% de cobre, com a designação comercial Monel seguida de três números: o primeiro é 4 para as ligas endurecíveis por solução sólida, e é 5 para os endurecíveis por tratamento térmico. Essas ligas possuem boas características desejáveis principalmente em ambientes próximos ao mar, dentre as quais, podemos destacar a sua boa resistência mecânica, ductilidade e resistência à corrosão.

O Monel 400 é uma liga mais resistente que o níquel, em condições redutoras e mais do que o cobre, em condições oxidantes, e é particularmente isenta do fenômeno de corrosão sob tensão. Os produtos recozidos atingem propriedades mecânicas de 500 a 650 MPa para a resistência à tração. Como exemplos de aplicação, podemos destacar o uso em componentes de máquinas que operam com água do mar (válvulas, bombas, eixos de hélices, parafusos, etc.) e partes de equipamentos de processamento químico e de petróleo (tubos, tanques, trocadores de calor, entre outros).

O Monel K-500 tem alumínio e titânio adicionados para permitir o endurecimento por tratamento térmico. Na condição solubilizada e precipitada o limite de resistência atinge 1300 MPa. Possui resistência à corrosão parecida com a liga anterior, exceto pelo fato de ser suscetível à corrosão sob tensão. Nos elementos constituintes de máquinas e equipamentos, nos quais se utilizaria o Monel 400, mas onde são exigidos maiores níveis de resistência mecânica, emprega-se o Monel K-500.

A liga R-500 é uma versão do Monel K-500, com maior índice de usinabilidade, tendo, portanto, as mesmas propriedades e, contudo, se adaptando melhor às peças obtidas por usinagem. A presença de ferro nas ligas Monel se deve à necessidade, em alguns casos, de elevar a sua resistência à cavitação e à erosão.

#### **2.4.1.3 Ligas de Níquel com Cromo, Ferro e Molibdênio**

Essas ligas se caracterizam por ter um custo menor que as ligas Níquel-Cromo e também uma menor resistência à oxidação. Para tais pode-se incluir por exemplo os aços inoxidáveis com níquel (por exemplo, a liga de ferro com 18% Cr e 8% Ni). As ligas desse sistema possuem elevada resistência à corrosão e elevada resistência mecânica e à oxidação em temperaturas elevadas. Outros elementos de liga podem ser adicionados (alumínio e titânio) para elevar a resistência mecânica por tratamento térmico, formando precipitados de elevada estabilidade à altas temperaturas. Pode-se adicionar também o molibdênio, cuja função é igualmente elevar a resistência à corrosão e a resistência mecânica do níquel, particularmente à temperaturas elevadas. A presença de cromo, nessas ligas, se destina a elevar a resistência à oxidação. No geral, essas ligas podem ser chamadas de "ligas resistentes ao calor", destacando-se nesse grupo como "superligas à base de níquel".

A liga Inconel 600 é uma solução sólida austenítica com 76% de níquel, 15% de cromo e ainda, 8% de ferro. À temperatura ambiente, o limite de resistência à tração é da ordem de 620 MPa, o de escoamento é de 250 MPa e o alongamento é de 47%; essas propriedades são mantidas em condições de temperatura de até 500°C, e mesmo a 980°C ainda se obtém níveis razoáveis de resistência mecânica.

A liga Inconel 625 contém maior quantidade de cromo (21%) e, ainda, 9% de molibdênio e cerca de 4% de nióbio. Esses elementos aumentam a resistência da matriz austenítica sem necessidade de tratamento de endurecimento por precipitação. O aumento de resistência da matriz eleva os níveis de resistência mecânica da liga 625, em relação à 600, em cerca de 40% para o limite de resistência e de escoamento à temperatura ambiente para praticamente um mesmo alongamento.

A liga Inconel X-750 é uma liga 600 com adição de pequenas quantidades de alumínio (0,7%) e titânio (2,5%) para elevar a resistência mecânica através do tratamento de solubilização e precipitação. Na condição solubilizada ambas as ligas possuem as mesmas propriedades, contudo quando a liga X-750 se encontra na condição precipitada a resistência é da ordem do dobro da liga. A principal utilização dessa liga está em componentes mecânicos que exigem alta resistência mecânica associada com alta resistência à corrosão, como por exemplo parafusos, molas e partes estruturais de veículos aeroespaciais.

O Inconel 671 contém 46% de cromo e como esse teor excede o limite de solubilidade do cromo no níquel, a microestrutura se apresenta bifásica. O elevado teor de cromo confere resistência à corrosão em altas temperaturas, particularmente em atmosferas contendo enxofre.

A liga Incoloy 800 contém cerca de 33% de níquel, 21% de cromo e 46% de ferro e é uma solução sólida austenítica que contém precipitados de nitretos de titânio, carbonetos de cromo e carbonetos de titânio. Essa liga na condição recozida possui um limite de resistência de 616 MPa e de escoamento de (0,2%) 283 MPa. O alto teor de cromo confere à liga resistência à oxidação e à diversos meios aquosos e é praticamente isenta de corrosão sob tensão. Inicialmente foi usada como material de blindagem de elementos de aquecimento de produtos eletrodomésticos; contudo as suas características de resistência à oxidação e de fabricação permitiram ampliar o campo de aplicação na forma de tubos, barras, placas e chapas.

O Incoloy 825 contém, além do níquel, cromo e ferro, pequenas adições de molibdênio (3%) e cobre (2,2%). Resiste à corrosão intergranular por ser também uma liga estabilizada; à corrosão sob tensão em meio com cloreto devido ao seu teor de níquel (42%); à corrosão por pites em face do teor de molibdênio; e o teor de cromo

(21,5%) garante a resistência a meios oxidantes (ácidos e sais).

A liga Hastelloy B-1 com 68% de níquel e 28% de molibdênio, tem excepcional resistência à corrosão; resiste ainda à formação de carbonetos precipitados em contorno de grão, na região afetada pelo calor durante a soldagem; esse fato confere à liga elevada soldabilidade, tornando o seu uso comum na fabricação de equipamentos de processamento químico onde as junções são realizadas por processos de soldagem. A liga B-2 retém a resistência mecânica às temperaturas relativamente elevadas, mas não é tão resistente à oxidação como as ligas que contêm cromo.

#### **2.4.2 Superliga Inconel 718**

Segundo Dupont (2009), a capacidade de aumentar a resistência das ligas à base de níquel por precipitação foi uma das maiores transformações da indústria para ligas de níquel do século XX. Devido ao notável aumento da relação força x peso, e ao desenvolvimento do Inconel 718, a indústria aeronáutica foi literalmente empurrada para a idade da propulsão a jato, já que o peso dos motores e turbinas a jato poderiam ser reduzidos significativamente.

O Inconel é uma marca registrada da *Special Metals Corporation* que se refere a uma família de austeníticos de níquel-cromo, com base em superligas. Essas ligas são normalmente utilizadas em aplicações à altas temperaturas e muitas vezes referidas em inglês como “Inco” ou como “Iconel”.

O Inconel 718 é conhecidamente um material difícil de usinar, devido algumas de suas propriedades como alta dureza, alta resistência à altas temperaturas, afinidade para reagir com o material da ferramenta e baixa difusibilidade térmica (CHOUDHURY, *et al.* 1998).

As ligas 718 de composição Ni-18; Fe-18; Cr-3; Nb-5, Ti-1; Al-0.04 e C-0,004% são projetadas para serviço na faixa de 427 a 727°C. Para essas temperaturas, as propriedades mecânicas (resistência, tenacidade e fadiga de baixa e alta ciclagem) são fatores que determinam o limite de vida da superliga (XAVIER, 2009).

Segundo Bordignon (2008), o Inconel 718 à base de níquel contendo 5 à 5,5% de nióbio, é a liga mais importante entre as dezenas de superligas em uso nos mais diversos meios corrosivos ou operando em altas temperaturas. Essa liga forma nada menos que a espinha dorsal dos motores a jato. Existem ainda outras ligas à base de níquel contendo nióbio que são industrialmente importantes, como a Inconel 706 (3% de nióbio) e a Inconel 625 (3,5% de nióbio).

As superligas à base de níquel, como o Inconel 718, possuem uma estrutura com matriz austenítica que é responsável por sua baixa usinabilidade. Assim como os aços inoxidáveis, endurecem rapidamente durante a usinagem. Além disto, o tipo de cisalhamento produz um cavaco em forma de dentes de difícil manuseio. As características dessa liga acarretam altas temperaturas de usinagem (acima de 100°C) e alta tensão na zona de corte (acima de 3.450 MPa) que aceleram o desgaste de flanco, entalhe ou cratera, dependendo do material da ferramenta e das condições de corte (CHOUDHURY, *et al.* 1998).

Essa liga foi inicialmente desenvolvida como material de disco para turbofans de aeronaves, mas teve nos últimos anos seu uso estendido a outras peças de motores, como parafusos e eixos de rotor devido sua alta resistência à altas temperaturas. Foi verificado também, que seu emprego é perfeitamente adequado às indústrias: nuclear, criogênica e petroquímica. Turbinas terrestres para geração de eletricidade estão adquirindo importância crescente e a utilização dessas ligas proporciona um trabalho com maior temperatura o que aumenta também a eficiência dessas máquinas. A *General Electric* americana solucionou um problema associado à exposição de materiais a altas temperaturas utilizando a superliga Inconel 718. Dentre as várias aplicações, a principal demanda da superliga 718 ainda vem dos fabricantes de aeronaves. Segundo estudos realizados pela indústria do nióbio, 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, devido à utilização do Inconel 718. A meta dos fabricantes aeronáuticos tem sido reverter as deficiências nesse campo por meio do aumento da velocidade de rotação da turbina ( o que também aumenta a temperatura de funcionamento ), e isto só é possível com a melhora que tem sido obtida na tecnologia de fabricação das superligas à base de

níquel, especialmente a liga Inconel 718, proporcionando como resultado final uma melhora significativa nos níveis de ruído e no consumo de combustível das aeronaves.

Bordignon (2011), menciona que 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.

Normalmente, as seguintes fases estão presentes em uma superliga Inconel 718: matriz austenítica, com solução sólida intersticial e substitucional; MC; TiN; Delta; Laves;  $\gamma'$ ;  $\gamma''$ . As fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$  são as principais endurecedoras da liga e seus comportamentos à precipitação são determinados inicialmente pela quantidade de nióbio, e também pela temperatura e tempo de envelhecimento. A homogeneização incompleta do material no estado fundido ou conformado produzirá precipitação não uniforme das fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$  durante o trabalho mecânico ou tratamentos térmicos de envelhecimento. As fases sigma e laves, topologicamente empacotadas, são indesejáveis e ocorrem eventualmente. A fase delta é incoerente com a matriz  $\gamma$  e tem uma estrutura ortorrômbica. É encontrada como placas crescendo nos planos (111) ou nucleando nos contornos de grão e está associada com a perda de resistência desta liga. É usada para controlar o tamanho de grão em materiais conformados (XAVIER, 2009).

Segundo a *Special Metals Corporation* que é a empresa detentora dos direitos e que desenvolve esta liga, o Inconel 718 é uma liga níquel-cromo de alta resistência mecânica, resistente à corrosão e que pode operar em temperaturas entre -252 e 705°C. Sua composição típica é mostrada na tabela 2. Liga endurecível, pode ser facilmente utilizado até mesmo em peças de geometria mais complexas. Sua ampla utilização é conseqüência de sua alta resistência à tração, fadiga, fluência e resistência à ruptura. Exemplos de aplicações são componentes de foguetes, anéis, turbina de aeronaves e também parafusos e pequenos componentes que trabalhem em alta temperatura.

Tabela 2 – Composição típica do Inconel 718.

Níquel ( com adição de Cobalto )	50-55%
Cromo	17-21%
Nióbio ( com adição de Tântalo )	4,75-5,5%
Molibdênio	2,8-3,3%
Alumínio	0,2-0,8%
Cobalto	máx. 1%
Carbono	máx. 0,08%
Silicon	máx. 0,35%
Manganês	máx. 0,35%
Fosforo	máx. 0,015%
Boro	máx. 0,006%
Enxofre	máx. 0,015%
Cobre	máx. 0,3%

O fabricante ainda diz que para a maioria das aplicações o Inconel 718 é utilizado e endurecido por precipitação. A liga é endurecida pela precipitação de fases secundárias na matriz do metal. A precipitação dessa liga de níquel é induzida por tratamento térmico com temperaturas que variam entre 593 e 815°C. Para que ocorra perfeitamente, os agentes constituintes (alumínio, titânio ou nióbio) devem estar em solução (dissolvidos na matriz). Se eles forem precipitados como alguma outra fase ou combinados, não precipitarão corretamente e a resistência da liga será afetada. Para solucionar este problema, o material deve primeiramente ser temperado. Normalmente são utilizados dois tratamentos térmicos para o Inconel 718. A solução é temperada aquecendo-se o material entre 927 e 1010°C seguido de resfriamento rápido, normalmente em água; posteriormente o endurecimento do precipitado é feito aquecendo o material a 720°C por 8 hs seguido de resfriamento ao forno até 638°C por 18 hs, seguido de resfriamento ao ar. O segundo tratamento, consiste de aquecimento entre 1038 a 1066°C seguido de resfriamento rápido normalmente em água e posteriormente aquecido a 760°C por 10 hs seguido de resfriamento ao forno

até 650°C por 20 hs, seguido de resfriamento ao ar. Normalmente a dureza desse material fica em torno de 30 a 40 HRC. Outra característica destacada pelo fabricante é que este material pode ser facilmente soldado com a utilização do processo TIG (gás inerte tungstênio). Devido suas boas características de elasticidade, resistência mecânica e à fadiga ele também pode ser utilizado para molas. Essa combinação de boas propriedades mecânicas de corrosão e oxidação, aliada ao grande range de temperaturas onde pode ser utilizada, permite que seja muito utilizada em parafusos e peças de fixação em locais com grandes variações climáticas.

## 2.5 Ferramentas de corte

As ferramentas de corte são materiais utilizados para “cortar” matérias tanto metálicas como não metálicas por meio do desprendimento de cavaco. Essas ferramentas devem ser produzidas por um material de dureza superior ao material da peça a ser usinada para que tenham condições de cortar o material de inferior dureza. Os principais fatores que influenciam a ferramenta de corte são a dureza do material que as constituem e o ângulo da geometria de corte. Normalmente esses materiais são de aço carbono, aço rápido, metal duro ou cerâmicos e são classificadas segundo Diniz, *et al.* (2001), como segue abaixo:

- A ferramenta de aço carbono possui teores de carbono que variam entre 0,7 e 1,5% e são utilizadas em ferramentas de usinagem manual ou máquinas ferramentas mais simples como limas, talhadeiras, serras, etc. De modo geral são utilizadas para pequenas produções são pouco resistentes principalmente em temperaturas de corte acima de 250°C e possuem então a desvantagem em utilizar baixas velocidades de corte.

- A ferramenta de aço rápido possui carbono e também outros elementos de liga como o cobalto (Co), tungstênio (W), vanádio (Va), cromo (Cr), molibdênio (Mo), boro (B), entre outros. Esses elementos de liga são em parte responsáveis pela resistência ao desgaste mais elevada que o anterior, permitindo corte em até 550°C, o que possibilita trabalhar com maiores velocidades de corte.

- As ferramentas de metal duro ou carbeto metálico, também conhecidas como ferramentas de carboneto metálicos, são as ferramentas mais utilizadas na usinagem de materiais. Elas se apresentam em forma de pós metálicos, que são misturados e compactados na forma desejada e posteriormente são sinterizadas formando as peças acabadas em forma de pastilhas. Possuem grande resistência ao desgaste, bom corte a quente até 800°C possibilitando velocidades de corte de até aproximadamente 200m/min. A desvantagem é que são pouco tenazes e necessitam de suportes robustos.

- As ferramentas de metal duro revestidas, possuem como o próprio nome já diz um revestimento aplicado normalmente pelo processo de deposição física a vapor ou deposição química a vapor que pode ser em camadas simples ou múltiplas. Este revestimento aumenta a resistência ao desgaste da ferramenta.

- As ferramentas de cerâmica são pastilhas sinterizadas com teores que variam de 98 a 100% de óxidos de alumínio, possuem durezas superiores às ferramentas fabricadas de metal duro e permitem velocidades de corte ainda maiores também devido à sua capacidade de trabalhar em temperaturas elevadas.

- Os cermets são produzidos pela sinterização de óxidos e outros componentes ligados ao níquel (que também pode ser cobalto ou molibdênio), como ligante metálico. Por exemplo, o metal duro pode ser considerado um cermet. Essas ferramentas são eficazes na usinagem de aços, são resistentes ao desgaste e à cratera durante a formação do cavaco contínuo. São ferramentas de corte muito populares.

- O nitreto cúbico de boro também conhecido como CBN é uma ferramenta fabricada de material sintetizado 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 torneiar 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 torneiar ligas ferrosas duras (65 a 68 HRC). Este tipo de peça é habitualmente retificado e não usinado.

- As ferramentas de corte também podem ser fabricadas de diamante policristalino (PCD). Essas ferramentas são sintetizadas a grandes pressões e temperaturas, são ferramentas de corte ou abrasivas. 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.

· A ferramenta de corte de material cerâmico foi utilizada pela primeira vez na década de 1950, mas passou a ser utilizada de forma comercial na década de 1980 após desenvolvimento de suas propriedades. O material cerâmico possui algumas propriedades interessantes, dentre elas podemos destacar sua alta dureza à quente o que é muito importante quando se usina à altas velocidades e temperaturas, por outro lado, a baixa condutividade térmica dificulta a transferência de calor gerando altas temperaturas na região de contato cavaco-ferramenta e peça-ferramenta e principalmente a baixa tenacidade que facilita a trinca e quebra da ferramenta (DINIZ, *et al.* 2001).

· Ainda conforme Diniz *et al.* (2001), a ferramenta à base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) é composta por cristais de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) com uma fase intragranular de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), sinterizados na presença de alumina (Sialon) e/ou óxido de ytrio ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) e óxido de manganês ( $\text{MgO}$ ).

· Ferramentas de corte utilizadas para usinagem de materiais aeroespaciais ou especiais, devem ser capazes de manter sua dureza e outras propriedades mecânicas em altas temperaturas encontradas principalmente na usinagem de velocidade. Materiais para ferramentas com dureza melhorada, como carboneto cimentado (incluindo carbonetos revestido), cerâmica e nitreto de boro cúbico (CBN) são os mais freqüentemente utilizados para as ligas de usinagem motor de avião por exemplo. Apesar da dureza superior e desempenho de corte de ferramentas de CBN, ferramentas de cerâmica são geralmente preferidos para a usinagem de alta velocidade contínua por causa de seu custo muito menor (EZUGWU, *et al.* 2003).

· O principal fator que afeta o desempenho da ferramenta de corte quando usinando superligas são a alta dureza, resistência a altas temperaturas, inércia química. As superligas de níquel são normalmente usinadas com ferramentas de WC-Co e velocidades de corte de aproximadamente 50m/min. Com a introdução do Sialon, é possível atingir velocidades cinco vezes maiores. Mais recentemente, as ferramentas de alumina reforçadas com “whiskers” aumentaram ainda mais as velocidades de trabalho (CHOUDHURY, *et al.* 1998).

· As ferramentas de corte formadas por óxidos metálicos ou de cerâmicas, como são também chamadas, possibilitam altas velocidades de corte, o que requer máquinas ferramentas com altas potências de corte e rigidez mecânica. Essa cerâmica utilizada como ferramenta de corte consiste de grãos finos com alta densidade, contendo menos de 2% de porosidade. Os “*blanks*” podem ser fabricados por diferentes métodos, como por exemplo, a prensagem e sinterização dos “*blanks*” por um processo similar ao utilizado para pastilhas de metal duro. A sinterização é realizada a ar para a cerâmica de  $Al_2O_3$ . Um outro método é por pressão a quente de largos cilindros de alumina em moldes de grafite. Os “*blanks*” são fabricados com ferramentas de diamante (Sander, 2011).

· As ferramentas a base de óxido de alumina dividem-se basicamente em três classes que são: cerâmicas puras, cerâmicas mistas e alumina reforçada com “whiskers”. As cerâmicas puras são aquelas constituídas somente de óxidos. Podem ser alumina pura, constituída basicamente de finos grãos de  $Al_2O_3$  sinterizados, podendo ter também algum teor de MgO para inibir o crescimento de grão e óxido de cromo, titânio e níquel para aumentar a resistência mecânica, ou alumina com baixos percentuais de zircônio ( $ZrO_2$ ) que aumenta a tenacidade do material. As cerâmicas mistas contêm além de alumina, ou o carboneto de titânio (TiC) ou o nitreto de titânio (TiN). A alumina reforçada com “whiskers” é constituída por inclusões de monocristais de SiC chamadas “whiskers” em uma matriz cerâmica (Diniz *et al.* 2008).

### **2.5.1 Ferramenta de Metal Duro**

O metal duro é um dos materiais mais importantes utilizados para ferramenta de corte pois combina características como dureza tanto à temperatura ambiente quanto a quente, resistência ao desgaste e tenacidade. É um produto da metalurgia do pó que também pode ser conhecido como carboneto de tungstênio sinterizado. Essencialmente, o metal duro é formado por dois constituintes, sendo o primeiro um carboneto extremamente duro e de alta resistência ao desgaste que é o carboneto de tungstênio associado com algum outro carboneto (de titânio, tântalo ou nióbio), e são

esses carbonetos que conferem a dureza e resistência ao desgaste para as ferramentas. O segundo constituinte é um elemento aglomerante ou ligador, que se trata de um metal do grupo do ferro que normalmente é o cobalto e possui a função de, como o próprio nome diz, aglomerar as partículas duras de carboneto, sendo responsável pela tenacidade da ferramenta (Ferraresi, 1977).

A dureza em altas temperaturas e a tenacidade (capacidade de resistência ao choque), são propriedades exigidas para qualquer ferramenta de corte e na ferramenta de metal duro isto é encontrado. Atualmente o metal duro recoberto tem ocupado grande parte da fatia do mercado do metal duro sem cobertura, sendo que este último tem agora maior utilização em alumínio e em operações especiais (Diniz *et al.* 2008).

Ainda segundo Diniz, *et al* (2008), os diversos tipos de metal duro são classificados pela ISO em três grupos que são designados pelas letras P, M e K (dentro destes grupos existe subdivisão usando números que são P01 a P50, M01 a M40 e K01 à K40 entre outros). O grupo P possui elevada dureza e resistência ao desgaste sendo a classe mais resistente, por outro lado possui menor tenacidade. A classe K está na outra ponta possuindo entre as três a menor resistência ao desgaste, porém é a de maior tenacidade, indicada para usinagem de materiais frágeis que formam cavacos curtos. O grupo M possui propriedades intermediárias, sendo destinado a ferramentas com aplicações múltiplas, sendo recomendado usualmente para usinagem de aços inoxidáveis.

Outra característica que deve ser observada no metal duro é seu coeficiente de dilatação térmica que é cerca da metade da do aço. A importância dessa propriedade reside no fato de que o metal duro é normalmente utilizado na forma de pastilhas e essas pastilhas quando soldadas nos suportes de aço geram tensões em ambos. Porém, o metal duro resiste menos a essas tensões no momento da solda. Por este motivo recomenda-se prender a pastilha no suporte por outros meios, como a fixação mecânica (Ferraresi, 1977).

### 3– MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

#### 3.1 Material utilizado

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 290 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 alcançando dureza média de 46 HRC. A composição química nominal da liga INCONEL 718, segundo o site da Villares Metals e apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Composição química da liga Inconel 718 (fornecimento Villares).

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Fe</b>	<b>Ti</b>	<b>Al</b>	<b>Nb</b>	<b>Mo</b>
0,027	0,057	0,021	18,98	54,51	16,78	0,96%	0,5%	5,1%	3,33
%	%	%	%	%	%				%
<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cu</b>	<b>Co</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Sn</b>	<b>Zr</b>	<b>MG</b>	<b>B</b>
0,006	0,004	0,069	0,089	0,018	0,06	0,004	0,019	0,001	0,004
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

##### 3.1.1 Corpo de prova

O corpo de prova foi fornecido pela empresa Villares Metals na forma de barra cilíndrica com comprimento de 290 mm e diâmetro externo de 80 mm. O mesmo é mostrado na figura 2.



Figura 2- Corpo de prova da liga Inconel 718 – 80x290 mm (fornecimento Villares)

### 3.1.2 Ferramentas de corte

As ferramentas de corte (figura 3) utilizadas para os ensaios foram de metal duro de códigos:

- TNMG160408-23 - classe 1005 - revestida de fabricação da empresa Sandvik Coromant;

- TNMG160408-M1 - classe 883 - sem revestimento de fabricação da empresa Seco Tools.

O suporte utilizado para fixação das ferramentas foi o suporte PTGNR2020K16 de fabricação da empresa Seco Tools (figura 4).



Figura 3- Inserto de Metal Duro Revestido e Sem Revestimento respectivamente.

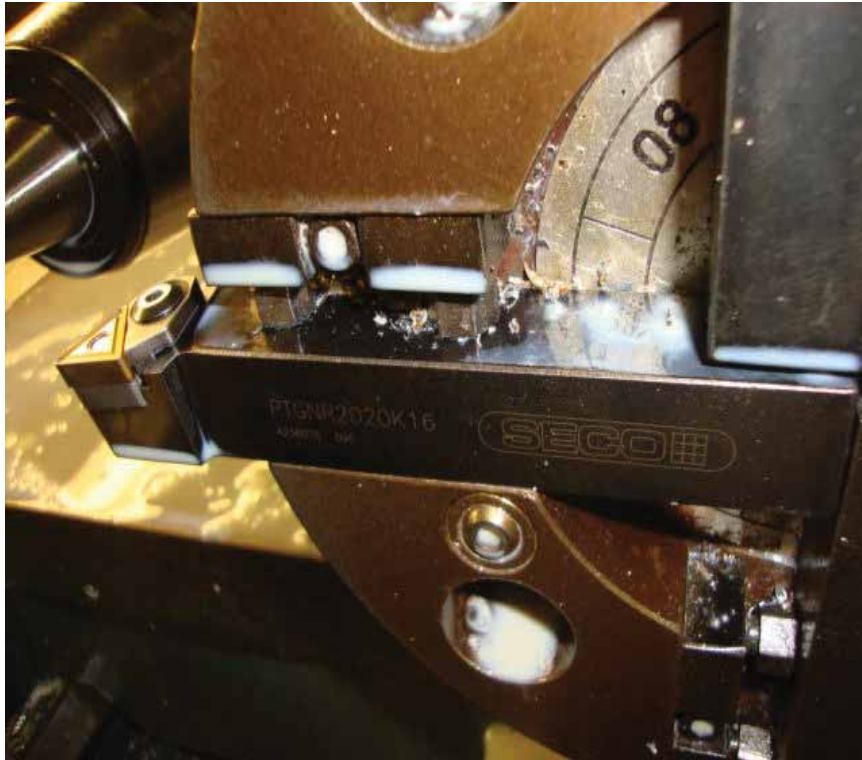


Figura 4- Suporte para inserto – Fabricante Seco Tools.

## 3.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados nos ensaios foram disponibilizados pelo Departamento de Materiais e Tecnologia do Campus da UNESP de Guaratinguetá e os testes foram realizados no laboratório deste departamento.

### 3.2.1 Torno CNC

Para os ensaios de usinagem, foi utilizado um torno CNC – MACH 9 Romi – Centur 30S – 25 a 3500 rpm e com potência de 10 kW pertencente ao Departamento de Materiais da faculdade de engenharia de Guaratinguetá (figura 5).



Figura 5- Máquina Ferramenta – CNC Romi Centur 30S (UNESP – Guaratinguetá).

### 3.2.2 Rugosímetro Portátil

Para as medidas de rugosidade utilizou-se um rugosímetro portátil Mitutoyo, tipo Surf test 301. Após cada etapa foi medida a rugosidade do corpo de prova. O rugosímetro é mostrado na figura 6



Figura 6- Rugosímetro portátil Mitutoyo (UNESP – Guaratinguetá).

### 3.2.3 Lupa

Para identificar e mensurar os desgastes nas ferramentas de corte, foi utilizado uma lupa da Sandvik Coromant com aumento de oito vezes e precisão de 0,1 mm (figura 7).



Figura 7- Lupa aumento 8x Sandvik Coromant (UNESP – Guaratinguetá).

### 3.3 – Metodologia

Foram realizados ensaios de torneamento cilíndrico externo (Figura 8), 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  $a_p = 0,8\text{mm}$  houve um melhor comportamento da ferramenta e este parâmetro serviu como referência para os demais ensaios.



Figura 8- Usinagem Inconel 718 (UNESP – Guaratinguetá).

Para os ensaios foram utilizadas ferramentas de metal duro. Para tal, utilizou-se os parâmetros apresentados na tabela 5.

Os valores são apresentados na forma: 60\_15\_08, que significa uma velocidade de corte de 60m/min, um avanço de 0,15m/rot e uma profundidade de corte de 0,8mm. Não havendo qualquer informação quanto à unidade de cada parâmetro, deverão ser consideradas as unidades de medida indicadas acima.

Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados no ensaio

<b>FERRAMENTA</b>	<b>vc (m/min)</b>	<b>ap (mm)</b>	<b>f (mm/volta)</b>
TNMG160408-23	50	0,8	0,15
TNMG160408-23	60	0,8	0,15
TNMG160408-23	75	0,8	0,15
TNMG160408-M1	50	0,8	0,15
TNMG160408-M1	60	0,8	0,15

Conforme indicado na tabela, fixados os parâmetros de profundidade de corte e avanço, iniciou-se a usinagem do corpo de prova variando o valor da velocidade de corte, a fim de se analisar a usinagem do Inconel 718 com os dois tipos de ferramentas. Após cada passo, foi analisada a rugosidade do material com o auxílio de uma lupa de aumento 8x e recolhido cavaco para análise posterior.

O comprimento de corte “Lc” foi calculado a partir da fórmula:

$$L_c = (L_f \cdot \pi \cdot D) / f \cdot 1000 \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

Sendo:

L<sub>f</sub>= adotado 145mm (metade do comprimento do corpo de prova)

D= diâmetro da peça medido no momento da usinagem para cada passo em mm

f= avanço (mm/revolução)

#### 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram inicialmente analisados os resultados referentes ao desgaste da ferramenta em função do seu comprimento de corte como mostrado na figura 9.

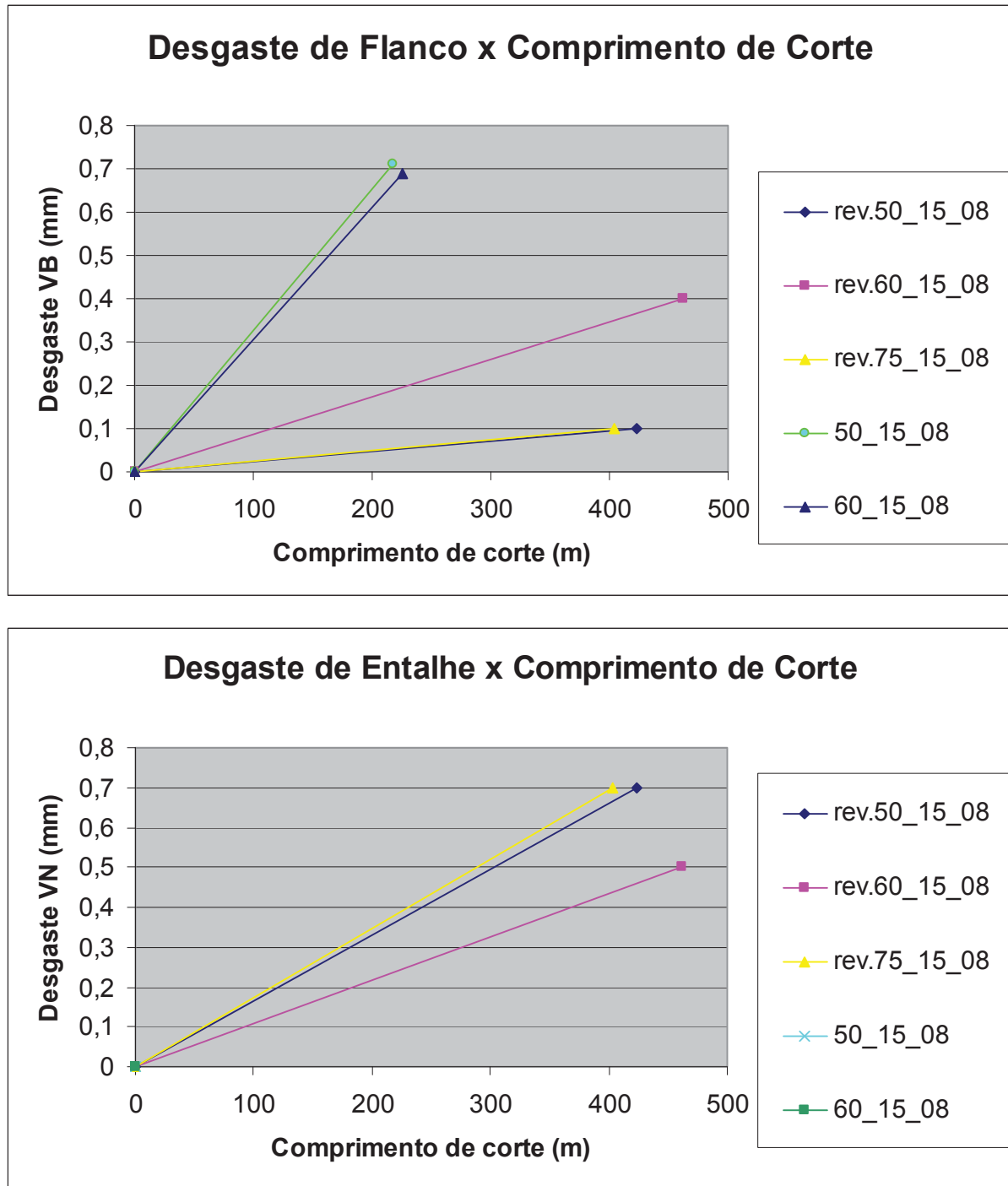


Figura 9 Gráficos de desgaste em função do comprimento de corte.

A partir dos resultados referentes ao desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, notam-se diferentes resultados dependendo do tipo de desgaste a se analisar.

Levando em consideração o desgaste de flanco VB, pode-se notar que as ferramentas revestidas com parâmetros de corte 50\_15\_08 e 75\_15\_08 possuem resultados bem próximos e esses parâmetros são os mais indicados para esta usinagem. De forma geral, percebe-se que as ferramentas revestidas possuem melhor rendimento quando comparadas com as ferramentas sem revestimento.

Porém o desgaste predominante foi o de entalhe VN, nota-se que a ferramenta com parâmetro 60\_15\_08 foi a que apresentou o melhor rendimento. Este tipo de desgaste foi identificado apenas nas ferramentas revestidas.

Essa melhor condição de trabalho também foi percebida durante os ensaios, no tipo de cavaco formado e nas demais condições de estabilidade do processo como ruído e vibração, condições que foram observadas e não mensuradas.

Outra análise realizada foi a da rugosidade em função do comprimento de corte onde percebe-se que o parâmetro 60\_15\_08 foi o que obteve melhor resultado. Com o aumento de velocidade de corte a rugosidade tende a diminuir. Mas essa melhora da rugosidade acontece até um certo limite, pois a partir de então o desgaste da ferramenta fica excessivo e acaba comprometendo o acabamento superficial. No gráfico da rugosidade Ra podemos observar que até aproximadamente 260m de comprimento de corte o melhor nível de acabamento é verificado na maior velocidade de corte, a partir desse ponto a eficiência desse parâmetro perde força em função do alto desgaste. Vale destacar que as análises foram feitas mais no final do comprimento de avanço onde as ferramentas estavam mais desgastadas.

Tal análise pode ser melhor entendida com as figuras de rugosidade Ra e Ry a seguir nas tabelas 10, 11 e 12.

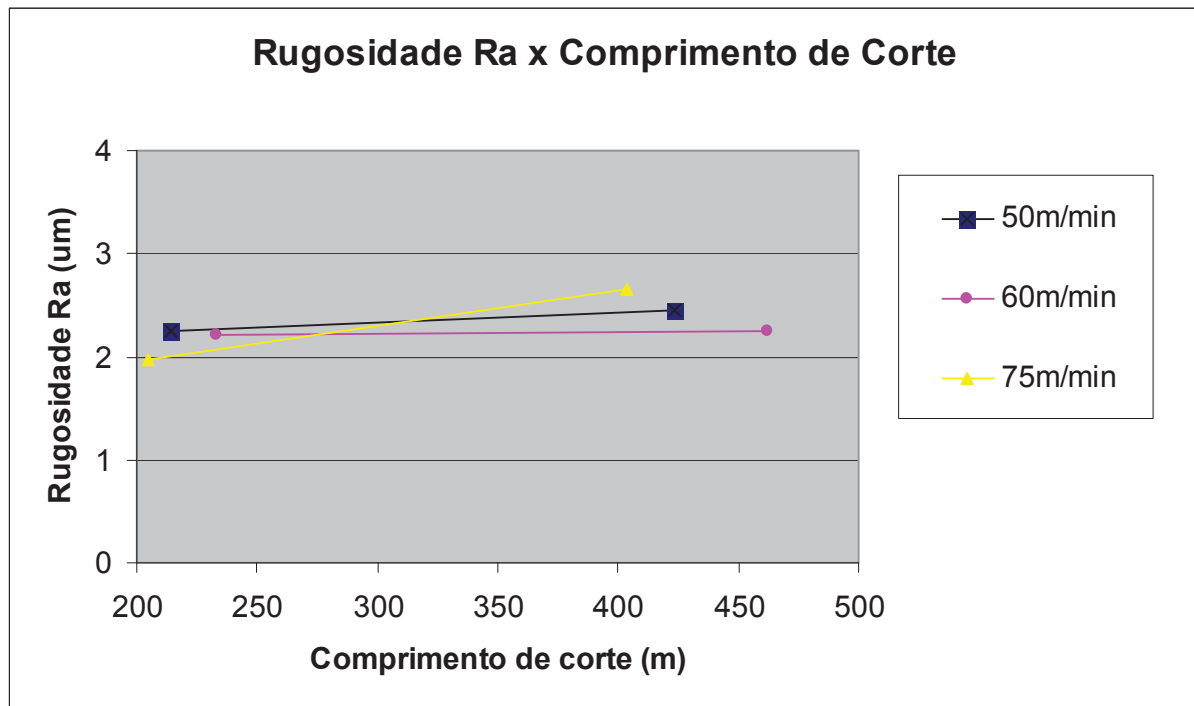


Figura 10- Gráficos de rugosidade “Ra” em função do comprimento de corte para as ferramentas com cobertura.

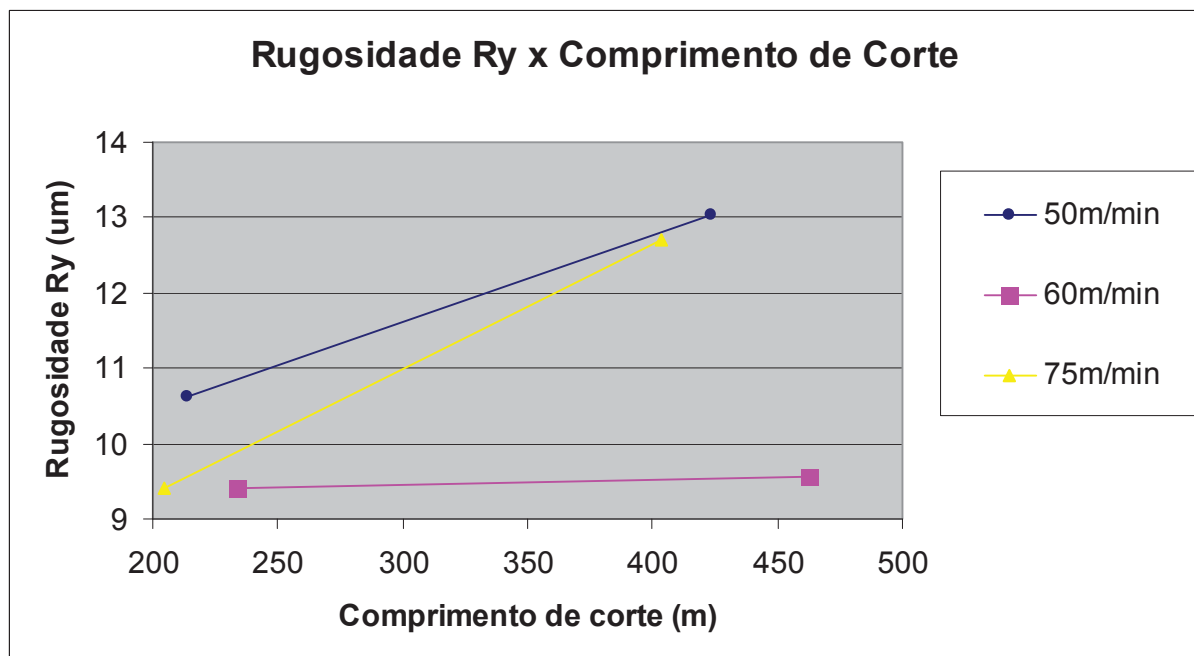


Figura 11- Gráficos de rugosidade “Ry” em função do comprimento de corte para as ferramentas com cobertura.

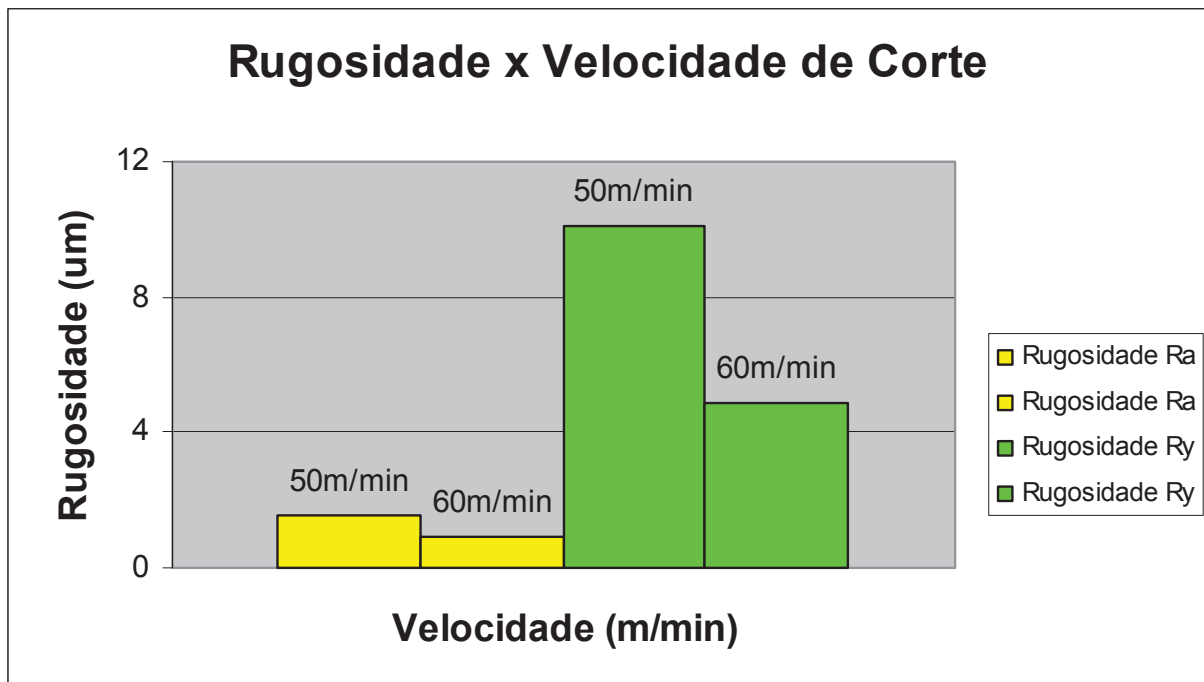


Figura 12- Gráficos de rugosidades “Ra” e “Ry” em função da velocidade de corte para as ferramentas sem cobertura.

Em relação á ferramenta sem cobertura, o desgaste prematuro não permite a mesma avaliação, de qualquer forma percebe-se a diminuição da rugosidade com o aumento da velocidade de corte.

Os resultados de rugosidade foram obtidos a partir da realização de três medidas em linha a partir da aresta do corpo de prova, utilizando-se a média dos resultados.

De modo geral, essa diminuição da rugosidade com o aumento da velocidade de corte, se deve em parte pela menor adesão com formação de aresta postiça de corte por parte do cavaco na superfície da ferramenta, proporcionando assim um corte mais uniforme e sem grande interferência na superfície gerada.

Os cavacos obtidos a partir da usinagem do Inconel 718 para as ferramentas revestidas (figura 13) e sem revestimento (figura 14) para os diferentes parâmetros analisados são mostrados a seguir.



vc=50m/min Lc=214,1m



vc=50m/min Lc=423,34m



vc=60m/min Lc=233,54m



vc=60m/min Lc=462,22m



vc=75m/min Lc=204,38m



vc=75m/min Lc=403,9m

Figura 13- Cavacos da usinagem com ferramentas com cobertura.



$vc=50\text{m/min}$   $Lc=219,0\text{m}$        $vc=60\text{m/min}$   $Lc=223,8\text{m}$

Figura 14- Cavacos da usinagem com ferramentas sem cobertura.

Em relação à variação na velocidade de corte, podemos dizer que o cavaco pouco variou para os tipos de ferramenta.

Para as ferramentas com cobertura, percebe-se melhor aspecto de cavacos para a velocidade 60m/min., onde temos um melhor controle dimensional do cavaco. Para outras velocidades tivemos cavacos de tamanhos variados que por não possuir uma boa quebra chegaram a danificar a peça em alguns pontos.

Para as ferramentas sem cobertura, percebe-se pouca diferença entre cavacos com uma pequena melhora na velocidade 50m/min., porém a qualidade do cavaco ainda é ruim. Os cavacos longos danificaram a peça em alguns pontos que dificultaram na leitura da rugosidade.

A partir dos cavacos, nota-se que apesar de as ferramentas serem similares e os quebra-cavacos possuírem praticamente as mesmas características, que na usinagem com ferramentas sem cobertura foi verificado uma maior dificuldade na quebra do cavaco.

## 5 – CONCLUSÕES

Através dos gráficos da figura 9 podemos notar o fraco desempenho em termos de vida da ferramenta para as velocidades de corte testadas (entre 50 e 75m/min). Isso ocorre em parte, devido à alta resistência do material e ao alto desgaste gerado nas ferramentas de corte. As ferramentas com cobertura se mostraram superiores às ferramentas sem cobertura quando analisamos este quesito. Dentre as ferramentas com cobertura, o tipo de desgaste predominante foi o desgaste de entalhe. O ensaio desta ferramenta com parâmetros 60\_15\_08 foi o que apresentou melhor rendimento em termos de vida da ferramenta. Para ferramentas sem cobertura o desgaste predominante foi o de flanco, mas a ferramenta se desgastou rapidamente e não ofereceu muitos parâmetros para que se pudesse compará-los (apesar da informação do fabricante de ser indicada para usinagem de superligas).

Em termos de rugosidade, nota-se que com o aumento da velocidade de corte a rugosidade diminui, porém, em certo ponto o desgaste excessivo da ferramenta faz com que a rugosidade passe a aumentar com o aumento da velocidade de corte. As ferramentas sem cobertura chegaram a apresentar um nível de rugosidade menor dentro da sua capacidade de usinagem, porém a dificuldade na quebra do cavaco fez com que em alguns pontos a peça usinada fosse danificada pelo mesmo (esses pontos foram evitados no momento da leitura da rugosidade) inviabilizando o uso dessa ferramenta também em termos de rugosidade.

Como dito, para as ferramentas sem cobertura, observou-se uma maior dificuldade na quebra do cavaco chegando a danificar a peça. Para as ferramentas com cobertura, observa-se um melhor controle dos cavacos por parte do parâmetro 60\_15\_08.

De modo geral, podemos dizer que o melhor desempenho foi da ferramenta TNMG160408-23-classe 1005 - revestida com parâmetros de corte 60\_15\_08. Podendo comentar ainda que em termos de rugosidade superficial, ela apresentou resultados significativos.

Para melhor desempenho na usinagem da liga Inconel 718, futuramente pode-se analisar a usinagem com esta ferramenta diminuindo a profundidade de corte (gerando

menor tensão de corte, menor temperatura e possivelmente menor desgaste da ferramenta), ou então, modificar o tipo de ferramenta utilizada para uma ferramenta cerâmica de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (por exemplo), que conhecidamente é mais indicada para usinagem desse tipo de superliga, por possuírem melhor resistência a altas temperaturas possibilitando assim um aumento da velocidade de corte de forma considerável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORDIGNON, P.; CARNEIRO, T.; TAQUSAGAWA, S.; HULKA, K.; **Usos e usuários finais de nióbio**. CBMM- Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração. Disponível em [www.cbmm.com.br](http://www.cbmm.com.br), acesso out/2008, 11p.

CHIAVERINI, Vicente; **Tecnologia Mecânica**. 2º ed. São Paulo: Editora Mc Graw-Hill, Vol.2, 1986. 315p.

CHOUDHURY, I. A.; EL-BARADIE, M. A.; **Machinability of nickel based super alloys: a general review**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 77, 1998. pag. 278-284.

DI RAIMO, E.; PORTO, A. J. V.; **Rugosidade e espalhamento luminoso em superfícies de alumínio torneadas com ferramenta de diamante monocristalino**. Uberlândia: COBEM, 2001. p.23-26.

DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L.; MARCONDES, F. C; **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6º edição. São Paulo: Editora M.M, 2001. 262p.

DUPONT, J. N.; LIPPOLD, J. C. ; KISSER, S. D. ; **Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys**. New Jersey, John RILEY & Sons Publication, vol. 1, 2009; 440p.

EZUGWU, E. O.; **High speed machining of aero-engine alloys**, London South Bank University, vol 26(1), 2004. 11p.

EZUGWU, E. O.; BONNNEY, J.; YAMANE, Y.; **An overview of the machinability of aeroengine alloys**. Journal of Materials Processing Technology, vol.134(2), 2003. pag 233-253.

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

FERRARESI, Dino; **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher. Vol. 1, 1977. 751p.

HEINZ, A.; HASZLER, A.; KEIDEL, C.; MILLER, W. S.; BENEDICTUS, R.; **Recent development in aluminum alloys for aerospace applications**: Materials Science & Engineering, 2000. p.102-107.

JEMIELNIAK, K.; Finishing turning of Inconel 718; Warsaw University of Technology vol. 2, Polonia, 2008, pag. 524.

LIU, Z. Q.; Wan, Y.; LIU, J. G.; **The impact of tool materials and cutting parameters on surface roughness in high-speed face-milling**; Key Engineering Materials, VOL 259, 2004. pags. 462-465.

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

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E.; **Vantagens e desvantagens do uso de fluidos de corte**. São Paulo, 2000. 419p.

MASTELARI, N.; **Desenvolvimento de um editor/simulador para centros de torneamento CN**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 1996. 100p.

NAKAGAWA, H.; **Mínima quantidade de lubrificação não agride o meio ambiente**, Máquinas e Metais, n° 415, p. 40-49, agosto, 2000.

SANDER, G.; Usinagem sem segredos – Material Cerâmico, Sorocaba, 2011.

SANTOS, JULIO CESAR DOS; **Estudo do uso de ferramentas cerâmicas na usinagem de Inconel 718**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP, 2010. 65p.

SHAW, Milton Clayton; **Metal cutting principles**. 2° ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. 651p.

XAVIER, Marcos Domingos; **Revista Eletrônica de Educação e Tecnologia**; São Paulo: SENAI, 2009.

ZAVAGLIA, C. A. C.; **Seleção de Materiais**, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, 2004, pag. 79-90.