

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Torneamento de acabamento da superliga bronze de  
alumínio utilizando ferramenta de metal duro com  
geometria alisadora**

**Daniel Assis Amancio**

**Itajubá, Julho de 2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Daniel Assis Amancio**

**Torneamento de acabamento da superliga bronze de  
alumínio utilizando ferramenta de metal duro com  
geometria alisadora**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica como  
parte dos requisitos para obtenção do Título de  
Mestre em ciências em Engenharia Mecânica.**

**Área de concentração: Projeto e Fabricação**

**Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira**

**Co-orientadora: Prof<sup>a</sup> Dra. Mirian de Lourdes  
Noronha Motta Melo**

**Julho de 2013  
Itajubá – MG**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

A484t

Amâncio, Daniel Assis

Torneamento de acabamento da superliga bronze de alumínio  
utilizando ferramenta de metal duro com geometria alisadora /

Daniel Amâncio Assis. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.

116 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira.

Coorientadora: Profa. Dra. Mirian de Lourdes N. M. Melo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Bronze. 2. Alumínio. 3. Torneamento. 4. Rugosidade. I.  
Ferreira, João Roberto, orient. II. Melo, Mirian de Lourdes N. M.,  
coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**Daniel Assis Amancio**

**Torneamento de acabamento da superliga bronze de  
alumínio utilizando ferramenta de metal duro com  
geometria alisadora**

Dissertação aprovada por banca  
examinadora em 10 de Julho de 2013,  
conferindo ao autor o título de **Mestre em  
Ciências em Engenharia Mecânica.**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa

Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Prof<sup>a</sup> Dra. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo

**Itajubá – MG**

**2013**

## **Dedicatória**

Aos meus pais, José Amâncio e Maria de Lourdes, que me deram todo apoio e incentivo e pela educação, imprescindíveis para o alcance de mais este ideal.

Aos meus irmãos Gabriel e Rafael pela amizade e apoio.

## **Agradecimentos**

Agradeço, primeiramente, a Deus e Nossa Senhora Aparecida por fazerem parte da minha vida, abençoando-me com a força, a sabedoria e a persistência necessárias para o alcance dos meus objetivos.

Aos meus pais, José Amâncio e Maria de Lourdes, pela educação e pelo exemplo de vida e de seres humanos.

Aos professores, João Roberto Ferreira e Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo, pela orientação, pela paciência e importantes contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo e funcionário do laboratório de mecânica da UNIFEI, José Veríssimo de Toledo, pelo convívio nesses dois anos, pelo apoio e pela ajuda nas atividades de laboratório.

Ao amigo Luiz Felipe Carollo pela ajuda e paciência em sempre me atender com disposição e sanar minhas dúvidas.

Ao meu amigo Luiz Eduardo Paes pela oportunidade que me deu de fazer parte dessa pesquisa sobre a superliga e principalmente pela convivência e amizade adquiridas nesses 2 anos de pesquisa na UNIFEI.

A todos os Professores do Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica da UNIFEI, em especial ao Profº Dr. Gilbert Silva, pela formação e conhecimento adquirido.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

## Resumo

**AMANCIO, D. A.** *Torneamento de acabamento da superliga Bronze de Alumínio UNS C63020 utilizando ferramenta de metal duro com geometria alisadora.* 2013. 112 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Os bronzes de alumínio são uma família de ligas a base de cobre que oferece uma combinação de propriedades mecânicas inigualáveis por qualquer serie de outras ligas. Ligas de Bronze de Alumínio tem grande aplicação devida a apresentar alta resistência mecânica e resistência à corrosão ao ser comparada com outras ligas de bronze. Com o objetivo de se obter informações para um maior entendimento sobre o torneamento da superliga bronze de alumínio UNS C63020, torna-se interessante fazer o estudo das forças de usinagem e de suas variáveis obtendo como resposta a rugosidade da peça. Estudou-se a influencia das condições de usinagem, velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem da ferramenta de metal duro e as componentes das forças de usinagem. Observou-se neste trabalho que a ferramenta com geometria alisadora e fixação positiva apresentou o melhor acabamento superficial, apesar de ter apresentado maiores componentes de força de usinagem.

### *Palavras-chave*

Bronze de alumínio, torneamento, forças de usinagem, rugosidade, projeto de experimentos.

## **Abstract**

**AMANCIO, D. A. (2013)**, *Finish turning of UNS C63020 Aluminum Bronze superalloy using carbide tools with wiper geometry*. 2013. 112 p. MSc. (Dissertation), Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

The aluminum bronzes are copper-based alloys which offer a combination of interesting properties, such as high mechanical strength and high corrosion resistance when compared with other bronze alloys. In order to obtain information for a better understanding of the finish turning of superalloy UNS C63020 aluminum bronze, this paper presents the behavior of the machining forces and surface roughness through modeling of these responses with design of experiments (DOE) . In this work was studied the influence of cutting conditions, cutting speed, feed rate, depth of cut, and cemented carbide tool geometry on the forces components and surface roughness. The experimental results showed that wiper geometry insert and positive fixation tool holder presented best surface finish, despite having the largest machining force components.

### ***Keywords***

Aluminium bronze alloy, turning, machining forces, surface roughness, desing of experiments

# Sumário

<b>DEDICATORIA</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>EPÍGRAFE</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMO</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VIII</b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XV</b>
<b>SIMBOLOGIA</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>19</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1 Justificativa	21
1.2 Objetivos	21
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>22</b>
<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
2.1 Cobre	22
2.1.1 Cobre ligados	23
2.1.2 Ligas de cobre	23
2.1.3 Bronze de alumínio	24
2.1.4 Estrutura Metalográfica do Bronze-Alumínio com Níquel e Ferro	25
2.1.4.1 Análise do diagrama Cu-Al	25
2.1.4.2 Análise do diagrama CuAlNiFe (5% Fe e 5% Ni)	27
2.1.4.3 Tratamento TQ50 (Norma AMS 4590)	29
2.2 Propriedades Mecânicas	29
2.3 Torneamento da Liga de Bronze de Alumínio	30
2.3.1 Usinagem de Ligas Especiais	30
2.4 Materiais para ferramentas de corte	38
2.4.1 Metal Duro	40
2.4.2 Metal Duro com Cobertura	43
2.5 Ferramenta de Geometria Alisadora ( <i>Wiper</i> )	46

2.6 Máquinas-Ferramenta-----	47
2.6.1 Forças de corte-----	47
2.7 Características da Superfície Usinada-----	48
2.7.1 Rugosidade-----	48
2.7.2 Efeito de Alguns Parâmetros de Usinagem no Acabamento Superficial-----	52
2.8 Mecanismo de Formação de cavaco-----	54
<b>CAPÍTULO 3</b> _____	<b>56</b>
<b>PROJETO DE EXPERIMENTOS (DOE)</b> _____	<b>56</b>
3.1 Conceituação-----	56
3.2 O Projeto Padrão-----	57
3.3 Fatoriais Completos-----	58
3.4 Análise de Variância (ANOVA)-----	60
3.5 Análise Gráfica-----	61
3.5.1 Diagrama de Pareto-----	61
3.5.2 Gráfico Fatorial-----	62
3.6 Teste para significância do modelo-----	63
3.7 Teste para significância individual dos coeficientes do modelo-----	63
3.8 Medidas de adequação de modelos de regressão-----	64
<b>CAPÍTULO 4</b> _____	<b>65</b>
<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> _____	<b>65</b>
4.1 Considerações Iniciais-----	65
4.2 Planejamento Experimental-----	65
4.3 Materiais, Máquinas, Ferramentas e Instrumentos de Medição-----	66
4.3.1 Materiais-----	66
4.3.2 Máquina-----	67
4.3.3 Ferramentas-----	68
4.3.4 Instrumentos de Medição-----	70
4.4 Metodologia dos ensaios-----	71
<b>CAPÍTULO 5</b> _____	<b>75</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> _____	<b>75</b>
5.1 Modelo de Rugosidades ( $R_a$ e $R_t$ ) para ferramenta negativa (normal e alisadora)---	75
5.2 Modelo Forças de Corte ( $F_z$ , $F_x$ e $F_y$ ) para ferramenta negativa (normal e	

alisadora)-----	83
5.3 Modelo de Rugosidades ( $R_a$ e $R_t$ ) para ferramenta positiva (normal e alisadora)---	98
5.4 Comparativo da Rugosidade Média ( $R_a$ ) entre as Ferramentas Negativa-----	106
<b>CAPÍTULO 6</b> _____	<b>108</b>
<b>CONCLUSÕES</b> _____	<b>108</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> _____	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> _____	<b>110</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Diagrama de fases Cu-Al (Ciocan, 2007)-----	26
Figura 2.2 - Diagrama CuAlNiFe com 5% Fe e 5% Ni (Ciocan, 2007)-----	27
Figura 2.3 - Microscopia eletrônica de uma liga de bronze alumínio níquel fundida (Wharton, 2008)-----	28
Figura 2.4 - Amostra transversal atacada com cloreto férrico e ácido clorídrico durante 10s-29	
Figura 2.5 - Distribuição da temperatura quando se usina titânio e aço (Ezugwu e Wang, 1997)-----	33
Figura 2.6 - Exemplo da indicação das classes de metal duro da Sandvik Coromant (Adaptada Sandvik, 2005)-----	42
Figura 2.7 - Classe S designada pela Norma ISO (Adaptada Sandvik, 2005)-----	43
Figura 2.8 - Disposição dos principais revestimentos do metal duro (Adaptada Sandvik, 2005)-----	45
Figura 2.9 - Ferramenta com geometria alisadora (wiper) – raio de ponta alisador-----	46
Figura 2.10 - Decomposição das Forças de Usinagem-----	48
Figura 2.11 - Comparação da superfície teórica com a superfície real obtida em operações de torneamento (Cunha <i>et al.</i> , 2005)-----	50
Figura 2.12 - Classificação dos erros superficiais - Rugosidade (Senai, 2002)-----	50
Figura 2.13 - Conceito de valor de <i>cut-off</i> e exclusão da ondulação Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento (Senai, 2002)-----	50
Figura 2.14 - Desvio médio aritmético Ra; Fonte: Agostinho, <i>et al.</i> (1990)-----	51
Figura 2.15 - Parâmetro de Rugosidade Rt (Agostinho 2004)-----	52
Figura 2.16 - Representação esquemática da formação do cavaco, adaptado de (Bäker; Rösler e Siemers, 2001)-----	55
Figura 3.1 - Relação entre fatores, resoluções e quantidade de experimentos (Software Minitab®)-----	58
Figura 3.2 - Exemplo do diagrama de Pareto: efeitos dos elementos e suas interações (Adaptada Paiva, 2004)-----	62
Figura 3.3 - Exemplo do <i>Factorial Plot</i> para os efeitos principais (Adaptada Paiva 2004)--	63
Figura 4.1 - Dimensão do corpo de prova utilizado-----	66
Figura 4.2 - Amostra transversal atacada com cloreto férrico e ácido clorídrico durante 10s-67	

Figura 4.3 - Torno CNC Nardini-----	67
Figura 4.4 - Processo de torneamento da liga de Bronze de Alumínio com a ferramenta fixada ao dinamômetro-----	68
Figura 4.5 - Fotos da ferramenta positiva a-Normal e b-Alisadora-----	69
Figura 4.6 - Fotos da ferramenta negativa a-Normal e b-Alisadora-----	69
Figura 4.7 - Rugosímetro utilizado no experimento-----	70
Figura 4.8 - Montagem do sistema de medição de forças de usinagem-----	70
Figura 4.9 - Variáveis de controle e de saída os experimentos Fonte: Paiva, 2010 (adaptado pelo autor)-----	71
Figura 4.10 - Posições de leitura da rugosidade nos corpos de prova-----	73
Figura 4.11 - Gráfico das componentes das forças de usinagem medidas pelo dinamômetro-----	74
Figura 5.1 - Rugosidade Ra para os pontos fatoriais para ferramenta negativa com geometria alisadora e normal-----	77
Figura 5.2 - Rugosidade Rt para os pontos fatoriais para ferramenta negativa com geometria alisadora e normal-----	77
Figura 5.3 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Rugosidade Ra-----	80
Figura 5.4 - Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na rugosidade Ra-----	81
Figura 5.5 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Rugosidade Rt-----	82
Figura 5.6 - Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na rugosidade Rt-----	83
Figura 5.7 - Força de Corte ( $F_z$ ) para os pontos fatoriais para ferramenta negativa com geometria alisadora e normal-----	85
Figura 5.8 - Forças de Avanço ( $F_x$ ) para os pontos fatoriais para ferramenta negativa com geometria alisadora e normal-----	86
Figura 5.9 - Forças Passiva ( $F_y$ ) para os pontos fatoriais para ferramenta negativa com geometria alisadora e normal-----	86
Figura 5.10 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Força de Corte ( $F_z$ )-----	88
Figura 5.11 - Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na Força de corte ( $F_z$ )-----	89
Figura 5.12 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Força de Avanço ( $F_x$ )-----	90
Figura 5.13 - Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na Força de Avanço $F_x$ ---	91
Figura 5.14 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Força Passiva ( $F_y$ )-----	92
Figura 5.15 - Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na Força Passiva ( $F_y$ )-----	93

Figura 5.16 - Variação da força de corte ( $F_z$ ) com o avanço para ferramentas normal e alisadora-----	94
Figura 5.17 - Variação da força de avanço ( $F_x$ ) com o avanço para ferramentas normal e alisadora-----	94
Figura 5.18 - Variação da força passiva ( $F_y$ ) com o avanço para ferramentas normal e alisadora-----	95
Figura 5.19 - Variação das Forças de Corte ( $F_x$ , $F_y$ e $F_z$ ) com o avanço para ferramenta alisadora-----	96
Figura 5.20 - Variação das Forças de Corte ( $F_x$ , $F_y$ e $F_z$ ) com o avanço para ferramenta normal-----	96
Figura 5.21- Tipos de cavacos gerados no torneamento do Bronze de Alumínio-----	97
Figura 5.22- Camadas sobrepostas do mecanismo de formação e também as linhas de deformação – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)-----	98
Figura 5.23 - Rugosidade $R_a$ para os pontos fatoriais para ferramenta positiva com geometria alisadora e normal-----	100
Figura 5.24 - Rugosidade $R_t$ e respectivas réplicas para os pontos fatoriais para ferramenta positiva com geometria alisadora e normal-----	100
Figura 5.25 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Rugosidade $R_a$ -----	102
Figura 5.26 - Gráficos dos efeitos principais de $v_c$ , $f$ e geometria na rugosidade $R_a$ -----	103
Figura 5.27 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Rugosidade $R_t$ -----	104
Figura 5.28 - Gráficos dos efeitos principais de $v_c$ , $f$ e geometria na rugosidade $R_t$ -----	105
Figura 5.29 - Comparação da Rugosidade $R_a$ entre Ferramenta Normal de Fixação Negativa e Positiva-----	106
Figura 5.30 - Comparação da Rugosidade $R_a$ entre Ferramenta Alisadora de Fixação Negativa e Positiva-----	107

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades do bronze de alumínio da série C63000 (ASTM, 2008)-----	25
Tabela 2.2 - Composição da fase $\kappa$ (Wharton, 2008)-----	28
Tabela 2.3 - Composição elementar das fases da liga de bronze de alumínio com níquel (Wharton, 2008)-----	28
Tabela 2.4 - Comparação entre os processos CVD e PVD (Adaptada Machado & Silva, 2009)-----	44
Tabela 3.1 - Exemplos de níveis e fatores (Adaptada Paiva, 2004)-----	59
Tabela 3.2 - Arranjo fatorial em 2 níveis para 2 fatores e uma réplica (Adaptada Paiva, 2004)- -----	59
Tabela 4.1 - Composição da liga Bronze de Alumínio-----	66
Tabela 4.2 - Geometria conforme ISO 3685 (1993)-----	68
Tabela 4.3 - Variáveis de controle-----	72
Tabela 4.4 - Planilha de contraste gerada no software Minitab para um fatorial completo com 3 fatores, 2 níveis e 1 réplica-----	73
Tabela 5.1 - Fatorial completo $2^3$ com réplicas para ferramenta negativa, para as respostas de Rugosidades (Ra e Rt)-----	76
Tabela 5.2 - ANOVA para resposta Rugosidade (Ra)-----	78
Tabela 5.3 - ANOVA do fatorial completo $2^3$ com réplicas para resposta Rugosidade (Rt)--	79
Tabela 5.4 - Fatorial completo $2^3$ com réplicas para ferramenta negativa, para a resposta das forças de corte (Fz, Fx e Fy)-----	84
Tabela 5.5 - ANOVA do fatorial completo $2^3$ com réplicas para Força de Corte (Fz)-----	87
Tabela 5.6 - ANOVA do fatorial completo $2^3$ com réplicas para Força de Avanço (Fx)-----	89
Tabela 5.7 - ANOVA do fatorial completo $2^3$ com réplicas para Força Passiva (Fy)-----	91
Tabela 5.8 - Fatorial completo $2^3$ com réplicas para ferramenta positiva, para a resposta Rugosidades (Ra e Rt)-----	99
Tabela 5.9 - ANOVA do fatorial completo $2^3$ com réplicas para resposta Rugosidade (Ra)-	101
Tabela 5.10-ANOVA do fatorial completo $2^3$ com réplicas para resposta Rugosidade (Rt)-	103

# Simbologia

## Letras Latinas

$v_c$	Velocidade de corte	<i>m/min</i>
$f$	Avanço	<i>mm/volta</i>
$a_p$	Profundidade de usinagem	<i>mm</i>
$R_a$	Rugosidade Média	$\mu\text{m}$
$R_t$	Rugosidade total	$\mu\text{m}$
$F_f$	Força de Avanço	N
$F_p$	Força Passiva	N
$F_c$	Força de Corte	N
m/min	Metro por minuto	
mm	Milímetros	
P - value	Valor P ou probabilidade estimada	
$R^2$	Coefficiente de determinação	
$R^2(\text{adj})$	Coefficiente de determinação ajustado	
$\kappa_r$	Ângulo de posição da ferramenta	

## Letras Gregas

$\alpha$	Distância dos pontos axiais em relação aos pontos centrais
$\beta$	Coefficiente do modelo matemático a ser estimado
$\varepsilon$	Erro experimental
$\mu$	Média experimental da resposta
$\sigma$	Desvio-padrão experimental da resposta
$\sigma^2$	Variância
$\Sigma$	Somatório

## Abreviaturas e Siglas

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>CNC</i>	Comando Numérico Computadorizado
<i>DOE</i>	Projetos de Experimentos ou <i>Design of Experiments</i>
<i>EQM</i>	Erro Quadrático Médio ou <i>Mean Square Error (MSE)</i>
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>TiAlN</i>	Nitreto de titânio alumínio
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials

<i>PCBN</i>	Nitreto cúbico de boro policristalino
<i>Ra</i>	Rugosidade Aritmética
<i>Rt</i>	Rugosidade Total
<i>HRC</i>	Dureza Rockwell na escala C
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>CCC</i>	Cubica de corpo centrado
<i>CFC</i>	Cubica de face centrada
<i>ISO</i>	Organização Internacional para Padronização
<i>GC</i>	Gama Coberta
<i>CVD</i>	Deposição química por vapor
<i>PVD</i>	Deposição física por vapor

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos da engenharia sempre foi a obtenção dos melhores resultados com um mínimo custo e máximo rendimento. Exemplo disso pode ser constatado analisando-se o rápido desenvolvimento do setor aeronáutico, que exigiu dos profissionais da área a procura por materiais mais resistentes, leves e de elevada relação custo-benefício. O fator competitividade mostrou-se presente nos últimos vinte anos, período no qual foi observado uma significativa melhora nos materiais e processos de fabricação desta indústria. A exigência de materiais que suportam a propagação de trincas por fadiga e a corrosão sob tensão tornou-se mais evidente ao se avaliar o tempo de vida das aeronaves de acordo com Cantor et al. (2001). A grande dificuldade reside no fato de se obter um coeficiente de segurança confiável sem influenciar no peso e no valor final do produto. Diferentes tratamentos térmicos são empregados com o intuito de alcançar este objetivo.

As ligas de alumínio constituem a maioria das estruturas presentes em um avião. A baixa densidade associada à abundância deste metal na natureza contribuem para que isso aconteça. No entanto, materiais como os bronzes de alumínio também são empregados em componentes que exigem resistência mecânica superior à oferecida pelas ligas usualmente utilizadas como ligas de níquel, cobre e alumínio. A confiabilidade a longo prazo e a resistência à corrosão atuantes em faixas de temperatura entre  $-50^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$  indicam este material para a aplicação em componentes como engrenagens, buchas, rolamentos, válvulas e hélices, apesar de seu elevado custo. Os bronzes de alumínio são uma família de ligas à base de cobre que oferece uma combinação de propriedades mecânicas inigualáveis por qualquer série de outras ligas. Esta característica faz com que muitas vezes esta liga seja a primeira escolha e, por vezes, a única escolha lógica para aplicações mais exigentes. Ligas de Bronze-Alumínio tem grande aplicação devido apresentar alta resistência mecânica e resistência à corrosão ao ser comparada com outras ligas de bronze. O torneamento é um processo de usinagem largamente utilizado nas indústrias para a produção das mais variadas peças e

componentes. No objetivo de se obter informações para um maior entendimento sobre este processo, torna-se interessante fazer o estudo das forças de usinagem e de suas variáveis obtendo como resposta o acabamento superficial (rugosidade) que é de extrema importância para alguns processos/peças (DERRIEN e SHAW, 1997).

Conhecendo-se essas variáveis e as forças sobre a ferramenta de corte, pode-se não só estimar a potência necessária à realização do corte, como também dispor de valores importantes para a construção de máquinas-ferramentas rígidas capazes de garantir um melhor desempenho. As forças de usinagem podem ainda representar um índice de usinabilidade e funcionar como parâmetro para controle adaptativo de processo (MACHADO et al, 1994; FERRARESI, 1977).

Análises científicas da usinagem dos metais, também requerem conhecimentos das forças de usinagem, e nos últimos 90 anos muitos dinamômetros capazes de medir forças com considerável precisão foram desenvolvidos (TRENT et al 1984, RODRIGUES et al 2005).

A importância do estudo do acabamento superficial aumenta na medida em que cresce a precisão de ajuste entre as peças a serem acopladas, onde somente a precisão dimensional, de forma e de posição não são suficientes para garantir a funcionabilidade do par acoplado. O acabamento superficial é fundamental onde houver desgaste, atrito, corrosão, aparência e resistência à fadiga.

O torneamento apresenta menor custo de produção tempo de preparação e melhora a qualidade global do produto (GRZESIK, 2009, HUANG, 2007 e PAIVA, 2007). Principalmente considerando a sua eficiência na redução de tempo de processamento consumido em cada operação, consumo reduzido de energia, a eliminação de refrigeração, a melhoria das propriedades dos materiais, além da capacidade de promover os valores baixos para o acabamento da superfície, removendo material da peça em um único corte, em vez de uma longa operação de usinagem (TAMIZHARASA, 2006; SING, 2007).

Esses benefícios, no entanto, só podem ser alcançados com valores adequados para os parâmetros do processo como também a escolha correta do revestimento e da geometria da ferramenta.

Huang (2005) e Lima (2005) relataram que as propriedades e composição dos materiais para ferramentas são fundamentais para o comportamento das forças de usinagem, que por sua vez pode afetar o acabamento superficial da peça.

Nesse sentido, tentando conseguir uma melhor compreensão do processo de torneamento de superligas a base de cobre e níquel, vários trabalhos tem sido feito recentemente (BENGA, 2003, SURESH, 2002).

Quisa (2008), Zhang (2007), Kwak (2005) e Yuan (2008) estudaram os efeitos das condições de corte (vc, f, ap), a influência da dureza da peça e da geometria da ferramenta na rugosidade e a integridade da superfície (rugosidade e danos na camada térmica). A maioria dessas obras estabelece uma relação entre as propriedades de saída do processo como rugosidade da peça e as forças de corte em relação à velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem.

## **1.1-Justificativa**

Superligas são conhecidas por apresentarem ótimas resistências sob tensão, compressão e corrosão. Essas características são obtidas através dos elementos de liga como o alumínio, cobre e o níquel combinados. É importante ressaltar que existem várias outras superligas destinadas a diversas aplicações.

Em função das necessidades dos clientes usinarem peças com formatos cada vez mais complexos e sendo a operação de usinagem um dos mais importantes fatores responsáveis pelo acabamento superficial da peça final, o desenvolvimento de superligas com um bom acabamento superficial é de interesse de muitas empresas. Portanto este trabalho busca-se investigar a influência que os parâmetros de corte e as forças de usinagem exercem sobre o acabamento superficial da peça, e com isso fornecer subsídios aos fabricantes de superligas para prestar apoio técnico aos clientes e também criar bases para etapas futuras no desenvolvimento de superligas com acabamento superficial cada vez melhor.

## **1.2 - Objetivos**

Analisar a influência das condições de corte e da geometria da ferramenta de metal duro no torneamento de acabamento da superliga Bronze de Alumínio UNS C63020 com dureza de 35 HRC. Durante os ensaios foram observadas as rugosidades Ra e Rt da peça, bem como as componentes das forças de usinagem como a força de corte ( $F_c$ ), a força de avanço ( $F_f$ ) e a força de profundidade ( $F_p$ ) para analisar as relações entre as variáveis envolvidas neste estudo, utilizando a técnica de projeto de experimentos (DOE).

## Capítulo 2

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1–Cobre

A procura por materiais constituídos de elementos que pudessem resistir a esforços mecânicos e possuísem a capacidade de transmitir calor de forma eficiente e fossem fáceis de trabalhar foi um desafio para a engenharia. O bronze é marcado pela substituição de artefatos fabricados em pedra, por outros, construídos a partir do metal que combina o cobre com o estanho. Tal fato desencadeou um grande desenvolvimento tecnológico na época, uma vez que implicou em uma maior produção e rentabilidade. Após o descobrimento de suas excelentes propriedades, na era industrial, o cobre passou a ser requisitado em setores que exigiam elevada condutibilidade elétrica, resistência à corrosão e diversificada gama de processos de fabricação.

Segundo Derek (1990), o cobre e suas ligas constituem um grupo de materiais metálicos das mais antigas e diversificadas utilizações. Esses materiais reúnem um conjunto de características que justificam o amplo espectro de uso, tais como: elevada condutividade elétrica e térmica, elevada resistência à corrosão, moderada resistência mecânica e facilidade de serem submetidos aos diversos processos de fabricação, como fundição, conformação plástica, soldagem, usinagem com acabamento superficial. A elevada condutividade elétrica permite o emprego do cobre de forma intensa nas instalações de condução de energia elétrica (na forma de fios de cobre) e nos equipamentos geradores e motores de diversas dimensões e potências. Os equipamentos eletrônicos, incluindo os dispositivos de microeletrônica, também utilizam o cobre como material condutor de sinais.

A elevada resistência à corrosão facilita a sua aplicação em todas as áreas, mas é de particular interesse para o emprego em sistemas de condução e processamento de determinados produtos na forma líquida ou gasosa. Quando a necessidade de elevada condutibilidade térmica está presente, como ocorre nos equipamentos de transferência de calor, o cobre e muitas de suas ligas são especificados. As diversas cores naturais do cobre e

suas ligas nas tonalidades avermelhadas, amareladas, douradas e prateadas são importantes para as aplicações onde os aspectos de aparência devem ser considerados. Existem três categorias que classificam este metal: cobres, cobres ligados e ligas de cobre. A designação, segundo a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), é a seguinte:

-Cobres (incluindo o cobre ligado com prata) - série: 10100 a 13000

-Cobres ligados-série: 14000 a 16000

-Ligas de cobre – série: 17000 a 70000

### **2.1.1 – Cobres ligados**

Os cobres ligados são aqueles que contêm uma porcentagem inferior a 3% de algum elemento adicionado para melhorar alguma das características do cobre como a usinabilidade (facilidade de usinagem), resistência mecânica e outras, conservando a alta condutibilidade elétrica e térmica do cobre. Os elementos utilizados são estanho, cádmio, ferro, telúrio, zircônio, cromo e berílio. Outras ligas de cobre importantes são latões (zinco), bronzes (estanho), cuproaluminios (alumínio), cuproníqueis (níquel), cuprosilícios (silício) e alpacas (níquel-zinco), (BENEDETTI, 2003).

### **2.1.2 – Ligas de Cobre**

Considera-se como cobre, comumente, o metal que contém 99,3% ou mais desse elemento (incluindo o teor de prata), ao qual não foi adicionado outro elemento, exceto para fins de desoxidação. Os diversos tipos de cobre dúctil – eletrolítico tenaz, desoxidado com fósforo e isento de oxigênio – apresentam um teor mínimo que varia de 99,80 a 99,99%; os teores dos elementos residuais dependem do tipo de cobre, ou seja, do tipo de processamento de refino ou desoxidação a que o metal foi previamente submetido. Para muitas aplicações um fator importante de controle é a condutibilidade elétrica. Combinação do cobre com outros elementos em teor considerável. Tal fato aumenta a resistência do material e dispensa outro mecanismo de endurecimento, como a conformação plástica. A resistência mecânica, apesar de elevada, é limitada pela temperatura de 300°C devido à fácil fundibilidade. À baixas temperaturas, no entanto, não há limitações, já que o cobre possui estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CFC). Exemplos dessa categoria são: cobre e zinco (latão), cobre e

estanho (bronze), cobre e níquel (cupro-níqueis), cobre e alumínio (bronzes de alumínio) e cobre e silício (bronze de silício), (BENEDETTI, 2003).

### **2.1.3 – Bronze de Alumínio**

Segundo ASTM, (2008), o integrante da categoria "Ligas de cobre", o bronze de alumínio apresenta até 14% de alumínio (Al), que constitui o principal elemento de liga. A elevada resistência à corrosão sob tensão, em virtude da presença de uma película refratária de óxido, possibilita uma ampla gama de aplicações na engenharia, principalmente quando diz respeito à indústria naval e aeronáutica. A escolha deste material nos setores industriais mencionados acima é decorrente do fato de sua resistência mecânica ser superior à de muitos aços, além de sua resistência à corrosão ser do nível dos aços inoxidáveis. Outros elementos também são frequentemente adicionados com o intuito de otimizar a qualidade do material. O ferro (Fe) é responsável pelo aumento da resistência mecânica por ser um refinador de grão, o manganês (Mn) contribui para uma maior soldabilidade e o níquel (Ni) melhora a resistência à corrosão.

Uma das características do bronze de alumínio é a capacidade de manter a resistência mecânica a temperaturas relativamente altas e ter um pequeno ganho na mesma quando a temperatura diminui, sem perder a excelente ductilidade. Os parafusos de pás de turbinas, que constantemente são sujeitos a temperaturas elevadas, possuem partes compostas deste material que possibilita o enfrentamento não só do efeito do calor, mas também da erosão por cavitação, um dos fatores responsáveis pela corrosão. A resistência à erosão por cavitação nesta liga é maior que a de aços inoxidáveis das séries 300 e 400 e, até mesmo, da de algumas superligas de níquel. Com isso, o ataque de bolhas de gás e o consequente impingimento pode ser evitado com sua utilização. Apesar de todas as qualidades, o elevado preço restringe sua utilização a eventos que exijam a necessidade das características que lhes são próprias. As aplicações numerosas e variadas para ligas de alumínio bronze, refletem plenamente a sua versatilidade como material de engenharia. Os bronzes de alumínio estão encontrando crescente uso na indústria química, petroquímica e usina de dessalinização, marinha, geração de energia, aeronaves, engenharia automotiva e ferroviária, ferro e aço, fabricação elétrica e construção de indústrias.

A Tabela 2.1 exibe as propriedades do bronze de alumínio da série C63000.

Tabela 2.1 - Propriedades do bronze de alumínio da série C63000 (ASTM, 2008).

<b>Propriedades das Ligas de Bronze de Alumínio (Série C 63000)</b>	
<b>Composição Química: Al~10%, Fe~3,0%, Ni~5%, Cu~balanceado</b>	
<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
Densidade	$7,58 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Módulo de Elasticidade	121 GPa
Coefficiente de Expansão Térmica	$16,2 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Condutividade Térmica	39,1 W/(mK)
Coefficiente de Elasticidade	689 MPa
Coefficiente de Cisalhamento	427 MPa
Tensão de Fadiga	248 MPa
Dureza	95 HB

## **2.1.4 - Estrutura Micrográfica do Bronze-Alumínio com Níquel e Ferro**

### **2.1.4.1 - Análise do diagrama Cu-Al**

A Figura 2.1 apresenta o diagrama Cu-Al. A concentração do Al nas ligas de bronze de alumínio é o fator que determina quão resistente é o material. Com teor até 8%, a estrutura é monofásica, possui elevada ductilidade e é endurecida principalmente por trabalho a frio. Elevando-se para a faixa de 8% a 10%, tem-se a formação de uma fase dura. Se o objetivo for aumentar ainda mais a sua resistência mecânica, basta adicionar mais Al na liga, fato que possibilitará utilizá-la principalmente em casos que exigem grande resistência à abrasão. Estes dois tipos de liga podem ser endurecidas por solubilização e resfriamento. Para temperaturas na faixa de 815 a 1010°C, duas fases estáveis se transformam na fase  $\beta$  assim como a fase  $\alpha$  +  $\text{Fe}_3\text{C}$  no aço se transforma em austenita a altas temperaturas. Se o resfriamento for o rápido, fato característico da têmpera, a fase  $\beta$  cria uma estrutura martensítica de considerável dureza resultante (BENEDETTI, 2003).

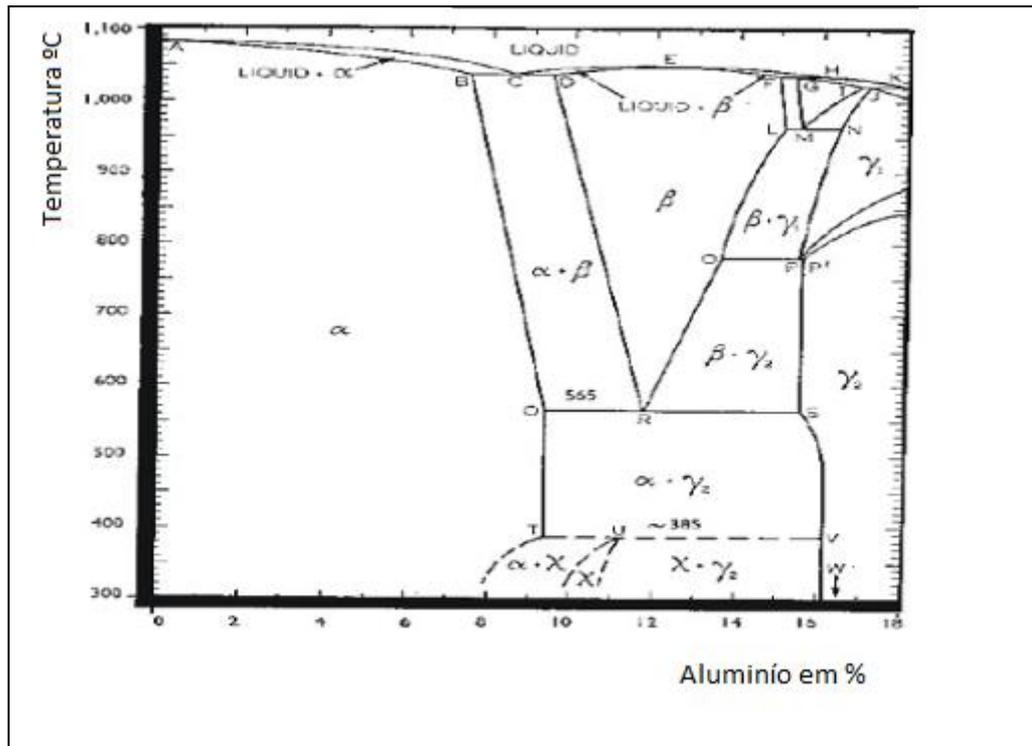


Figura 2.1 - Diagrama de fases Cu-Al (Ciocan, 2007).

Segundo *SAE International Extrusions* (2006), as fases que surgem ao variar o teor de Al na liga são descritas a seguir:

- $\alpha$  - Solução sólida, substitucional, primária, de alumínio no cobre (CFC), até 9,4% de alumínio, branda, dúctil e trabalhável a frio.

- $\beta$  - Solução sólida, com base no composto  $\text{Cu}_3\text{Al}$  com razão de valência eletrônica/número de átomos 3/2, de estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) a elevadas temperaturas, mais dura e menos dúctil que a fase  $\alpha$  e apresentando decomposição eutetóide, lamelar para 11,8% de Al, a 565°C, para  $\alpha + \gamma_2$ .

- $\gamma_1$  - Fase presente (cúbica) acima de 780°C, para ligas acima de 13,6% de alumínio, mais dura e menos dúctil que a fase  $\beta$ , difícil de ser encontrada nas ligas usuais. Similar à fase  $\gamma_2$ , existente abaixo de 780°C.

- $\gamma_2$  - Composto eletrônico ( $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ ) com estrutura CCC, bastante duro e frágil, quebradiço, semelhante à fase  $\gamma$  dos latões (razão eletrônica/átomos de 21/13).

### 2.1.4.2 - Análise do diagrama CuAlNiFe (5% Fe e 5% Ni)

Apesar do diagrama da Figura 2.1 ter mostrado diversas fases presentes na liga em estudo, sua análise é insuficiente uma vez que existem outros elementos de liga além do alumínio capazes de alterar as propriedades mecânicas do material. Diante disso, deve-se levar em consideração o diagrama apresentado na Figura 2.2, que inclui os elementos Ni e Fe. Este diagrama difere do de Cu-Al em razão da existência de uma fase  $\kappa$  composta de microconstituintes complexos. As diferentes formas em que se pode encontrar esta fase nas ligas de bronze são:

- $\kappa$  I - formato globular e rica em ferro ( $Fe_3Al$ )
- $\kappa$  II - formato globular, é menor que a fase  $\kappa$  I e está distribuída no contorno de grão
- $\kappa$  III - formato lamelar, localizada no contorno de grão e rica em Ni ( $NiAl$ )
- $\kappa$  IV - precipitado fino no interior da fase  $\alpha$  rico em ferro °C

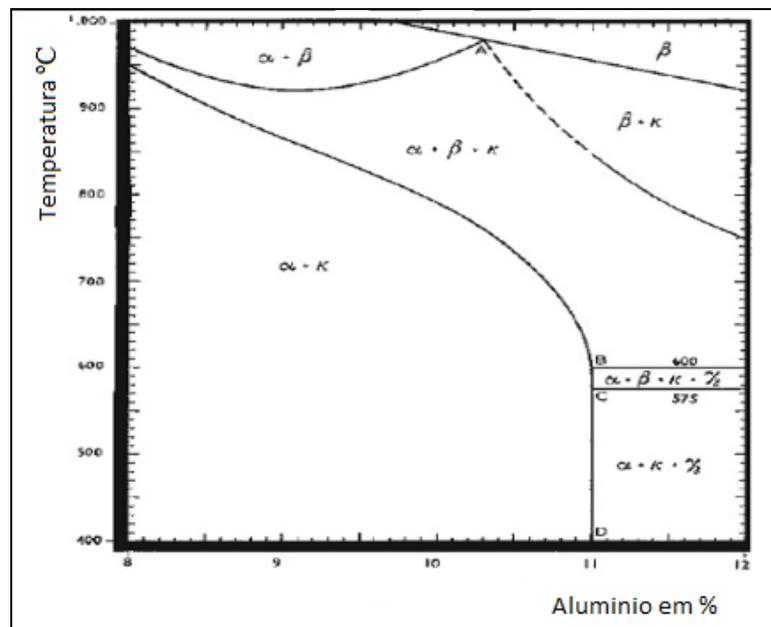


Figura 2.2 - Diagrama CuAlNiFe com 5% Fe e 5% Ni(Ciocan, 2007).

Nas Tabelas 2.2 e 2.3 são mostradas a composição elementar das fases presentes nas ligas de níquel alumínio bronze (%):

Tabela 2.2 - Composição da fase  $\kappa$  (WHARTON, 2008).

Fase	Fe (%)	Cu (%)	Ni (%)	Al (%)
$\kappa_I$	69	13	13	6
$\kappa_{II}$ e $\kappa_{III}$	26-43	13-20	23-34	18-20
$\kappa_{IV}$	-	-	-	-

Tabela 2.3 - Composição elemental das fases da liga de bronze de alumínio com níquel (WHARTON, 2008).

Fase	Al (%)	Mn (%)	Fe (%)	Ni (%)	Cu (%)
$\alpha$	8,3 +- 1,7	1,4 +- 0,1	2,7 +- 2,0	2,5 +- 1,4	85,4 +- 4,0
$\beta$ retida	8,7	1,0	1,6	3,5	85,2
$\kappa_I$	13,0 +- 5,0	2,0 +- 0,4	55,0 +- 7,0	15,0 +- 3,0	15,0 +- 5,0
$\kappa_{II}$	19,0 +- 3,0	2,2 +- 0,6	32,0 +- 3,0	27,0 +- 4,0	21,0 +- 5,0
$\kappa_{III}$	18,0 +- 6,0	2,0 +- 0,3	22,0 +- 0,7	32,0 +- 2,0	26,0 +- 4,0
$\kappa_{IV}$	20,0 +- 3,0	1,5 +- 0,3	62,0 +- 4,0	4,0 +- 1,0	13,0 +- 1,0

Wharton e Stokes (2008) ao estudar em uma liga semelhante identificaram as fases descritas acima utilizando o MEV, conforme pode ser visualizado na Figura 2.3:

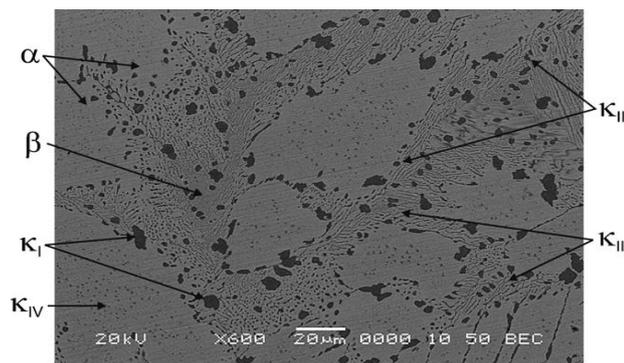


Figura 2.3. Microscopia eletrônica de uma liga de bronze alumínio níquel fundida (WHARTON, 2008).

### 2.1.4.3 - Tratamento TQ50 (Norma AMS 4590)

O tratamento térmico de têmpera induz um estado de tensões muito elevado no material, que em certos casos não é desejado. Por isso, aconselha-se fazer um alívio de tensões que consiste em permanecer com o material no forno, a uma temperatura inferior de forma a desagregar a fase  $\beta'$  formada, aumentando sua ductilidade.

Observando a Figura 2.4, percebe-se a presença da fase  $\beta'$ , que constituía grande parcela da microestrutura de têmpera, porém é decomposta durante a etapa de revenimento. Com isto, dá-se origem à microestrutura dispersa de revenido.

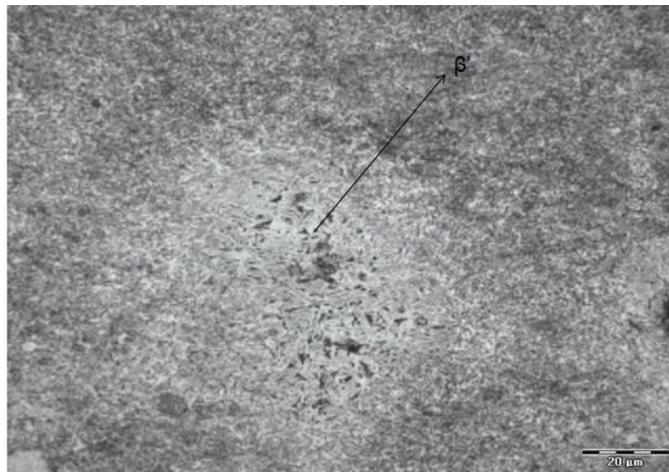


Figura 2.4. Amostra transversal atacada com persulfato de amônia durante 2 min.

(Aumento de 1000x)

## 2.2 - Propriedades Mecânicas

Algumas das ligas de bronze de alumínio tem propriedades comparáveis aos aços de baixo carbono e podem ser mais resistentes do que a maioria dos aços inoxidáveis. Elas mantêm uma proporção substancial de suas propriedades em temperatura elevada e ganha resistência a baixas temperaturas, mantendo sua ductilidade. Essas ligas possuem alta resistência combinada com alta ductilidade, baixo coeficiente de fricção contra aço e alguns outros metais, dureza comparável à do bronze manganês aliada à boa resistência à corrosão, ao choque e à fadiga. Devido a estas propriedades o bronze alumínio é aplicado em suportes de canhões, engrenagens para maquinário pesado, porcas para avanço em máquinas operatrizes, hélices, partes de bombas, guias e assentos de válvulas.

Bronzes destinados convencionalmente para mancais. Estas ligas foram desenvolvidas para substituir os chamados “bronzes fosforosos” (ligas Cu-Sn). A adição de cobre resulta em grande aumento para as qualidades de anti-fricção da liga, melhora sensivelmente a usinabilidade e facilitam o processo de fundição. Os bronzes desta classe tem hoje inteira aceitação como bronzes padrão para mancais. As diferentes aplicações e resultados obtidos com esta classe de bronze não podem ser discutidos sem a separação dos tipos de fundição e de seu consequente resfriamento. O comportamento destas ligas, quando aplicadas em mancais, deve também ser considerado sob os pontos de vista de lubrificação, carga específica e probabilidade do correto alinhamento entre eixo e mancal.

O cobre, dependendo do grau de encruamento (têmpera) e do tipo de produto (chapas, barras, fios, tubos e perfis), apresenta as seguintes faixas de propriedades mecânicas: limite de resistência de 220 a 395 MPa, limite de escoamento de 69 a 365 MPa e alongamento (em 50 mm) de 4 a 48%. Para outros tipos de cobre as faixas de propriedades mecânicas são muito próximas dessas que foram citadas.

## **2.3-Torneamento da Liga de Bronze de Alumínio**

O uso de ferramentas com ponta de carbeto de tungstênio com cobertura é considerado desejável. É muito importante que o trabalho deve ser realizado de forma rígida e que as ferramentas devem ser devidamente apoiadas. O primeiro desbaste ou corte em uma fundição deve ser profundo o suficiente para penetrar na superfície da peça, e um fluxo constante de óleo solúvel (refrigeração) é essencial tanto para desbaste e acabamento ou cortes. O trabalho pode ser mantido com ou sem refrigeração durante a usinagem de precisão, se o material aquecer, a dificuldade será experimentada em manter a precisão no torneamento. Uma alta eficiência com ferramentas de metal duro é atingida usando um avanço (f) baixo, uma profundidade de corte (ap) moderadamente alta e a mais alta velocidade de corte de acordo com a vida da ferramenta satisfatória, (*ALUMINIUM BRONZE FOR INDUSTRY, 1986*).

### **2.3.1-Usinagem de Ligas Especiais**

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

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

A usinagem no estado de fornecimento das ligas resistentes a altas temperaturas, torna-se vantajosa até próxima as 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 as 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 a integridade da superfície são mínimas e arestas agudas em operação de acabamento, onde o compromisso com integridade da superfície é maior (DINIZ *et al.*, 2008).

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 (DINIZ *et al.*, 2008).

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 e Ramakrishnan (1985), na usinagem de superligas o mal acabamento produzido na região superficial é muito diferente para cada material. O mesmo 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 por fluência, fadiga e/ou por corrosão sob tensão. Tais falhas começam por pequenas trincas na superfície das peças e são propagadas para o centro ocorrendo quebra súbita. Estas falhas dependem da ferramenta usada 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.

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

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

Um exemplo de usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas foi demonstrado por Ezugwu e Wang (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 2.6), ficando este calor retido entre a

peça e a ferramenta. Para efeito comparativo, cerca de 50% do calor gerado é absorvido na ferramenta com a usinagem do aço.

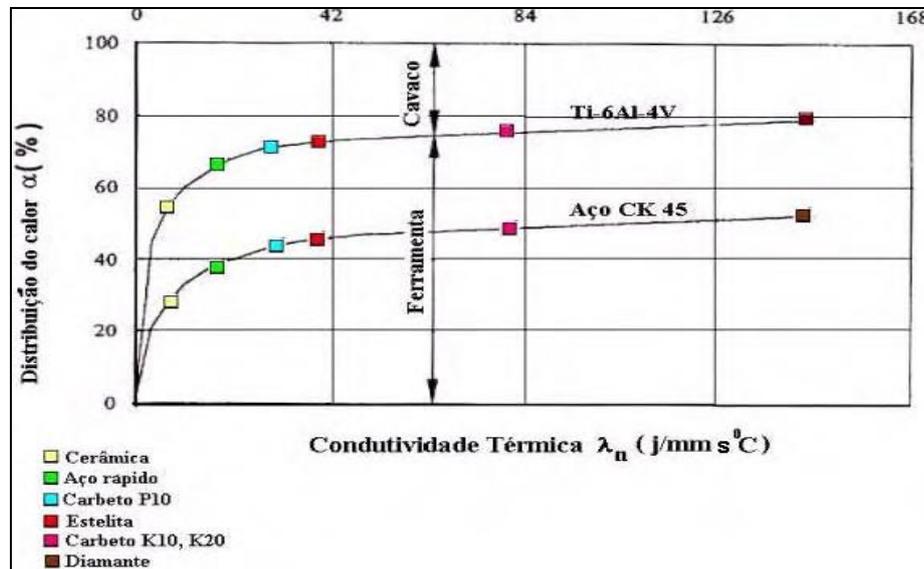


Figura 2.5- Distribuição da temperatura quando se usina titânio e aço (Ezugwu & Wang, 1997).

Quase todos os processos de manufatura possuem alterações metalúrgicas feitas para melhorar o desempenho e as propriedades dos materiais em temperaturas elevadas por isso se torna mais difícil a usinagem desses tipos de 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 (EZUGWU & WANG, 1997).

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 & BARADIE, 1998).

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.

Segundo Witting (2002) a usinagem convencional das ligas resistentes a altas temperaturas é feita com ferramenta de metal duro, classe ISO S, 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 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), nitreto de titânio (TiN) e carbeto de titânio (TiC), além de revestimento de nitreto de alumínio-titânio (TiAlN). Comparando-se estes diferentes revestimentos com o metal duro, o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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 ferramenta, 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).

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 & XIE, 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 & BAHOR, 1999).

Materiais com alta taxa de encruamento requerem muita energia para formação do cavaco devido ao valor alto da pressão específica de corte e conseqüentemente 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.*, 2008).

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 a influência que estas situações exercem no processo de formação normal de cavaco.

As superligas são normalmente usinadas com metal duro (WC - Co) com velocidades de corte na faixa de 10-30 m/min. Porém ferramentas de metal duro tradicionais não podem ser utilizadas na usinagem com alta velocidade, porque não resistem às altas temperaturas e tensões na zona de corte. Ferramentas de cerâmicas são mais adequadas para o uso em altas velocidades de corte. Com a introdução das cerâmicas do tipo *sialon* (a base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), é possível multiplicar a velocidade de corte pelo fator de 5 e, ferramentas revestidas de alumina reforçada com *whiskers* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$  - contendo 25% SiC) possibilitam utilizar velocidade de corte de até 10 vezes comparada com as ferramentas de metal duro (VIGNEAU 1997, CHOUDHURY & BARADIE, 1998 e EZUGWU *et al.*, 1999).

Richards e Aspinwall (1989) apresentam uma revisão sobre a aplicação de cerâmicas na usinagem de superligas. Foi destacado que, com o emprego de alumina reforçada com *whiskers* ( $\text{SiC}_w$ ), velocidades de corte podem chegar à 750 m/min na usinagem de algumas ligas. O desgaste de entalhe, muitas vezes, pode predominar e, nesse caso, são recomendados pequenos valores do ângulo de posição ( $\kappa_r = 45^\circ$ ) e ângulos de saídas ( $\gamma$ ) negativos. Da mesma opinião são König e Gerschwiler (1999), revelando que o ângulo de posição de  $45^\circ$  demonstrou ser favorável às operações de torneamento com ferramentas cerâmicas e PCBN. A alta condutividade térmica e o baixo coeficiente de expansão térmica dos *whiskers* aumentam a resistência ao choque térmico.

Os mecanismos de desgaste das ferramentas cerâmicas são complexos e geralmente influenciados por: lascamento, abrasão na superfície de flanco, adesão na superfície de saída, abrandamento térmico, fratura catastrófica, cratera e desgaste de entalhe no flanco e na aresta

secundária. O desgaste por difusão é determinado principalmente pela reação química e dissolução no material da peça. As superligas à base de níquel têm alta afinidade química com muitos materiais de ferramenta e, como tal, frequentemente formam uma camada de aderência conduzindo aos desgastes de difusão e arrastamento drástico (*attrition*) (Wayne & Buljan, 1990; Gatto & Iuliano, 1994; Jun et al., 1997 e Choudhury & Baradie, 1998). Geralmente, encontra-se o desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte, como o responsável pela rejeição da ferramenta de corte a baixas velocidades de corte. Com altas velocidades de corte, o desgaste de flanco compete com o desgaste de entalhe, dependendo do tipo de cerâmica utilizada. Jun et al. (1997) acrescentaram que deformação plástica, difusão e desgaste por aderência e *attrition* contribuem muito para com o desgaste de flanco e fratura catastrófica da aresta em altas velocidades devido às altas tensões, removendo agregados dos grãos. O desgaste de entalhe foi predominante em todas condições de corte. Insetos com geometria redonda apresentaram melhor desempenho em comparação com a quadrada, devido à maior resistência na aresta, auxiliando na resistência ao desgaste de entalhe e na dissipação de calor.

Richards & Aspinwall (1989), König & Gerschwiler (1999) e Machado & Silva (1999) afirmam que algumas superligas podem ser usinadas eficazmente com o emprego de ferramenta de PCBN, principalmente no torneamento de acabamento, proporcionando um menor nível de desgaste, mas o alto custo dessas ferramentas torna sua aplicação economicamente inviável. Takatsu apud Ezugwu et al. (1999) comprovou que, nos testes de torneamento de superligas, utilizando ferramentas de PCBN com concentração de 30-95% CBN, o desgaste de entalhe se reduz significativamente com o aumento da concentração de CBN, enquanto que a média do desgaste de flanco apresentou pequena variação. Por outro lado, Elbestawi et al. (1993) observaram que ferramentas de PCBN são também suscetíveis a altas taxas de desgaste por difusão e subsequente perda de cristal. A essa consideração, acrescentam König e Gerschwiler (1999) a seguinte afirmação: a resultante das propriedades químicas, físicas e mecânicas tem uma decisiva influência sobre o desgaste e o comportamento do desempenho de ferramentas de PCBN. Classes de PCBN com constituição estimada de 30-50% em volume de TiC ou TiN são satisfatórias para operação de acabamento de superligas a base de cobre e níquel.

O sulco na profundidade de corte na usinagem de superligas tem sido visto como um dos principais fatores limitantes da vida das ferramentas cerâmicas. Isto é causado pela

combinação de alta temperatura, alta resistência do material da peça, alta deformação plástica, endurecimento da camada superficial durante a usinagem, alta tensão na interface cavaco-ferramenta e cavacos abrasivos (RICHARDS & ASPINWALL, 1989; GATTO & IULIANO, 1994 e EZUGWU *et al.*, 1999).

O desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte é originado pela alta deformação plástica na extremidade da profundidade de corte, ocasionando aumento na temperatura, o que favorece a adesão de material da peça na ferramenta. Em todas condições, a limitação do desgaste transcorreu por desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte associado aos desgastes por abrasão, difusão e *attrition* (aderência e arrastamento), envolvendo a perda de material por microsulcamento ou sulcos, causada por partículas de elevada dureza. Conseqüentemente, o mecanismo do tipo *attrition* é transferido para o desgaste de entalhe (SMITH, 1994).

Segundo Pashby e Khamsehzhadeh (1990), as inclusões de SiC<sub>w</sub> aumentam a condutividade térmica e a dureza, mas, infelizmente, a estabilidade química é reduzida e há evidência de que isto influencia a taxa de desgaste.

De acordo com Narutakiet *al.*, (1993), Elbestawiet *al.*, (1993) e Junet *al.*, (1997), o desgaste por difusão, que pode acontecer na usinagem com alta velocidade, utilizando ferramenta de Al<sub>3</sub>O<sub>3</sub> + SiC<sub>w</sub>, no qual o níquel e o ferro difundem para dentro do material da ferramenta, reagindo quimicamente com SiC<sub>w</sub>, produzindo FeSi e NiSi. Isto significa que as fibras de SiC<sub>w</sub> desaparecem da superfície da ferramenta sob condição de alta velocidade de corte, diminuindo a resistência e a dureza da ferramenta e aumentando a taxa de desgaste.

Nos testes de difusão, Narutaki et al. (1993) afirmam que não existe difusão, quando são utilizadas ferramentas de cerâmica Al<sub>3</sub>O<sub>3</sub> + TiC (CC<sub>650</sub>), tornando-a mais estável na usinagem em relação às outras cerâmicas. A boa estabilidade química das ferramentas cerâmicas, aliada a uma melhoria da resistência ao choque térmico e mecânico através da adição de TiC, são características que, sem dúvida, beneficiam a situação com alta velocidade de corte. Apesar de as ferramentas cerâmicas serem conhecidas por sua estabilidade química, encontram-se fortes indícios de mecanismos químicos em todas ferramentas e condições

utilizadas. Esse comportamento pode ser explicado em função de o corte com alta velocidade gerar alta temperatura na região do corte.

Ezugwu et al. (1999) comprovaram, em seus experimentos, na usinagem de superligas a base de níquel e cobre, que a forma e a geometria das ferramentas de corte representam um importante papel na determinação da vida da ferramenta e na natureza da superfície usinada. Ferramentas de cerâmica de forma losangular geralmente fornecem baixo desempenho na usinagem das superligas, entretanto os insertos de forma redonda e quadrada proporcionam alto desempenho como também um melhor acabamento superficial. Isto se deve ao aumento no ângulo de ponta dos insertos quadrados e redondo, os quais tendem a aumentar a resistência da aresta dos insertos e a área de contato.

Resultados surpreendentemente negativos foram obtidos com as ferramentas de PCBN, pois vários pesquisadores as indicaram como uma alternativa de grande potencial para a usinagem de superligas, o que não foi comprovado em nenhuma geometria. Os pesquisadores afirmam que o melhor desempenho das ferramentas de PCBN é devido, em grande parte, à sua maior dureza à quente.

## **2.4–Materiais Para Ferramentas De Corte**

A escolha correta do material da ferramenta deve ser feita com muito cuidado para não comprometer o processo de usinagem. Para isso alguns critérios de seleção devem ser respeitados e foram apresentados por SHAW (1984); TRENT (1991), DINIZ *et al.*,(2008) e MACHADO & SILVA (2009):

- Dureza do material a ser usinado;
- Processo de usinagem, ou seja, se possui corte interrompido (fresamento), corte contínuo (torneamento), uso ou não de refrigeração/lubrificação do corte, tipo de operação (desbaste ou acabamento), tempo de ciclo;
- Forma e dimensão da ferramenta;
- Tipo de cavaco gerado pelo material a ser usinado;
- Parâmetros de usinagem como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte;

- Condições da máquina ferramenta: rigidez (sem folgas/vibrações), potência, controles durante o processo, sistema de refrigeração da ferramenta;
- Conciliar custo/benefício da ferramenta;
- Atender as características finais do produto como qualidade superficial e dimensional requerida.

Para que a escolha da ferramenta seja a mais correta, deve-se observar se a ferramenta de corte escolhida possui as propriedades a seguir:

- Alta dureza, principalmente à quente;
- Tenacidade suficiente para evitar falhas por rupturas;
- Alta resistência ao desgaste;
- Alta resistência à compressão e ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas, este fator é muito importante principalmente para a dureza a quente do material;
- Alta condutividade térmica;
- Baixo índice de expansão volumétrica;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Ser inerte quimicamente.

Essas propriedades não estão listadas em ordem de importância, devido à variação do processo de usinagem, como material a ser usinado e condições de corte. No entanto, pode-se dizer que as propriedades mais significativas dos materiais das ferramentas de corte são a dureza e a tenacidade (MACHADO & SILVA, 2004).

O maior desafio no desenvolvimento de ferramentas de corte está exatamente no balanço entre a dureza e a tenacidade, visto que são duas propriedades de extrema importância para o desempenho da ferramenta de corte e que não são facilmente encontradas em um mesmo material. Atualmente, conseguem-se boas combinações de dureza e tenacidade, tanto

em materiais do substrato da ferramenta quanto nos revestidos. As ferramentas revestidas buscam o equilíbrio entre as propriedades necessárias através do uso de um material base (o substrato), que confere propriedades de tenacidade e alguma dureza, e um revestimento, com alta dureza, resistência a abrasão e inércia química.

Segundo Machado *et al.*, (2009), um material idealizado para ferramenta de corte teria que ter a dureza do diamante natural, a tenacidade do aço-rápido e a inércia química da alumina. Como isso não é possível cabe ao engenheiro de processos analisar as propriedades já citadas e escolher aquele material que melhor atende o tipo de aplicação exigida.

Os materiais para ferramentas mais usados nas indústrias metal mecânica são do grupo do metal duro com ou sem cobertura. Para melhor compreender este fato vamos dar uma melhor definição destes grupos de materiais.

### **2.4.1 – Metal Duro**

Segundo Diniz *et al.*, (2008) o metal duro é um material de ferramentas mais utilizado na indústria, devido à combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, obtida através de uma variação da composição química.

O metal duro é um produto resultante da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. O metal duro é formado basicamente por dois constituintes:

- Carbetos de tungstênio: extremamente duro e de alta resistência ao desgaste. Podem ser associados a outros carbetos como os de titânio (TiC), de tântalo (TaC) e de nióbio (NbC) que conferem dureza a temperatura ambiente e sua retenção a altas temperaturas. O tamanho das partículas é geralmente de 1 a 10  $\mu\text{m}$  e ocupam de 60 a 95% do volume do material. Hoje em dia já são produzidas partículas de ordem de 0,1  $\mu\text{m}$ , fazendo com que a resistência ao desgaste e principalmente à tenacidade aumentem.

- Elemento ou metal aglomerante: trata-se de um metal do grupo do ferro, usualmente o cobalto, cuja função é aglomerar as partículas dos carbetos, sendo responsável pela tenacidade do material. A diminuição da porcentagem de cobalto aumenta a dureza a quente do material.

O metal duro é utilizado, na maioria das vezes, na forma de pastilhas soldadas ou intercambiáveis com fixação mecânica sobre um porta-ferramenta. Outra característica favorável do metal duro é o seu coeficiente de dilatação térmica. Este coeficiente tem um valor duas vezes menor comparado com o do aço em temperaturas ambiente e até 675°C. O metal duro é classificado, segundo a Norma ISO, em seis classes, P, M, K, N, S e H (SANDVIK, 2005).

- Classe P: constituídos de metais duros de elevado teor de TiC+TaC, conferindo assim à classe maior resistência ao desgaste e elevada dureza à quente. Esta classe é indicada para usinagem de materiais que produzem cavacos contínuos: aços, ferro fundido maleável e materiais dúcteis em geral. Por formarem uma área de atrito grande com a superfície de saída da ferramenta, desenvolvem altas temperaturas de corte e por isso tem um desgaste mais acentuado da ferramenta (desgaste de cratera).

- Classe M: possui propriedades intermediárias, sendo destinados a ferramentas com várias aplicações. Esta classe é indicada para usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos tanto longos como curtos, como por exemplo, o aço inoxidável.

- Classe K: composto de carbeto de tungstênio aglomerados pelo cobalto. Esta classe é indicada para usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos, de ruptura, e materiais não-metálicos: ferro fundido, aços temperados, metais não ferrosos (cobre, latão), plásticos e madeira. Este tipo de metal duro não é resistente ao mecanismo que gera o desgaste de cratera, quando usinando os ferrosos.

- Classe N: classe do metal duro que combina excelente resistência ao desgaste por abrasão e agudeza da aresta. Recomendada para metais não ferrosos e não metálicos.

- Classe S: classe de metal duro que combina boa resistência à deformação plástica, boa resistência ao desgaste por abrasão, tenacidade e boa resistência a altas temperaturas. Pode trabalhar tanto em altas como em baixas velocidades de corte. Recomendada para superligas resistentes ao calor incluindo as ligas de titânio.

- Classe H: classe de metal duro que combina boa resistência ao desgaste por abrasão e tenacidade para torneamentos de materiais endurecidos em baixas velocidades.

Segundo Diniz et al. (2008), as ferramentas de metal duro podem usinar qualquer tipo de material, desde que este material não ultrapasse a dureza de 45 HRC. Nas operações de usinagem como torneamento, as ferramentas de metal duro podem trabalhar com velocidades de corte bem maiores, comparadas com qualquer velocidade de corte de uma ferramenta de aço-rápido, no entanto há uma exigência de uma máquina com gama de velocidades maior e mais rígida, para prevenir vibrações. Para melhorar ainda mais as propriedades mecânicas das ferramentas de metal duro foram desenvolvidas coberturas para elas. A finalidade principal dessas coberturas é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça. As classes das ferramentas de metal duro designadas pela ISO são divididas em classes representadas por letras e números conforme exemplo mostrado na Figura 2.7. A posição e o formato dos símbolos da classe indicam os campos adequados para a aplicação na Figura 2.8.

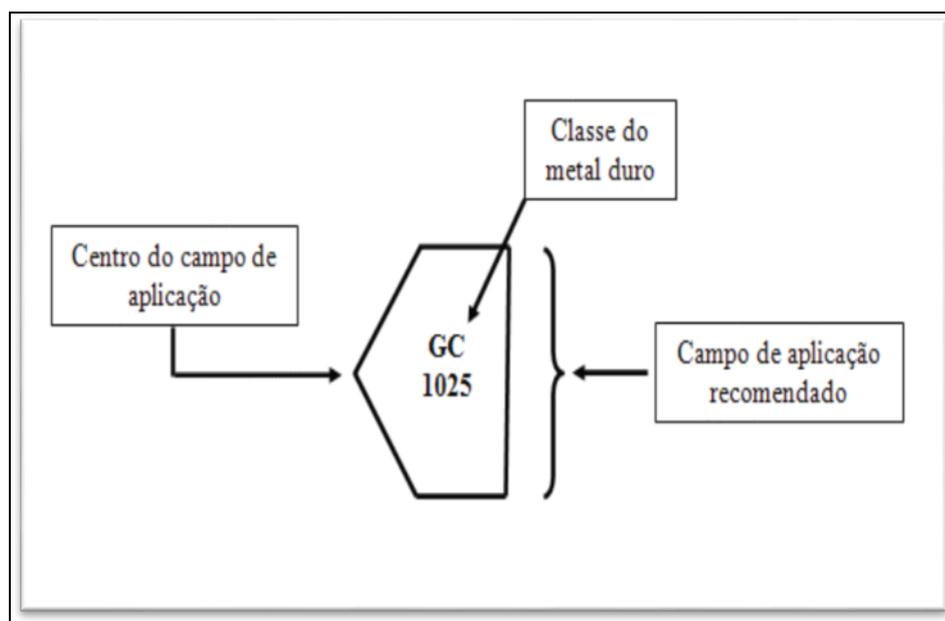


Figura 2.6- Exemplo da indicação das classes de metal duro da Sandvik Coromant (Adaptada Sandvik, 2005).

		ISO	ANSI	Básica
<b>S</b>	Base Ti	01	-	
		10	-	H10A
		20	-	H13A
		30	-	
<b>S</b>	Base Ni	01	-	
		10	-	CC 670, CC 6060, S05F, GC 1105, GC 1005, GC 1025
		20	-	CC 6065, GC 1115, GC 1125
		30	-	

Figura 2.7- Classe S designada pela Norma ISO (Adaptada Sandvik, 2005).

### 2.4.2–Metal Duro com Cobertura

Segundo Machado *et al.*, (2009), a utilização de ferramentas de metal duro com cobertura nas indústrias atinge cerca de 90%. Este número é consequência de um maior domínio das técnicas de revestimentos, apresentando custo mais acessível do produto e também do grande número de produtos fornecidos pelos grandes fabricantes de ferramentas. Os revestimentos são aplicados em substratos de quaisquer classes do metal duro. Os metais duros podem receber o revestimento pelo processo PVD (Deposição Física por Vapor) e pelo processo CVD (Deposição Química por Vapor). Os fabricantes de ferramentas possuem em suas linhas de produtos ferramentas revestidas pelos dois processos. Pode ser observada na Tabela 2.4 uma comparação entre as ferramentas revestidas por ambos os processos, possuindo o mesmo substrato. O processo PVD garante a mesma tenacidade do substrato e isso não ocorre com o processo CVD (Machado & Silva, 2009).

Tabela 2.4 – Comparação entre os processos CVD e PVD (Adaptada Machado & Silva, 2009)

	<b>CVD – Deposição Química de Vapor</b>	<b>PVD – Deposição Física de Vapor</b>
<b>Temperatura de revestimento</b>	Aprox.. 1000°C	Aprox. 500°C
<b>Tenacidade</b>	Reduzida	Não é afetada
<b>Aresta de corte</b>	Arredondamento requerido	Pode ser quina viva
<b>Espessura do revestimento</b>	Até 12 µm	Até 4 µm
<b>Camadas</b>	Multicamadas TiC-TiN, TiN-TiCN-TiN, TiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiN, TiCN, TiAlN
<b>Principais aplicações</b>	Torneamento e mandrilhamento	Fresamento, roscamento e furação
<b>Vantagens</b>	Maior resistência ao desgaste, maior resistência à craterização	Substitui ferramenta sem revestimentos com mesma tenacidade.Reduz a formação da (APC)

Segundo Diniz *et al.*,(2008) as principais características das camadas de revestimentos são (Figura 2.9):

- Carbetos de titânio (TiC): possui excelente resistência ao desgaste por abrasão, funciona como elemento que promove a adesão das camadas de cobertura com o metal duro do núcleo. Possui baixa tendência de soldagem com o material da peça, dificultando o desgaste por adesão e a formação de aresta postiça de corte e baixo coeficiente de dilatação térmica. É o revestimento mais utilizado como primeira camada.
- Óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): garante a estabilidade térmica necessária em temperaturas elevadas por ser um material cerâmico refratário e por possuir alta resistência ao desgaste por abrasão, além de alta resistência a ataques químicos e à oxidação.
- Nitreto de titânio (TiN): reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco. É quimicamente mais estável que o TiC por possuir menor tendência à difusão com aços.
- Nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) e nitreto de alumínio-titânio (AlTiN): maior resistência à oxidação, permitindo o uso de temperaturas mais altas; baixa condutividade térmica, protege a aresta de corte e aumenta a remoção de calor através do cavaco; alta dureza a frio e a quente; alta estabilidade química, que reduz bastante o desgaste de cratera.

Existem alguns critérios para uma boa escolha de uma ferramenta de metal duro para uma determinada aplicação, podendo ser citados (DINIZ *et al.*, 2008):

- Severidade da operação de usinagem: classes de ferramentas com maior teor de Co são utilizadas em operações de desbaste, com avanço e profundidade de corte maior e cortes interrompidos, por criarem tensões elevadas na ferramenta.

- Velocidade de corte: classes de ferramentas com menor teor de Co e mais carbeto são utilizadas em operação de acabamento, com maiores velocidades de corte, por necessitarem de maior resistência ao calor e à abrasão.

- Condições da máquina-ferramenta: classes com maior tenacidade, ou seja, maior teor de cobalto são recomendados para máquinas menos rígidas, menos potente, devido à relativa fragilidade desse material, embora ocorra uma redução da vida da ferramenta.

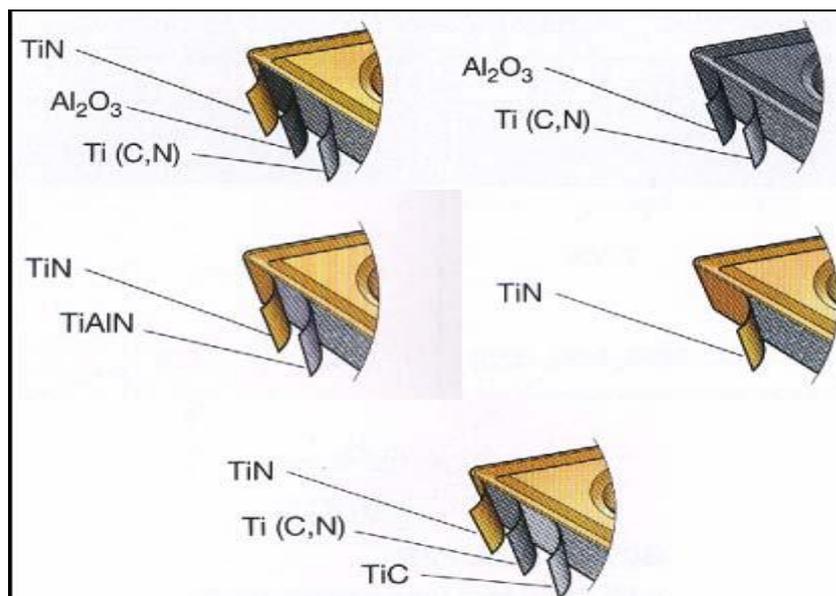


Figura 2.8 – Disposição dos principais revestimentos do metal duro (Adaptada Sandvik, 2005).

Para a realização dos ensaios deste trabalho com ferramentas de metal duro com cobertura, escolheu-se um metal duro com revestimento pelo processo PVD com camadas de (TiAlN) classe ISO S05 e S25 (Sandvik GC1105 e GC1125) que garante tenacidade e uma maior resistência ao desgaste.

## 2.5-Ferramenta De Geometria Alisadora (*Wiper*)

A geometria alisadora (*Wiper*) chegou ao mercado por volta de 1999, inicialmente desenvolvida pelo Centro de Desenvolvimento e Pesquisa da Sandvik na Suécia. Esta geometria está fundamentada na concordância de 3 círculos circunscritos na ponta da ferramenta, conforme mostrado na Figura 2.10, que acrescenta à ferramenta o efeito alisador, a partir do qual uma mesma condição de corte pode melhorar em duas vezes o acabamento superficial, quando comparado com ferramentas convencionais. De outra forma, é possível manter o mesmo acabamento superficial enquanto se dobra a taxa de avanço. Com a evolução e aplicação dessas novas geometria de ferramentas na indústria mecânica, surge uma outra demanda no setor, no que se refere aos processos de fabricação.

Essa nova geometria associada proporciona um aumento na substituição do processo de usinagem em superligas não-ferrosas pelo processo de torneamento, uma vez que possibilita atingir rugosidades da ordem de  $0,3 \mu\text{m}$  (com perspectivas de valores menores). A geometria das ferramentas de corte alisadoras (*Wiper*) proporciona os seguintes benefícios:

- Diminuição dos custos de usinagem, devido à ótima produtividade;
- Pequeno ou nenhum retrabalho de acabamento superficial posterior, devido ao baixo nível de rugosidade conseguido;
- Produção sem distúrbios (excelente controle dimensional).

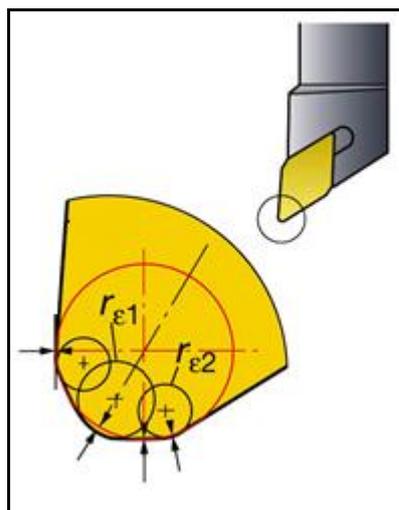


Figura 2.9-Ferramenta com geometria alisadora (wiper) – raio de ponta alisador.

Fonte: Sandvik, 2010, adaptado pelo autor.

## 2.6- Máquinas-Ferramenta

O torneamento de material endurecido em geral, proporciona maiores esforços de corte que o torneamento de materiais dúcteis, devido à elevada dureza e resistência mecânica das peças. Proporcionalmente a isto, com o desgaste da ferramenta, ocorre um aumento das forças de corte, de avanço e também da força passiva.

O aumento da força de corte e de avanço exige que a máquina ferramenta disponha de alta potência, enquanto que o aumento da força passiva faz com que ocorram deformações elásticas do sistema máquina-ferramenta-peça e também deformação elástica local próxima do ponto de corte, podendo causar erros dimensionais e geométricos, além da quebra da ferramenta (Nakayama *et al.* 1988 e König *et al.* 1993). Assim, para evitar falhas prematuras das ferramentas e para manter as dimensões e a geometria da superfície usinada, as máquinas – ferramenta devem apresentar elevada rigidez.

A alta precisão também é um requisito necessário, pois o torneamento de superligas não-ferrosas de alta dureza tem como uma de suas finalidades, substituir a operação de retificação cilíndrica. Segundo Kloche *et al.* (1995), é possível obter-se em tornos numericamente comandados, rugosidades de 0,2 a 0,3  $\mu\text{m}$ , que correspondem às obtidas na retificação em geral.

### 2.6.1- Forças de corte

Quando da usinagem de superligas, nota-se que as forças de corte não são necessariamente altas. Isto se deve a deformação plástica relativamente pequena do cavaco e também devido à pequena área de contato entre a ferramenta e o cavaco, o que reduz a força de atrito (NAKAYAMA *et al.*, 1988).

Nota-se a concordância de vários autores, para o fato de que a força de usinagem tende a diminuir com o aumento da dureza do material e também com o aumento da velocidade de corte. Outros autores, entretanto, afirmam que as forças de corte são de 30 a 80% superiores às forças verificadas em durezas inferiores e que as mesmas diminuem com o aumento da velocidade de corte (Bordui, 1988 e Abrão *et al.*, 1995). Porém, certamente, o aumento dos esforços de corte nestes materiais é menor que o aumento de sua dureza, quando comparado ao mesmo aço usinado antes do tratamento térmico de endurecimento. Existe uma variação

das forças de corte com o avanço para as superligas a base de cobre, seja ele com uso de ferramentas com ou sem revestimento, ou com e sem uso de fluido de corte, houve um aumento nos valores do avanço implicando em consequente aumento na força de corte. De fato, tal comportamento já era esperado, uma vez que um incremento no avanço proporciona direta elevação da área de contato entre o cavaco e a ferramenta.

Na Figura 2.11 é mostrada a decomposição da força de usinagem nas Forças de Avanço ( $F_f$  ou  $F_x$ ), força de profundidade ou passiva ( $F_y$  ou  $F_p$ ) e força de corte ( $F_z$  ou  $F_c$ ).

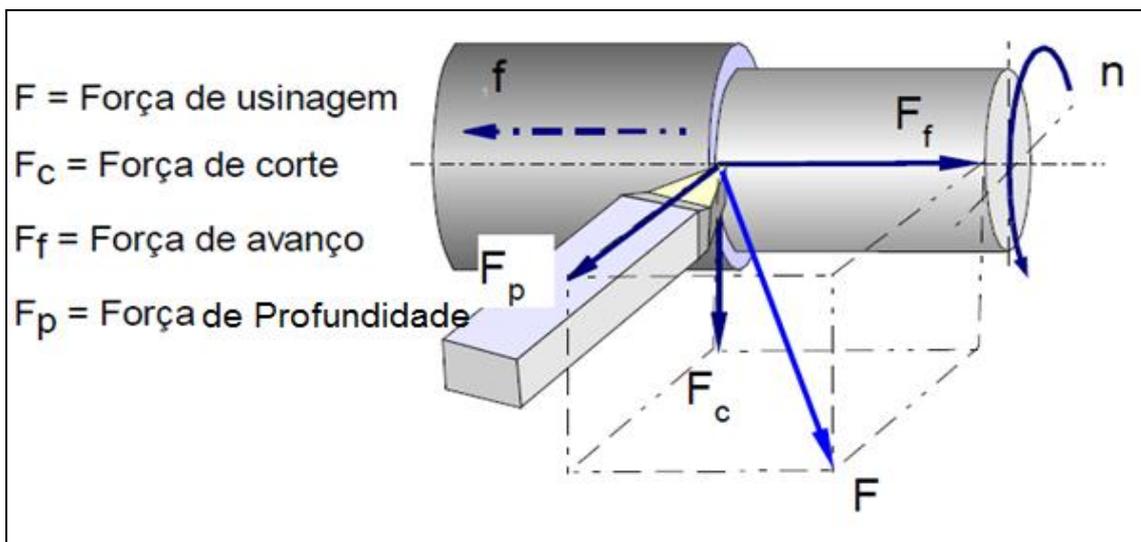


Figura 2.10- Decomposição das Forças de Usinagem, (Mills1983 e Kitagawa 1997).

## 2.7- Características Da Superfície Usinada

### 2.7.1- Rugosidade

A usinagem da peça obtida na operação de torneamento depende das condições de corte. É de grande importância na usinabilidade dos materiais. Verifica-se experimentalmente que materiais manufaturados nas mesmas condições de usinagem, com a mesma ferramenta e máquina ferramenta, podem apresentar rugosidades diferentes. Para defini-las utilizam-se parâmetros e símbolos gráficos normalizados por diferentes países (FERRARESI, 1977).

A rugosidade é decorrente da forma da ponta de corte da ferramenta e do movimento relativo entre a peça e ferramenta. No torneamento, ela é influenciada principalmente pela forma do raio de ponta da ferramenta e pelo avanço. A rugosidade teórica aumenta com o aumento do avanço e diminui com o aumento do raio de ponta. Com relação a velocidade de

corte, a rugosidade teórica inicialmente tende a aumentar, diminuindo após uma certa velocidade. Isso se deve à formação da aresta postiça de corte, que pode ocorrer em pequenas velocidades de corte, fator que desaparece com o emprego de velocidades de corte mais altas. Enquanto que o desgaste da ferramenta tem influência sobre a qualidade superficial da peça (WEINGAERTNER & SCHROETER, 1991).

O acabamento superficial após a usinagem é influenciado pela geometria da ferramenta, geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta, material da peça, material da ferramenta e condições de corte como o avanço (f), a profundidade de usinagem (ap) e velocidade de corte (vc).

A rugosidade final da peça é considerada como a soma de dois efeitos independentes (Figura 2.12):

- A rugosidade da superfície teórica (padrão) que é o resultado somente da geometria da ferramenta e do avanço.
- A rugosidade da superfície real que é o resultado das irregularidades da operação de corte como o fluxo lateral de cavaco, adesões e ela.

Quando se trata de definir a rugosidade, o fator a ser eliminado é a ondulação, pois a esta curva encontra-se superposta a rugosidade, o que pode levar a resultados enganosos ao pretender-se sua medição. A ondulação ou textura secundária pode ser considerada como um erro macrométrico, porém a tendência atual é avaliá-la com os mesmos meios com que avalia a rugosidade. A Figura 2.13 representa o perfil efetivo de uma superfície com visualização de sua rugosidade e ondulação, dando a ideia de erro de forma e salientando seus componentes nas operações de torneamento, (SENAI, 2002).

Os resultados sofrem certas distorções pela utilização de filtros para excluir a ondulação quando se pretende definir a rugosidade. O comprimento de amostragem também conhecido como comprimento de onda limite, *cut-off* ou módulo de medição, tem a finalidade de filtrar a ondulação.



Figura 2.11 - Comparação da superfície teórica com a superfície real obtida em operações de torneamento (Cunha *et al.*, 2005).

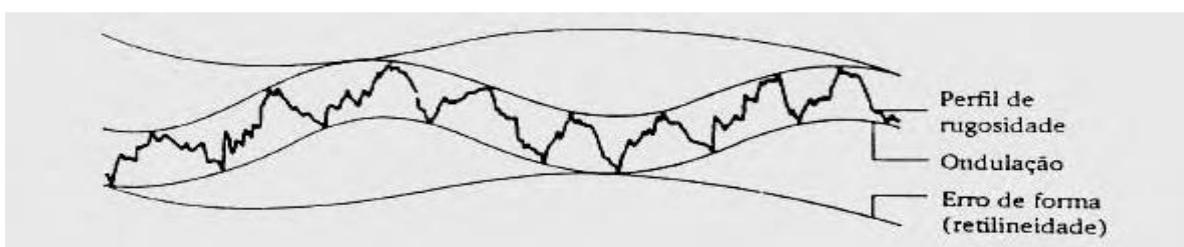


Figura 2.12- Classificação dos erros superficiais - Rugosidade (Senai, 2002).

A Figura 2.14 representa a ideia da exclusão da ondulação, considera-se uma curva de perfil efetivo composto (rugosidade sobreposta a ondulação), na qual é definido um valor de *cut-off* (nome comumente utilizado nos rugosímetros eletrônicos), adequado ao comprimento ( $l_{c1}$ ), um percurso de cinco vezes, curva A.

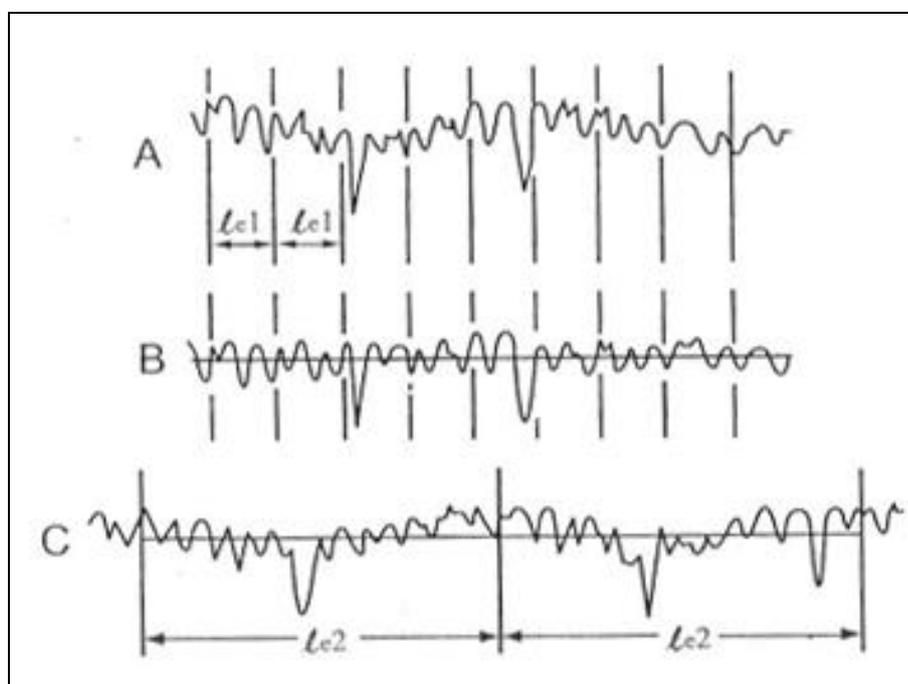


Figura 2.13- Conceito de valor de *cut-off* e exclusão da ondulação Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento (Senai, 2002)

Para cada segmento (le1), traça uma linha média e verifica que os extremos destas linhas pode apresentar descontinuados de um segmento para o outro, porém se alinhar a linha média de cada segmento, formando uma só linha reta horizontal, e se obtém o perfil da rugosidade, conforme a curva B, onde a ondulação foi filtrada. Se o valor de *cut-off* fosse maior que o necessário (le2) curva C, valores do perfil de ondulação que influenciariam os resultados da medição da rugosidade, seriam incluídos.

• **Parâmetro de Rugosidade (Ra)**

É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média em um comprimento de amostragem. A Norma brasileira adota “Ra” como método de medição. A Equação 2.1 mostra como é feito o cálculo de Ra. A Figura 2.15 exemplifica um perfil de rugosidade de uma peça e suas componentes e seus valores absolutos de ordenadas (Yi).

Onde:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \tag{2.1}$$

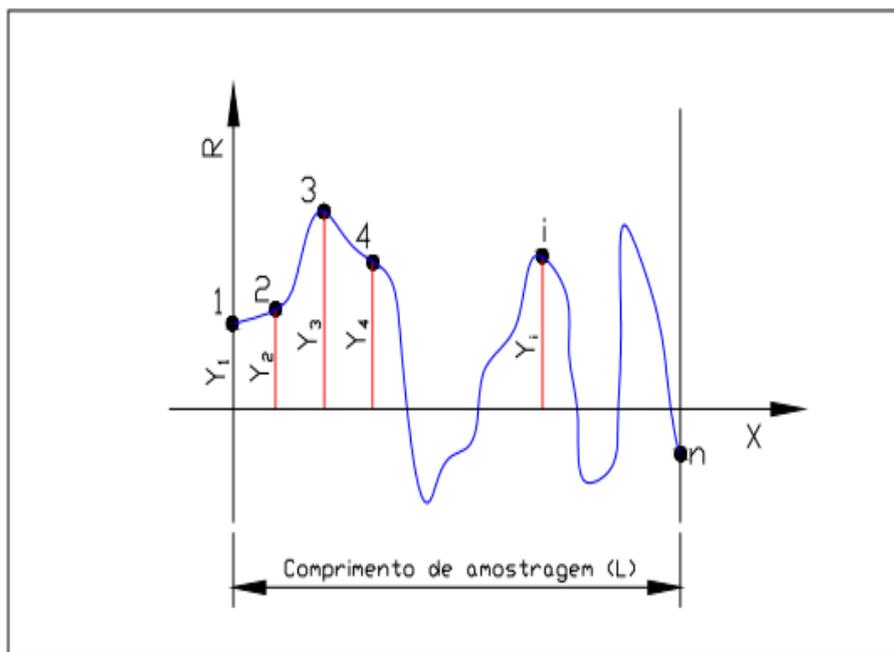


Figura 2.14- Desvio médio aritmético Ra; Fonte: Agostinho, *et al.* (2004).

### • Parâmetro de Rugosidade (Rt)

Segundo Agostinho (2004), corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ( $l_m$ ), independentemente dos valores de rugosidade parcial. Na Figura 2.16, pode-se observar que o pico mais alto e o vale mais baixo estão no retângulo. Ambos configuram a profundidade total da rugosidade  $R_t$ . O parâmetro  $R_t$  tem o mesmo emprego do  $R_y$ , mas com maior rigidez, pois considera o comprimento de amostra igual ao comprimento de avaliação.

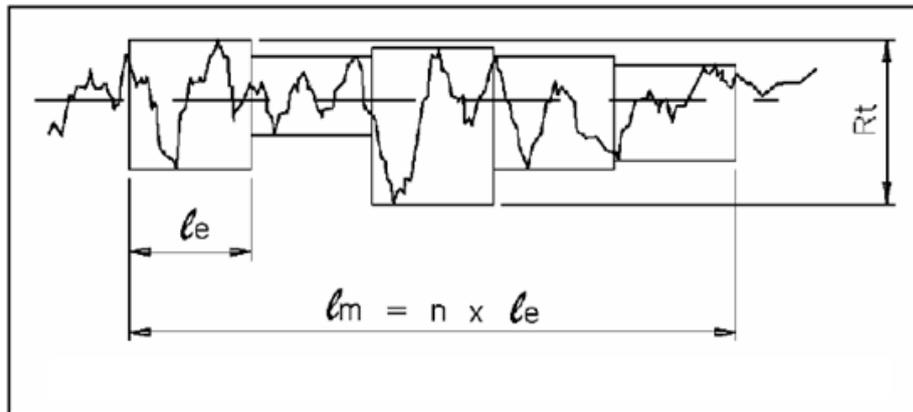


Figura 2.15- Parâmetro de Rugosidade  $R_t$  (Agostinho, 2004)

### 2.7.2- Efeito de Alguns Parâmetros de Usinagem no Acabamento Superficial

O acabamento superficial sofre influência de vários fatores na usinagem. Portanto, trabalhar adequadamente com esses fatores traz grandes benefícios ao processo. Em geral a rugosidade é menor, quando (DROZDA & WICK, 1983; MACHADO & SILVA, 2009):

- Deflexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas;
- A ponta da ferramenta não é aguda;
- A ferramenta e a peça estão corretamente posicionadas e centradas, evitando desvios;
- O material da peça é inerentemente puro, livre de defeitos (trincas, bolhas e inclusões);
- O eixo principal da máquina ferramenta está corretamente alinhado e as guias sem desgaste;
- A aresta de corte sem quebras;

- Corte sem aresta postiça de corte.

O avanço e a profundidade de usinagem têm grande influência no acabamento superficial, principalmente o avanço. A altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar com a taxa de avanço. A profundidade de usinagem aumenta as forças e, portanto as deflexões. As alturas das ondulações também são aumentadas com a profundidade de usinagem. É melhor trabalhar com velocidades de corte mais altas, acima da velocidade de corte crítica, para se evitar a formação da aresta postiça de corte. Peças longas e finas são mais sensíveis às forças elásticas e dinâmicas. Como resultado, as ondulações são mais pronunciadas. Por outro lado, peças grandes (grandes seções transversais) são rígidas e as alturas das ondulações são pequenas. As características geométricas também agem positiva e negativamente na rugosidade, assim podemos tecer alguns comentários (MACHADO & SILVA, 2009):

- **Ângulo de saída:** quanto maior for o ângulo de saída, menor será a força de usinagem e, portanto, as alturas das ondulações e deflexões serão menores;

- **Ângulo de folga:** deve ser suficiente para prevenir o atrito entre a ferramenta e a superfície usinada. O atrito gera forças adicionais que causam deflexões. O contato com o atrito tende a imprimir, na superfície usinada o perfil do desgaste da ferramenta;

- **Raio de ponta:** deve ser suficientemente grande para diminuir o efeito das marcas do avanço, com apreciável melhora no acabamento. Entretanto um raio de ponta excessivo pode gerar vibrações;

- **Ângulos de posição:** os efeitos desses ângulos são pequenos, mas uma redução no ângulo de posição diminui as marcas de avanço e melhora o escoamento do cavaco e acabamento.

Ângulo de posição muito pequeno pode causar vibrações. O aumento do ângulo de posição lateral aumenta a altura das marcas de avanço e prejudica o acabamento. É comum usar um ângulo de posição nulo por um pequeno comprimento de  $1,5 \times "f"$  para remover parcialmente ou totalmente as marcas de avanço. Este método, entretanto, pode causar vibração. Além do efeito das condições de corte e da geometria da ferramenta outros efeitos devem ser levados em consideração. A máquina ferramenta deve ser rígida, sem erros de

alinhamento e com movimentos precisos, para não interferir no acabamento superficial. As principais características desejadas em uma máquina são:

- Potência da máquina suficiente para manter a velocidade e o avanço requerido, sem problemas;
- Adequada resiliência para evitar deflexões;
- Rigidez e amortecimento contra vibrações;
- Ter uma base (fundação) adequada para minimizar vibrações e transmissão para outras máquinas;
- Precisão na fabricação para reduzir ao mínimo o desalinhamento;
- Meios adequados para suportar rigidamente a peça e a ferramenta.

O fluido de corte diminui o desgaste da ferramenta e o atrito entre a ferramenta e a peça ou cavaco. Tudo isto, melhora o acabamento superficial. O fluido atuando como refrigerante, entretanto, pode aumentar a força de usinagem e aumentar a rugosidade da peça. Um revestimento aplicado sobre uma ferramenta para atuar como lubrificante, ou diminuir a afinidade química entre o material da peça e ferramenta pode também contribuir para melhorar o acabamento superficial (MACHADO & SILVA, 2009).

## **2.8 - Mecanismos de Formação de cavaco**

A análise cuidadosa da face inferior do cavaco que esteve em contato com a ferramenta, mostra a transformação que o cavaco sofre devido à alta temperatura local. A temperatura, influenciando no desgaste das ferramentas, limita a aplicação no processo de corte com parâmetros mais elevados, fixando, portanto, condições máximas de produtividade e duração das ferramentas. Verificou-se, experimentalmente, que os trabalhos provenientes da deformação da raiz do cavaco durante a usinagem, do atrito entre o cavaco e a ferramenta, e do atrito entre a peça e a ferramenta, são transformados em calor. Desta maneira, a temperatura da ferramenta de corte se elevará de acordo com o calor específico e a condutibilidade dos corpos em contato, além das dimensões das secções onde o calor escoará (DINIZ *et al.*, 2008).

Segundo Ferraresi (1977) a teoria da plasticidade não permite explicar, satisfatoriamente, os fenômenos observados. No processo de formação do cavaco, a velocidade de corte e as deformações que ocorrem são muito grandes quando comparadas

com aquelas tratadas na teoria da plasticidade. Conforme Bäker *et al.*, (2001), a formação de cavaco nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro, se processa da seguinte forma conforme a Figura 2.17.

a) Durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção de material (ainda solidária à peça) é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta.

b) O material recalcado sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento (sem que haja com isso uma perda de coesão) entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento se realiza segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcada. Durante a usinagem, estes planos instantâneos irão definir uma certa região entre a peça e o cavaco, dita região de cisalhamento.

c) Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo naturalmente da ductilidade do material e das condições de usinagem. Para materiais altamente deformáveis, a ruptura se realiza somente nas imediações da aresta cortante da ferramenta, o cavaco originado é denominado cavaco contínuo. Para os materiais frágeis, se origina o cavaco de cisalhamento ou de ruptura.

d) Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso, uma porção de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno.

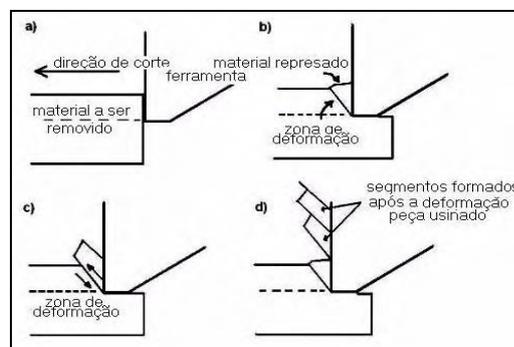


Figura 2.16-Representação esquemática da formação do cavaco, (Bäker; Rösler e Siemers, 2001)

## Capítulo 3

# PROJETO DE EXPERIMENTOS (DOE)

### 3.1-Conceituação

O Projeto de Experimentos (*Design of Experiments - DOE*) é uma técnica relativamente antiga, desenvolvida entre 1920 e 1930 por Fisher, sendo posteriormente incrementada por importantes pesquisadores na área de estatística como Box, Hunter e Taguchi, entre outros (PRVAN & STREET, 2002).

Uma estratégia para avaliar a magnitude de várias fontes de variação que influenciam uma ou mais respostas, pode ser expressa por uma sequência de 6 passos, conforme descrito a seguir (MONTGOMERY, 1997):

1° - Identificar e selecionar fatores que possam contribuir para a variação total da resposta de estudo. Geralmente, sessões de *Brainstorming*, Fluxogramas e Diagramas de causa-efeito realizados por especialistas no processo, podem contribuir para a escolha apropriada destes fatores (ROSS, 1991).

2° - Selecionar um modelo que inclua os fatores escolhidos no passo 1. A escolha deve determinar também se o efeito provocado pelo fator é fixo ou aleatório.

3° - Projetar experimentos eficientes para estimar os efeitos dos fatores incluídos no modelo. Esta escolha considera dois aspectos: a disponibilidade de recursos para a realização dos experimentos e a precisão desejada com as estimativas. A viabilidade do estudo deve ser levada em consideração. Experimentos exploratórios ou dados históricos devem ser utilizados para se avaliar o número de níveis adotados para cada fator. A aleatorização do experimento é algo importante e desejável para garantir que a variação incontrollável seja proveniente apenas da mudança de níveis dos fatores e do erro aleatório (GUNST, 2000).

A chance de má interpretação dos resultados é reduzida com esta técnica. Algo também desejável é a replicação (ANDERSON & KRABER, 1999) e a blocagem (BOX & BEHNKEN, 1960; ROSS, 1991).

4° - Realizar os experimentos de acordo com o planejado (Montgomery, 1997). Detectar, documentar e analisar as anormalidades que ocorrerem na condução experimental. Quando for realizado, é vital que o processo experimental seja monitorado cuidadosamente, de modo que possa garantir que tudo está sendo feito de acordo com o planejamento pré-estabelecido. Erros no procedimento experimental nesse estágio, usualmente irão destruir a validade do ensaio. Os aspectos logísticos e de planejamento não devem ser subestimados.

5° - Estimar os efeitos dos fatores incluídos no modelo sobre a variação total da resposta. Métodos estatísticos devem ser usados para analisar as relações entre os fatores (variáveis independentes) e as respostas obtidas (variáveis dependentes), no intuito de se construir um modelo adequado para o produto ou o processo em estudo.

6° - Interpretar e discutir os resultados, recomendar melhorias, avaliando os resultados experimentais. Determinados parâmetros de projeto poderão tornar-se evidentes na melhoria dos níveis de satisfação desejados (ANDERSON & KRABER, 1999).

## **3.2 - O Projeto Padrão**

Um bom projeto experimental necessita ter alguns elementos essenciais. Entre eles, estão: a replicação e a aleatorização. Existe uma diferença entre replicação e repetição. Quando um experimento é repetido, um conjunto de fatores está sendo aplicado em uma única unidade experimental. A replicação ocorre quando os experimentos são conduzidos com unidades experimentais diferentes (PAIVA, 2004).

Nesse caso, a variação no resultado dos experimentos pode ser avaliada, e o erro, se existir, identificado. Quando, por exemplo, dois protótipos idênticos são lançados simultaneamente, a diferença de desempenho entre os dois pode ser comparada, e as causas desta variação avaliadas (MONTGOMERY, 1997).

Outro critério também importante é a aleatorização. Quando se aleatoriza um experimento, aumenta-se sua validade, porque se dilui a influência de fatores incontrolláveis e se diminui a possibilidade de uma condução tendenciosa (Anderson & Kraber, 1999;

Montgomery, 1997). Quando se conhece previamente a configuração de um experimento, pode-se contribuir para a ocorrência de seu resultado. A aleatorização garante que o resultado do experimento seja independente da ordem na qual ele foi executado.

Uma vez selecionados os fatores e seus respectivos níveis, passa-se à fase de execução dos experimentos. A ordem-padrão usada pelo DOE (*Design of Experiments*) para experimentos que estão balanceados, ou seja, os dois níveis dos fatores se repetem um igual número de vezes. Esse procedimento é um planejamento fatorial em dois níveis e pode ser representado por  $N = 2^k$ , onde N representa o número de experimentos em dois níveis para K fatores (PAIVA, 2004).

Pode-se visualizar também o número de experimentos através de uma Figura 3.1, adaptada do software estatístico Minitab®, notando-se que pode haver diversas resoluções para certo número de fatores e experimentos.

		Factors													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Runs	4	Full	III												
	8		Full	IV	III	III	III								
	16			Full	V	IV	IV	IV	III						
	32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
	64					Full	VII	V	IV						
	128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Figura 3.1 – Relação entre fatores, resoluções e quantidade de experimentos (Software Minitab®).

Em um *design* de Resolução III, os fatores principais confundem-se com interações de 2ª ordem; em um de Resolução IV, os fatores principais confundem-se com interações de 3ª ordem e as interações duplas confundem-se entre si e assim, sucessivamente. Segundo Montgomery et al. (1997), deve-se sempre utilizar o projeto que possua a resolução mais alta.

### 3.3–Fatoriais Completos

Um planejamento fatorial é completo quando todas as possíveis combinações entre os fatores envolvidos são experimentadas (Box, Hunter & Hunter, 1978). Quando um determinado conjunto de parâmetros é aplicado a um objeto de estudo pode-se determinar uma resposta inicial para o ensaio. Quando se altera o nível dos parâmetros, a resposta inicial

pode sofrer uma alteração. Essas mudanças denominam-se tratamentos. Para se descobrir se dois ou mais tratamentos (conjunto de níveis dos diferentes fatores) são significativamente diferentes, é necessário se quantificar as variações ocorridas na variável de resposta quando os tratamentos específicos são aplicados. Uma vez que a variável de resposta é função dos tratamentos, um modelo estatístico pode ser definido para descrever o comportamento das observações (PAIVA, 2004).

O objetivo de uma análise fatorial é determinar que fatores e respectivos níveis sejam significativos para a variação na resposta *Y*. Considere-se o exemplo descrito na Tabela 3.1, onde as respostas dos experimentos estão em funções de duas variáveis: Pressão e Temperatura.

Tabela 3.1– Exemplos de níveis e fatores (Adaptada Paiva, 2004)

Fatores	Níveis dos Fatores	
	Inferior (-)	Superior (+)
<b>A (Pressão) – em PI</b>	60	80
<b>B (Temperatura) – em °C</b>	225	250

O número máximo de experimentos que se pode realizar com esse conjunto de dois fatores em dois níveis é igual a  $2^2$  (4) experimentos e com uma réplica (8) experimentos. Atribuindo-se aos níveis destas variáveis os códigos (+1) para o nível superior e (-1) para o nível inferior, e, considerando-se todas as combinações de fatores e respectivas respostas, pode-se estabelecer o arranjo da Tabela 3.2. A resposta *Y* do experimento é função exclusiva das variáveis *X1* (Temperatura) e *X2* (Pressão), o que pode ser generalizado como:  $Y = f(X1, X2, X3, \dots, Xn)$ .

Tabela 3.2 – Arranjo fatorial em 2 níveis para 2 fatores e uma réplica (Adaptada Paiva, 2004)

Ordem	Temperatura	Pressão	Y
<b>1</b>	-1	-1	130
<b>2</b>	+1	-1	150
<b>3</b>	-1	+1	34
<b>4</b>	+1	+1	136
<b>5</b>	-1	-1	155
<b>6</b>	+1	-1	188
<b>7</b>	-1	+1	40
<b>8</b>	+1	+1	122

Escrevendo-se um modelo geral para esse conjunto de fatores, tem-se que a equação 3.1:

$$Y = \text{Constante} + \text{Efeito da Temperatura} + \text{Efeito da Pressão} + \text{Efeito da Interação} \quad (3.1)$$

### **3.4–Análise de Variância (ANOVA)**

A Análise de Variância (ANOVA) é uma técnica utilizada para se testar a igualdade entre médias de vários grupos (Montgomery & Runger, 2003; Neto, 2002). Quando dois níveis de um fator geram respostas médias estatisticamente iguais, significa que o fator não influencia a resposta. Quando, ao contrário, a resposta média em um nível específico é estatisticamente diferente daquela obtida nos outros níveis, o fator é significativo (PAIVA, 2004).

O parâmetro de teste utilizado pela ANOVA para verificar a igualdade entre as médias baseia-se na relação existente entre a variação dentro de um tratamento (*Within*) e a variação entre tratamentos (*Between*), (MONTGOMERY & RUNGER, 2003).

A variação dentro origina-se das replicações. Calculando-se a média das replicações, obtém-se a média dentro do tratamento. Quanto mais às replicações diferirem desta média, maior será a variação dentro deste tratamento. Dividindo-se a variação Entre pela variação Dentro obtém-se a Estatística de Teste F, que, quando comparada com um valor de *F crítico*, definido segundo o nível de significância e o número de graus de liberdade, possibilita a aceitação ou rejeição da hipótese nula, acerca da igualdade entre as médias dos níveis dos fatores (BALESTRASSI, 2003).

A análise estatística é um item crucial para uma boa pesquisa científica, pois ela dá o alicerce para a discussão dos resultados e também credibilidade e confiabilidade nos dados. A análise de variância é uma parte da estatística que procura verificar diferenças entre médias entre mais de dois grupos. As diferenças entre grupos podem ser de origem qualitativa (como tratamentos, classificações ou agrupamentos) ou quantitativa (número de amostragens). A análise de variância constitui-se, em outras palavras, de um teste de hipóteses com mais de dois grupos distintos. A sigla ANOVA vem do inglês *Analysis of variance*. Atualmente o método é amplamente utilizado na biológica, engenharia, computação, economia e pesquisas de campo. O teste ANOVA foi criado por R. A. Fischer, e se divide em duas formas, o método com um e dois critérios de avaliação. O teste ANOVA com um critério de avaliação (*one way*) procura analisar a diferença simples entre grupos. O teste assume que a variação

total da medida é resultado da soma da variação entre grupos com a variação dentro do grupo. A partir disso, é assumida como hipótese padrão a igualdade entre as médias, e então realizada a razão entre a média total de variância entre e dentro do grupo. O resultado obtido é então comparado com a tabela de distribuição F, com o respectivo valor de significância (geralmente 0,05%) e os graus de liberdade entre e dentro dos grupos. Se o valor de F obtido for maior que o definido pela tabela de distribuição então haverá diferença significativa entre os grupos. A partir daí é possível utilizar vários métodos para determinar qual grupo possui diferença significativa com os outros, por meio do teste de *Tukey*, *Student-Newman-Keuls* (*SNK*), *Bonferroni*, *Dunnet* ou *Scheffé*, por exemplo, (MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. C, 2011).

No caso do teste ANOVA com dois critérios de avaliação (*two way*), procura-se analisar a diferença entre grupos e também em subdivisões no grupo. Por exemplo, analisar a diferença de diferentes remédios na população e adotar também diferenças de idades entre os grupos. Neste caso, a hipótese padrão será a mesma, contudo assume-se que a variação total será resultado da soma da variação entre os grupos, com a variação dos subgrupos e a variação residual entre os grupos. A partir destas considerações, o resto da análise segue o mesmo procedimento do teste *one way*, inclusive utilizando os diversos testes citados para averiguar quais itens possuem diferenças significativas, (SIDIA, 2003).

O teste ANOVA, portanto é uma ferramenta de fundamental importância para se analisar com confiabilidade os dados de um experimento. Contudo, deve-se ressaltar que a estatística inteira é de extrema importância, pois é um ramo da matemática que se preocupa com a análise de dados, e por isso deveria ser mais estudada tanto no ensino básico quando no superior. Além disso, também deveria ser mais utilizado no campo da pesquisa científica, (MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. C, 2011).

### **3.5–Análise Gráfica**

A análise gráfica em um projeto de experimentos tem duas finalidades: examinar o comportamento dos fatores principais, interações e avaliar a natureza dos resíduos.

#### **3.5.1–Diagrama de Pareto**

O diagrama de Pareto é um histograma ordenado de maneira decrescente disponível no software MINITAB® que permite expressar-se graficamente uma priorização. O diagrama de

Pareto procura separar as poucas causas vitais das muitas causas triviais. Dentro da metodologia de Projeto de Experimentos (DOE), este diagrama é usado para demonstrar que efeitos e interações são significativos para um determinado modelo. Quando há replicações dos experimentos, a linha de referência desenhada sobre o diagrama de Pareto é dada pela Estatística *t de student* ( $\alpha$ ;  $df$  (MSE)), onde  $\alpha$  é o nível de significância e  $df$ (MSE) são os graus de liberdade da média quadrática do erro. Qualquer efeito padronizado que ultrapasse a linha de referência é tido como significativo (Figura 3.2). Neste exemplo a temperatura e a pressão foram significativas para a resposta, pois atravessaram a linha de referência vertical. O efeito padronizado é encontrado dividindo-se o valor do coeficiente do Fator pelo respectivo erro padrão (PAIVA, 2004).

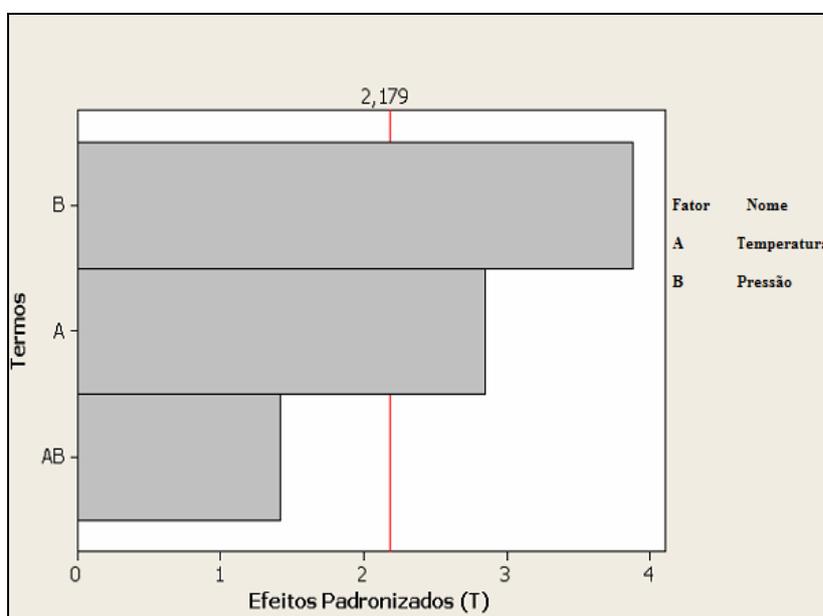


Figura 3.2– Exemplo do diagrama de Pareto: efeitos dos elementos e suas interações (Adaptada Paiva, 2004)

### 3.5.2- Gráfico Fatorial

O *Factorial Plot* é um gráfico disponível no software MINITAB® que permite avaliar como se comportam os níveis dos fatores envolvidos na experimentação em relação à resposta desejada (PAIVA, 2004). Segundo Box *et al.*, (1978), o efeito de um fator é a mudança causada na resposta de um experimento quando se altera de  $-1$  para  $+1$  o nível de um fator. De maneira semelhante, o coeficiente de um fator é a mudança causada na resposta de um

experimento quando um fator se altera de -1 para 0, ou de 0 para +1. Dessa maneira, pode se escrever que a Equação 3.1:

$$\text{coeficiente} = \frac{\text{efeito}}{2} \quad (3.1)$$

Os coeficientes dos fatores são os coeficientes de regressão de um polinômio ajustado que inclui um termo constante, termos lineares e os produtos dos termos lineares. Observando-se a Figura 3.3, nota-se que, se a resposta do experimento for do tipo “quanto maior, melhor”, a otimização da resposta seria obtida com os níveis (+) da temperatura e (-) da pressão. Assim, estabelece-se um padrão operacional otimizado para o processo (PAIVA,2004).

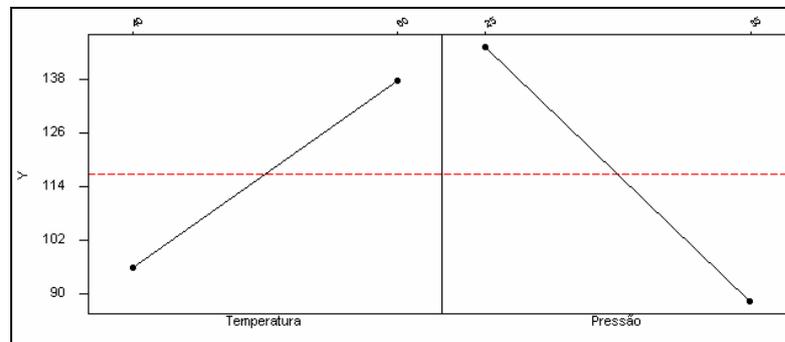


Figura 3.3 – Exemplo do *Factorial Plot* para os efeitos principais (Adaptada Paiva 2004)

### 3.6 - Teste Para Significância Do Modelo

Este teste é realizado como um procedimento de ANOVA. Calculando-se a razão entre a média quadrática dos termos de regressão e a média quadrática do erro, encontra-se a estatística F. Comparando-se esta estatística com o valor crítico de F obtido a partir do nível de significância desejado, conclui-se sobre a significância do modelo. Se F for maior que  $F_{\text{crítico}}$  (o que equivale a um valor P menor que o nível de significância), então o modelo é adequado (MONTGOMERY, 2001).

### 3.7-Teste Para Significância Individual Dos Coeficientes Do Modelo

O teste individual de significância de cada coeficiente pode conduzir à otimização do modelo através da eliminação ou da adição de termos. Se o valor P do teste individual para os

termos for inferior ao nível de significância, então, o termo é adequado ao modelo e deve, portanto, ser mantido. Ao contrário, o termo deve ser excluído se tal procedimento conduzir a um aumento do coeficiente de determinação  $R^2$  conjuntamente com a diminuição do erro residual  $S$  e o valor de  $P$  referente à falta de ajuste do modelo for superior ao nível de significância. Além disso, a retirada de qualquer termo deve obedecer ao princípio da Hierarquia (Montgomery, 2001). Este princípio postula que quando um termo de ordem alta é mantido no modelo, o de ordem baixa que o compõe também deve ser conservado. Por exemplo, se a interação  $AB$  é significativa, mas o efeito principal  $A$  não o é, então o modelo deve conservar ambos.

### 3.8- Medidas De Adequação De Modelos De Regressão

A medida mais comum de adequação de um modelo é o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Este termo representa o percentual de variação na resposta que é explicada pelo modelo construído. Associado a este coeficiente encontra-se o  $R^2$  ajustado ( $R^2$  adj.), que considera o fato de que  $R^2$  tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população. Também é fato que a inclusão de muitos termos no modelo de regressão aumenta substancialmente o valor de  $R^2$ . Se o modelo recebeu fatores adicionais desnecessários, haverá um incremento em  $R^2$ , sem haver, necessariamente, melhoria de informação na resposta. É por este motivo que o valor de  $R^2$  ajustado é mais apropriado para se comparar modelos com diferentes quantidades de termos. O valor de  $R^2$  pode ser calculado aplicando-se a equação (3.2).

$$R^2 = \frac{SQM}{SQ_T} = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} \quad (3.2)$$

Já o  $R^2$  ajustado é uma modificação que considera o número  $p$  de variáveis incluídas no modelo. Observando-se a Equação (3.3), nota-se que o valor ajustado decresce à medida que  $p$  aumenta.

$$R^2_{aj} = 1 - \left( \frac{n-1}{n-p} \right) (1 - R^2) \quad (3.3)$$

## **Capítulo 4**

# **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **4.1- Considerações Iniciais**

Os experimentos realizados neste trabalho foram executados no Laboratório de Automação Manufatura (LAM) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Com a realização dos experimentos obteve-se um conjunto de dados que permitiram fazer uma análise dos efeitos dos parâmetros de corte e das forças de usinagem sobre a rugosidade da peça no torneamento da superliga Bronze de Alumínio.

Assim este capítulo apresenta o planejamento experimental e a metodologia utilizada nos ensaios, descrevendo características do material usinado, as especificações das ferramentas de corte, da máquina-ferramenta, e do monitoramento da força de usinagem e da medição da rugosidade.

### **4.2-Planejamento Experimental**

O método de pesquisa científico adotado neste trabalho foi a pesquisa experimental. A pesquisa experimental é um método quantitativo e deve ser utilizado quando o pesquisador, que possui total controle sobre o experimento (característica essencial deste método de pesquisa), quer demonstrar as relações de causa e efeito entre as variáveis independentes e dependentes utilizando técnicas de análise estatística (BRYMAN, 1989).

Posteriormente, um processo de manufatura específico foi escolhido para a aplicação do método proposto no trabalho, em virtude de sua grande aplicação no setor industrial. Trata-se do processo de torneamento da superliga bronze de alumínio.

## 4.3- Materiais, Máquinas, Ferramentas e Instrumentos de Medição

### 4.3.1 – Materiais

O material dos corpos de prova foi a superliga bronze de alumínio UNS C63020, com a composição química descrita na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Composição da liga Bronze de Alumínio

<b>Cu</b>	<b>Al</b>	<b>Ni</b>	<b>Fe</b>
<b>78,5%</b>	10,5%	5,1%	4,8%

As peças de trabalho usadas no processo de usinagem foram feitas com dimensões de  $\varnothing 25 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  conforme Figura 4.1.

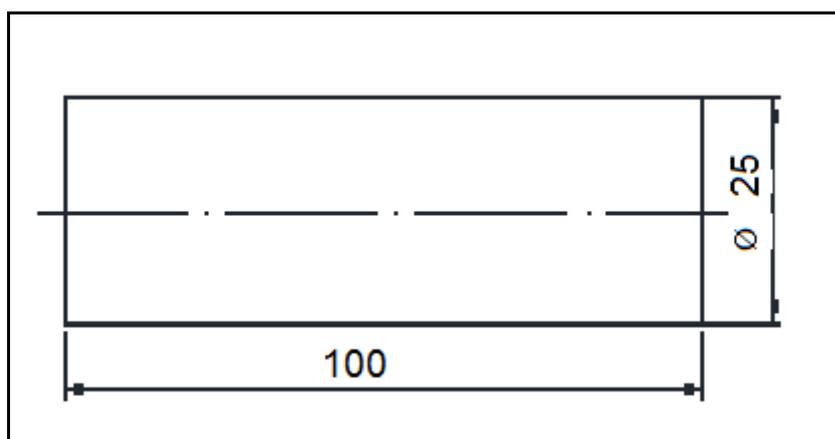


Figura 4.1 – Dimensão do corpo de prova utilizado.

Todos os corpos de prova foram tratados termicamente conforme a norma AMS 4590 (TQ50). Eles foram previamente temperados em uma faixa de temperatura de 843 a 899°C (com variação de 14°C para mais ou para menos), o material foi mantido nesta condição por no mínimo 2 horas e em seguida foi levado a água para realização da têmpera e fez o revenimento elevando-se a temperatura para a faixa de 482 a 538°C (com variação de 8°C para mais ou para menos) por no mínimo 2 horas. O resfriamento após o revenimento foi feito no ar até se atingir a temperatura ambiente. Neste tratamento a liga atinge o ponto onde há formação da fase  $\beta$  que, quando resfriada bruscamente, propicia a formação de uma microestrutura martensítica  $\beta'$ . Ao se revenir a liga, as tensões oriundas da transformação

martensítica são atenuadas. Após este tratamento térmico foi medida a dureza e a mesma ficou entre 31 e 34 HRC. A Figura 4.2 apresenta a micrografia do material utilizado nos estudos após o tratamento térmico, onde os pontos pretos representam a fase  $\beta'$  já discutida no capítulo anterior.

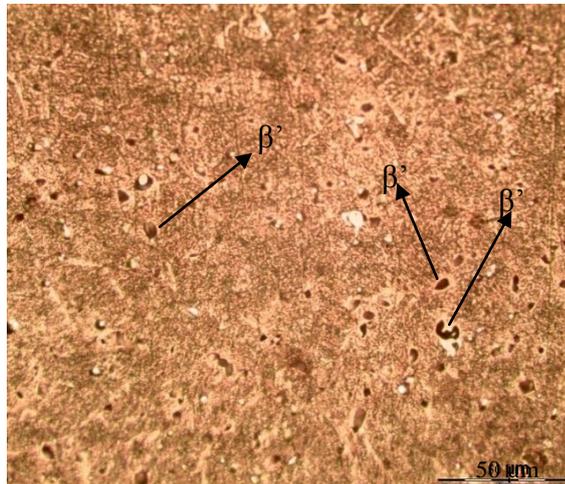


Figura 4.2. Amostra transversal atacada com cloreto férrico e ácido clorídrico durante 10s.

### 4.3.2 – Máquina

Para cumprir com os objetivos deste trabalho, torneamento a seco da superliga Bronze de Alumínio, foram realizados em um torno CNC Nardini Logic 175 com velocidade de rotação máxima de 4.000 rpm e potência de 5,5 KW, torre com oito posições e torque máximo de 200 Kgf.m. conforme Figura 4.3.



Figura 4.3 – Torno CNC Nardini.

NA Figura 4.4 é mostrado o processo de torneamento da liga utilizada neste estudo experimental.

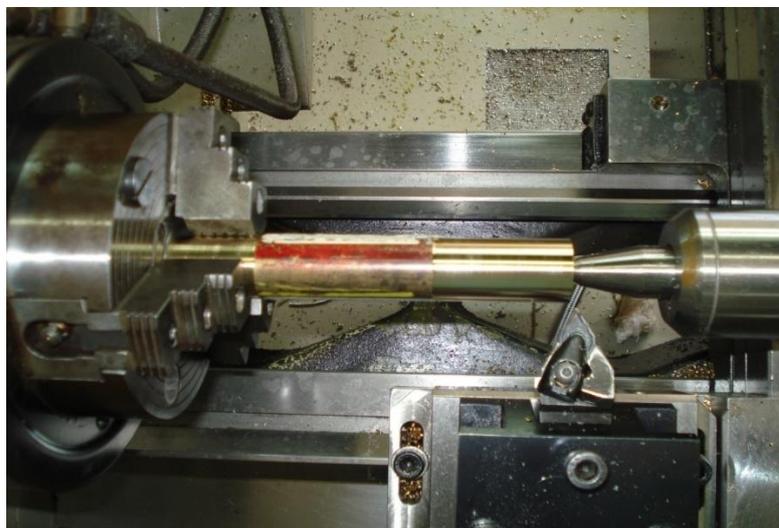


Figura 4.4- Processo de torneamento da liga de Bronze de Alumínio com a ferramenta fixada ao dinamômetro

### 4.3.3 - Ferramentas

Na Tabela 4.2 apresenta os códigos das ferramentas utilizadas no estudo. Em todos os ensaios foram utilizadas pastilhas de metal duro das classes ISO S05 e ISO S25 recobertas (TiAlN) pelo processo PVD (Sandvik Coromant Classes GC 1105 e 1125).

Tabela 4.2 – Geometria conforme ISO 3685 (1993)

	Pastilha	Ângulo de folga ( $\alpha_0$ )	Ângulo de inclinação ( $\lambda_s$ )	Ângulo de Posição (Xr)	Classe	Ângulo de Saída ( $\gamma$ )	Porta ferramenta
<b>Positiva Normal</b>	DCMT 11T308-MF	7°	0°	62,5°	GC 1105	0°	ISO SDNCN 1616K11-S
<b>Positiva Alisadora</b>	DCMX 11T308-WF	7°	0°	93°	GC 1125	0°	ISO SDJCL 1616K11-S
<b>Negativa Normal</b>	DNMG 150408-SM	0°	-9°	62,5°	GC 1105	-5°	ISO DDNNN 2525M15
<b>Negativa Alisadora</b>	DNMX 150408-WF	0°	-7°	93°	GC 1125	-6°	ISO DDJNR 2525M15

As Figuras 4.5 e 4.6 ilustra as ferramentas positiva (normal e alisadora) e negativa (normal e alisadora).

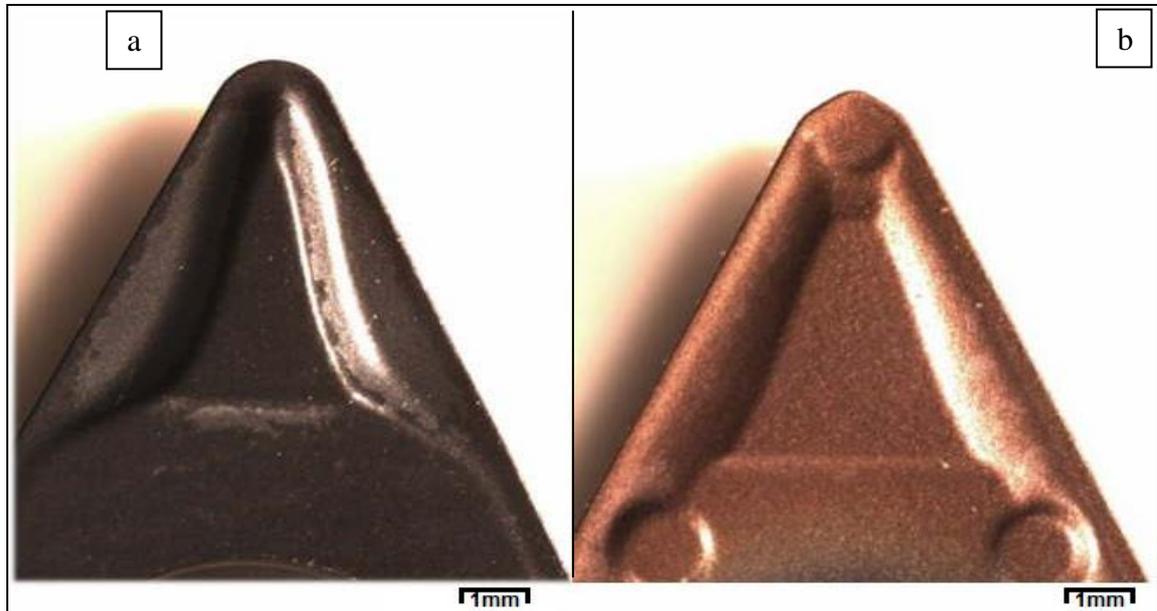


Figura 4.5– Fotos da ferramenta positiva a-Normal e b-Alisadora – (aumento de 20x)

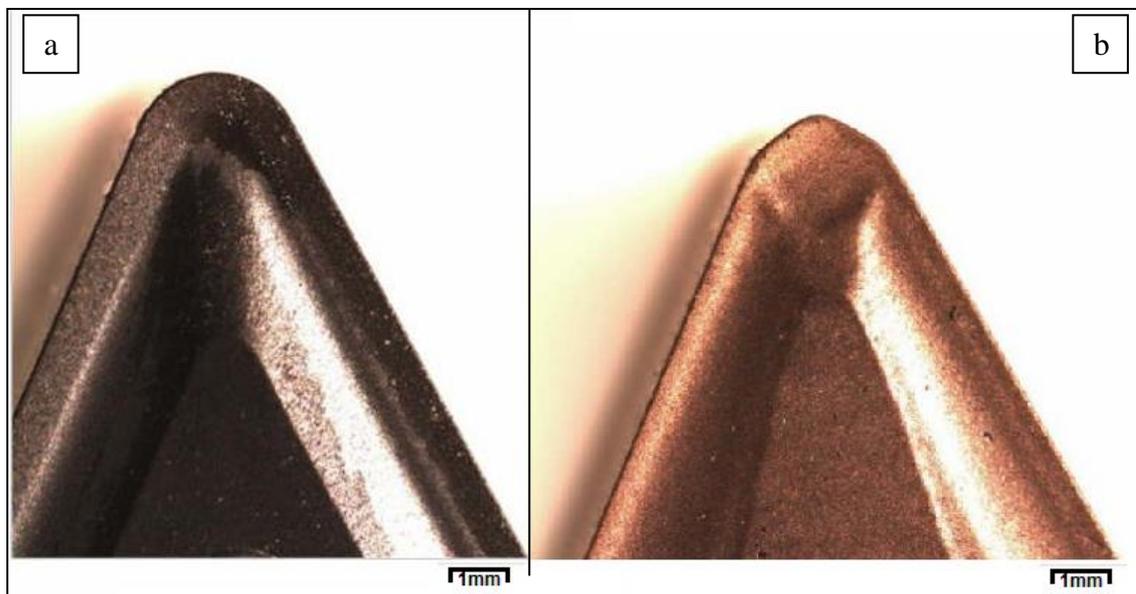


Figura 4.6– Fotos da ferramenta negativa a-Normal e b-Alisadora– (aumento de 20x)

#### 4.3.4 – Instrumentos de Medição

Para a medição dos valores de rugosidade de cada corpo de prova, após o torneamento dos mesmos, foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ-201P (Figura 4.7). Os valores medidos para as variáveis de resposta  $R_a$  e  $R_t$  foram obtidos simultaneamente, durante o percurso da unidade de avanço e posteriormente registrados em planilha eletrônica. Este rugosímetro é periodicamente calibrado pelo laboratório de metrologia da UNIFEI.



Figura 4.7 – Rugosímetro utilizado no experimento.

No presente trabalho foi utilizado para medição das forças de corte um dinamômetro KISTLER modelo 9443B, um microcomputador equipado com uma placa de aquisição de dados e programa para leitura e conversão dos dados de pico Coloumb (pC) para Newton (N). A Figura 4.8 mostra o esquema de montagem do sistema de medição de forças nos ensaios de torneamento.

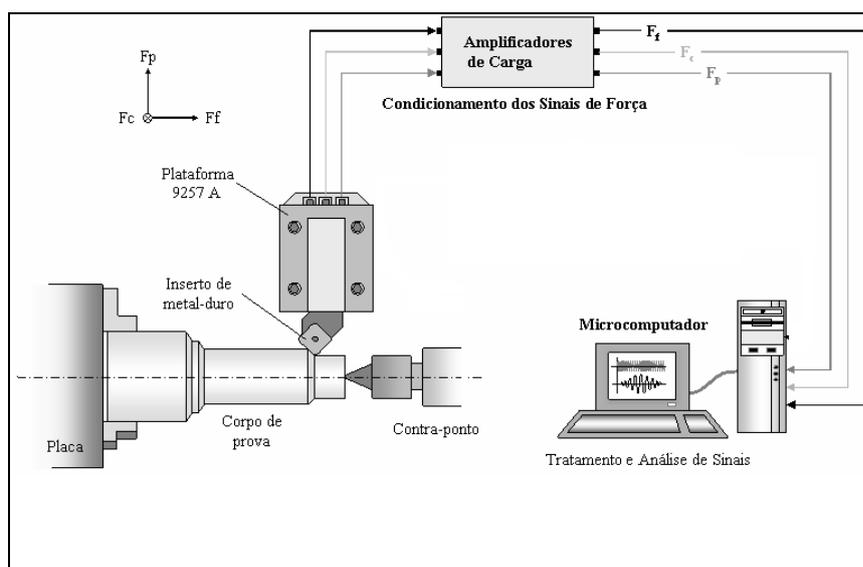


Figura 4.8- Montagem do sistema de medição de forças de usinagem.

## 4.4-Metodologia dos ensaios

O levantamento dos dados propriamente dito é uma atividade muito importante na execução do trabalho. Um banco de dados mal elaborado pode conduzir a resultados insatisfatórios ou deficientes. Desta forma, é extremamente importante o planejamento detalhado do experimento, bem como sua adequada execução e registro. A Figura 4.9 apresenta o diagrama de processo para o sistema investigado.

As variáveis de controle adotadas para esse procedimento foram velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e a geometria da ferramenta (raio de ponta normal e alisador). Estas variáveis são reconhecidas como as mais importantes, uma vez que influenciam fortemente o processo de torneamento, principalmente o acabamento superficial da peça e as forças de usinagem.



Figura 4.9–Variáveis de controle e de saída os experimentos  
Fonte: Paiva, 2010 (adaptado pelo autor).

Inicialmente, foram definidos quais valores seriam adotados para cada nível das variáveis de controle consideradas neste trabalho. O experimento foi realizado sem o *Center point*, pois possui uma variável de controle discreta que é a geometria da ferramenta (normal e alisadora) sendo o mesmo realizado somente com uma réplica. Esta definição é importante para que não sejam adotados valores que inviabilizem a execução do experimento ou que resultem em condições inseguras para sua execução. Para tanto, são consideradas algumas informações de catálogo da máquina, da ferramenta e do material que será usinado. Os valores arbitrados para cada nível das variáveis de controle consideradas neste trabalho estão descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Variáveis de controle.

<b>Variáveis de Controle</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Níveis</b>	
<b>Velocidade de Corte</b>	vc [m/min]	200	300
<b>Avanço</b>	f [mm/v]	0,15	0,30
<b>Geometria da ferramenta</b>	G	Normal	Alisadora

Um conjunto sequencial de experimentos foi realizado antes dos experimentos reais para se coletar e se obter as melhores rugosidades ( $R_a$  e  $R_t$ ) e se definir os melhores intervalos de velocidade de corte e avanço com resposta na rugosidade da peça.

Foram realizados os ensaios com a ferramenta negativa e em seguida com ferramenta positiva (normal e alisadora) para obtenção dos valores dos melhores parâmetros de corte, de rugosidade e das forças de usinagem ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ).

Os ensaios de torneamento foram dimensionados de forma a proporcionar uma maneira clara e precisa de se estudar a influência da velocidade de corte, avanço e geometria da ferramenta de corte na rugosidade da peça e nas forças de usinagem, através da aplicação da metodologia de projeto de experimentos (DOE), através de um arranjo fatorial completo com 3 fatores e 2 níveis. Então, fazendo um fatorial completo ( $2^3$ ) com uma réplica obteve-se um total de 16 experimentos aleatorizados para cada ensaio (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Planilha de contraste gerada no software Minitab para um fatorial completo com 3 fatores, 2 níveis e 1 réplica

Nº do Ensaio	vc (m/min)	f (mm/v)	Geometria (normal-alisadora)
1	300	0,30	Alisadora
2	300	0,15	Alisadora
3	200	0,30	Alisadora
4	300	0,30	Alisadora
5	200	0,30	Normal
6	200	0,30	Normal
7	300	0,15	Normal
8	200	0,15	Alisadora
9	300	0,30	Normal
10	200	0,15	Alisadora
11	300	0,15	Alisadora
12	200	0,30	Alisadora
13	300	0,30	Normal
14	300	0,15	Normal
15	200	0,15	Normal
16	200	0,15	Normal

As medições de rugosidade foram realizadas uma vez em cada um dos três pontos (A, B, C) girando o corpo de prova e fazendo as medições nos pontos (1, 2, 3 e 4), de uma reta paralela ao eixo longitudinal do corpo de prova, conforme esquema ilustrado na Figura 4.10, após as medições de rugosidade era realizada a média aritmética dos valores encontrados para os parâmetros Ra e Rt.

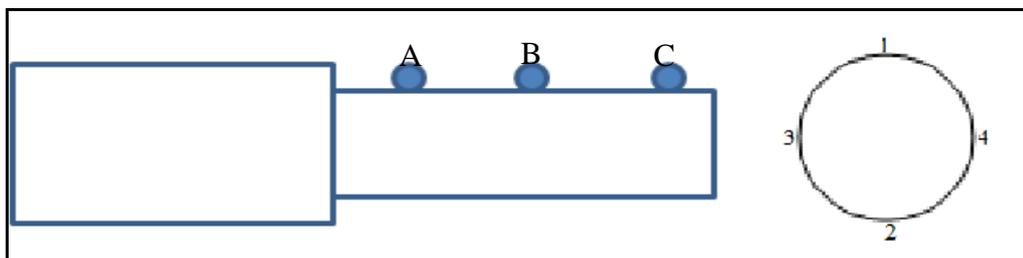


Figura 4.10- Posições de leitura da rugosidade nos corpos de prova.

Para a medição das forças de usinagem foi utilizado um programa para aquisição dos dados para fazer uma leitura a cada teste. Após os testes o programa gera um gráfico de medição das forças ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) conforme ilustrado na Figura 4.11, e a média aritmética dos valores foi obtida pelo próprio programa e registrada em uma planilha eletrônica.

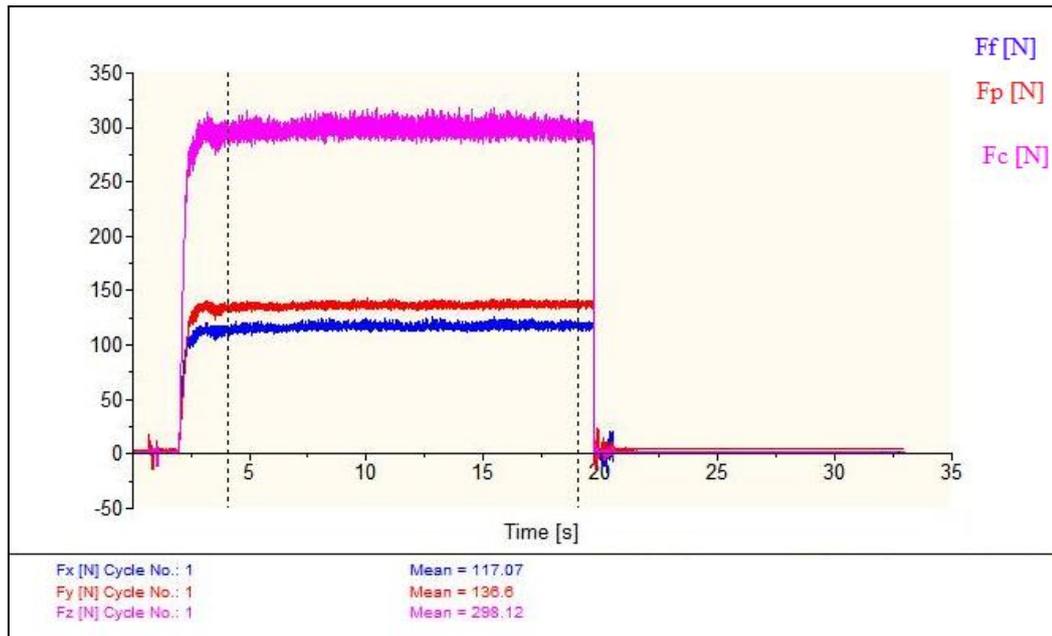


Figura 4.11- Gráfico das componentes das forças de usinagem medidas pelo dinamômetro.

Utilizando-se a metodologia de projeto de experimentos, os ensaios seguiram uma ordem pré-estabelecida designada pela própria metodologia em questão. Foram inicialmente ensaiadas dezesseis combinações diferentes de parâmetros de usinagem incluindo as réplicas, para a obtenção de um fatorial completo (*Full Factorial*) para as futuras análises e interações dos fatores e suas devidas respostas que serão apresentados no próximo capítulo.

## Capítulo 5

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho tem por objetivo estudar no processo de torneamento da superliga bronze de alumínio, a influência da variação dos parâmetros velocidade de corte, avanço e geometria da ferramenta na rugosidade ( $R_a$  e  $R_t$ ) e nas forças de usinagem ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ). Para atingir este objetivo, foi utilizada a metodologia de projeto de experimentos, através da qual foram gerados modelos matemáticos para a rugosidade da peça e para as forças de corte.

### 5.1- Modelo de Rugosidades ( $R_a$ e $R_t$ ) para ferramenta negativa (normal e alisadora)

Através da elaboração de um arranjo fatorial completo com uma (1) réplica proceder-se-á à análise dos dados obtidos experimentalmente. A Tabela 5.1 apresenta os resultados da rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  ( $\mu\text{m}$ ) para as dezesseis condições ensaiadas necessárias à obtenção das respostas seguidas de suas respectivas réplicas para as ferramentas negativa.

Nestes ensaios foram variados os parâmetros de usinagem, adotando-se a velocidade de corte ( $v_c$ ) entre os níveis 200 m/min e 300 m/min, avanço ( $f$ ) entre os níveis 0,15 mm/v e 0,30 mm/v e profundidade de usinagem fixa  $a_p=1$  mm e a geometria da ferramenta com raio de ponta normal e alisador. Observa-se que os parâmetros de rugosidades  $R_a$  obtidos nos ensaios para a superliga bronze de alumínio foram relativamente baixos, visto que o avanço ( $f$ ) variou de 0,15 a 0,30 mm/v. A rugosidade média  $R_a$  ficou na faixa de 0,26-3,63  $\mu\text{m}$  e a rugosidade máxima  $R_t$  ficou na faixa de 2,7-22,35  $\mu\text{m}$ . Justifica-se estes resultados de  $R_a$  pelo efeito alisador da geometria de corte da ferramenta de metal duro e pela dureza da peça na faixa de 35 HRC. Cabe salientar que o torno CNC utilizado é de pequeno porte e não apresenta grande rigidez.

Tabela 5.1– Fatorial completo  $2^3$  com réplicas para ferramenta negativa, para as respostas de Rugosidades (Ra e Rt).

<b>Nº do Ensaio</b>	<b>vc (m/min)</b>	<b>f (mm/v)</b>	<b>Geometria (normal-alisadora)</b>	<b>Ra (µm)</b>	<b>Rt (µm)</b>
<b>1</b>	300	0,30	Alisadora	1,19	7,11
<b>2</b>	300	0,15	Alisadora	0,29	2,70
<b>3</b>	200	0,30	Alisadora	1,59	8,15
<b>4</b>	300	0,30	Alisadora	1,20	5,62
<b>5</b>	200	0,30	Normal	3,71	18,92
<b>6</b>	200	0,30	Normal	3,74	19,21
<b>7</b>	300	0,15	Normal	0,86	4,61
<b>8</b>	200	0,15	Alisadora	0,29	2,75
<b>9</b>	300	0,30	Normal	3,68	16,29
<b>10</b>	200	0,15	Alisadora	0,29	2,75
<b>11</b>	300	0,15	Alisadora	0,26	2,57
<b>12</b>	200	0,30	Alisadora	1,61	7,82
<b>13</b>	300	0,30	Normal	3,63	15,78
<b>14</b>	300	0,15	Normal	0,87	4,61
<b>15</b>	200	0,15	Normal	0,74	3,69
<b>16</b>	200	0,15	Normal	0,74	3,69

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam as rugosidades Ra e Rt da ferramenta de metal duro negativa (normal e alisadora) para cada uma das condições ensaiadas. Observou-se que os experimentos foram coerentes, principalmente no tocante à repetitividade, visto que as rugosidades Ra e Rt no torneamento da superliga bronze de alumínio, apresentaram valores bastante próximos nos ensaios e em suas respectivas réplicas, fato este que evidencia a consistência dos ensaios realizados, o que será de grande importância para o bom andamento do presente estudo. Pode-se constatar também a eficácia da geometria alisadora quando se trabalha com o avanço ( $f=0,3$  mm/v), ou seja, nestes casos haverá uma redução significativa das rugosidades Ra e Rt. Enquanto que nos ensaios com avanço ( $f=0,15$  mm/v) a geometria normal alcançou também bons níveis de rugosidade Ra e Rt.

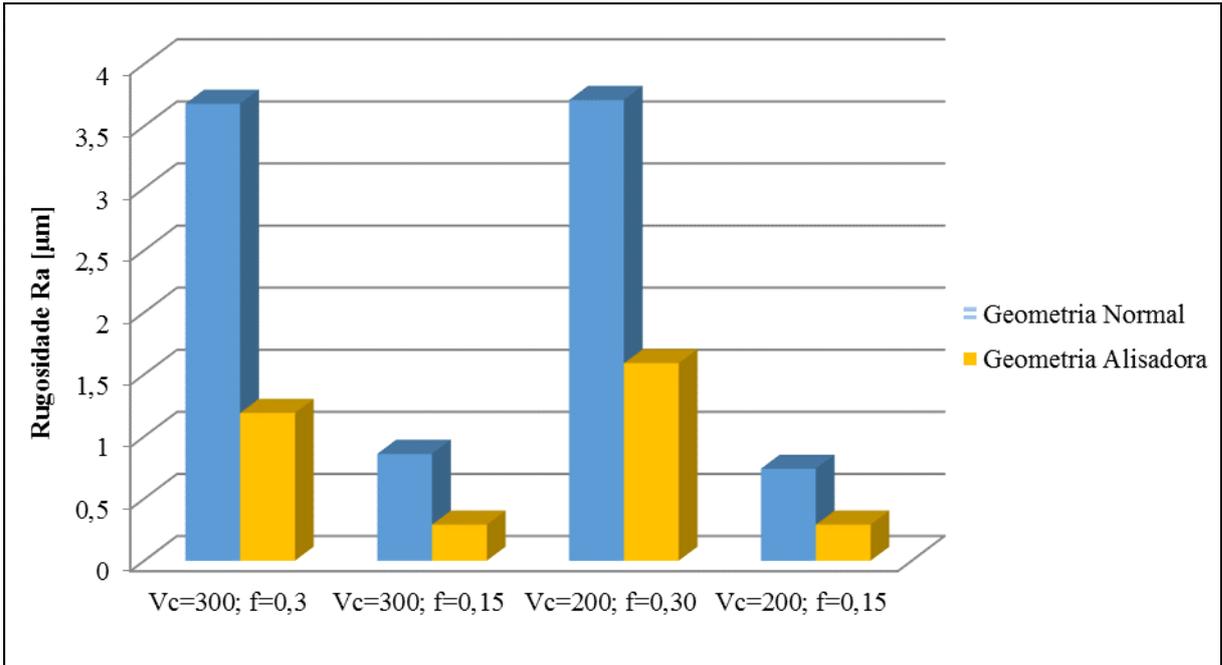


Figura 5.1- Rugosidade Ra para os pontos fatoriais para ferramenta negativa com geometria alisadora e normal.

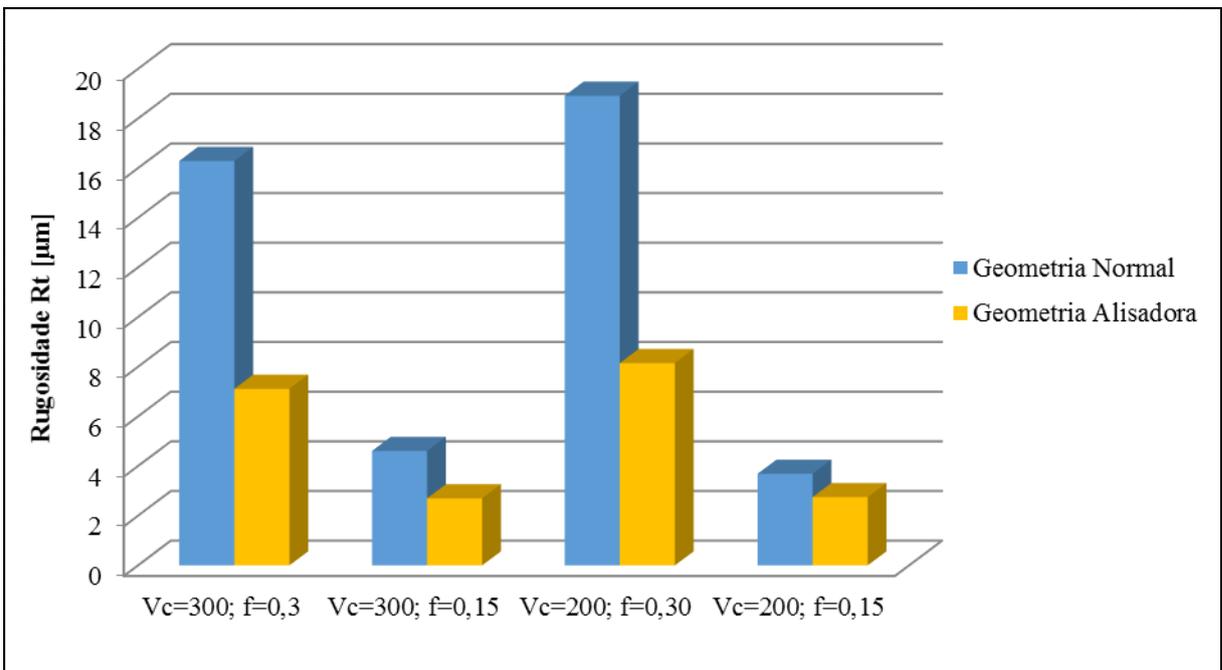


Figura 5.2- Rugosidade Rt para os pontos fatoriais para ferramenta negativa com geometria alisadora e normal.

Nota-se que os valores de rugosidade Ra e Rt para os experimentos com a ferramenta com geometria alisadora foram menores que os experimentos da ferramenta com geometria normal, o que já era de esperar, pois a geometria alisadora possui neste caso três raios de

ponta adjacentes, conferindo uma diferente interação com a superfície da peça e consequente mudança no acabamento da superfície usinada. Isso aumenta o comprimento de contato da aresta com a peça e o efeito das faixa de avanço de modo positivo. O raio da ponta alisador proporciona uma menor altura do perfil da aresta de corte na superfície gerada, o que tem o efeito de alisamento na superfície torneada (DINIZ *et al.*,2008).

A Tabela 5.2 apresenta a análise de variância (ANOVA) – que consiste de um teste para comparar-se médias, do fatorial completo com os três fatores e dois níveis ( $2^3$ ), com as respectivas réplicas, para a resposta rugosidade Ra.

Observa-se na Tabela 5.2 que os efeitos principais e as interações de 2ª e 3ª ordem são significativos para a rugosidade Ra, uma vez que os valores de P são inferiores ao nível de significância de 5% e que o fator avanço (f) foi o que obteve maior efeito sobre a rugosidade Ra.

Tabela 5.2– ANOVA para resposta Rugosidade (Ra)

<b>TERMO</b>	<b>EFEITO</b>	<b>COEF</b>	<b>SE COEF</b>	<b>T</b>	<b>P</b>
<b>Constante</b>		1,5513	0,01027	151,05	0,000
<b>vc</b>	-0,1075	-0,0538	0,01027	-5,23	0,001
<b>f</b>	2,0175	1,0087	0,01027	98,22	0,000
<b>geometria</b>	-1,3900	-0,6950	0,01027	-67,67	0,000
<b>vc x f</b>	-0,1625	-0,0813	0,01027	-7,91	0,000
<b>vc x geometria</b>	-0,1350	-0,0675	0,01027	-6,57	0,000
<b>f x geometria</b>	-0,8700	-0,4350	0,01027	-42,36	0,000
<b>vc x f x geometria</b>	-0,0650	-0,0325	0,01027	-3,16	0,013
S=0,0410792		R-Sq=99,95%	<b>R-Sq(adj)= 99,91%</b>		

Da mesma forma, observa-se na Tabela 5.3 que o avanço teve um maior efeito sobre Rt e a interação de 2ª ordem entre vc e geometria não foi significativo para a rugosidade Rt, pois seu valor de P foi superior ao nível de significância de 5%, já as demais interações foram todas significativas para Rt e seus respectivos valores inferiores ao nível de significância como discutido no Capítulo 3.

Tabela 5.3– ANOVA do fatorial completo 2<sup>3</sup> com réplicas para resposta Rugosidade (Rt)

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		8,088	0,2369	34,14	0,000
vc	-1,354	-0,677	0,2369	-2,86	0,021
f	9,334	4,667	0,2369	19,70	0,000
geometria	-6,309	-3,154	0,2369	-13,31	0,000
vc x f	-1,756	-0,878	0,2369	-3,71	0,006
vc x geometria	0,486	0,243	0,2369	1,03	0,335
f x geometria	-4,851	-2,426	0,2369	-10,24	0,000
vc x f x geometria	1,004	0,502	0,2369	2,12	0,067
S=0,0647724		R-Sq=98,87%	<b>R-Sq(adj)= 97,87%</b>		

A partir dos dados das Tabelas 5.2 e 5.3 pode-se obter os modelos lineares para as rugosidades Ra e Rt. Entretanto, os coeficientes de determinação dos modelos (R<sup>2</sup>adj) apresentam valores de 99,91% para Ra, 97,87% para Rt, o que significa que os modelos explicam adequadamente os fenômenos. O coeficiente de determinação mede o quanto o modelo explica a variação dos dados e quanto mais próximo de 100%, melhor será considerado o modelo. Os modelos, no entanto, apresentam um termo de erro *S* pequeno (0,0410792 e 0,0647724), o que não apresente falta de ajuste. Por esta razão decidiu-se empregar neste trabalho o modelo quadrático completo, que pode ser escrito em sua forma codificada, como apresentado pelas Equações 5.1 e 5.2:

$$Ra = 1,5513 - 0,0538*vc + 1,0087*f - 1,3900*geometria - 0,1625*vc*f - 0,1350*vc*geometria - 0,8700*f*geometria - 0,0650*vc*f \quad (5.1)$$

$$Rt = 8,088 - 0,677*vc + 4,677*f - 3,154*geometria - 0,878*vc*f + 0,243*vc*geometria - 2,426*f*geometria + 0,502*vc*f*geometria \quad (5.2)$$

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos e suas interações no comportamento da rugosidade Ra, pode ser obtida avaliando-se os resultados dispostos nas Figuras 5.3 e 5.4. Observa-se que todos os elementos exercem influência na rugosidade Ra, ressaltando os elementos, avanço, geometria da ferramenta e suas respectivas interações. Segundo Diniz *et al.*, (2008), o acabamento depende muito da relação entre avanço (*f*) e raio de ponta (*r<sub>e</sub>*), pois este par tem uma contribuição geométrica à rugosidade da peça. Machado *et*

al., (2009) dizem que o avanço é o fator mais influente, isto é, a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática com sua variação.

Na Figura 5.3 percebe-se, em primeiro lugar, o fator avanço de usinagem como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na rugosidade  $R_a$ , seguidos da geometria e da velocidade de corte, além das interações entre velocidade de corte e avanço de usinagem e entre avanço e geometria. Conforme pode ser observado, a interação de 3ª ordem, assim como a interação de 2ª ordem entre velocidade de corte e avanço e velocidade de corte e geometria também mostraram influencia na rugosidade  $R_a$ .

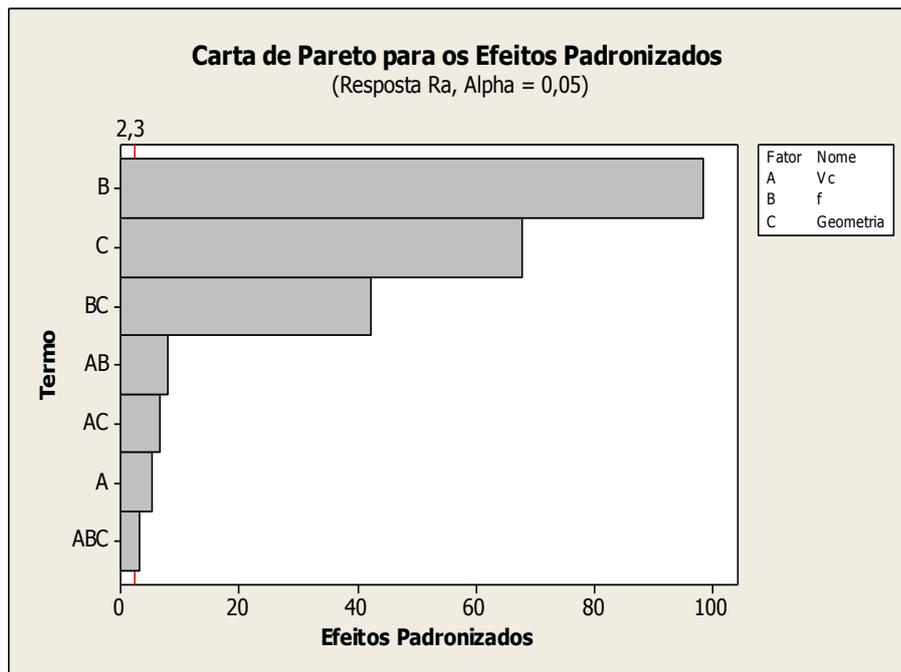


Figura 5.3 – Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Rugosidade  $R_a$

A Figura 5.4 apresenta o gráfico dos efeitos principais  $v_c$ ,  $f$  e geometria na rugosidade  $R_a$  com a geometria normal e alisadora. Nota-se que o efeito avanço ( $f$ ) concorreu para o aumento da rugosidade  $R_a$  quando em seu nível superior, ou seja, com o aumento do avanço a rugosidade  $R_a$  também aumenta, o que acontece ao contrário com a geometria da ferramenta, o que já era de se esperar, pois com a geometria alisadora espera-se encontrar baixas rugosidades devido ao seu efeito alisador, comparando-se com a geometria normal.

Nota-se que a velocidade de corte ( $v_c$ ) não obteve uma forte influência na rugosidade  $R_a$  se comparado com o fator avanço ( $f$ ).

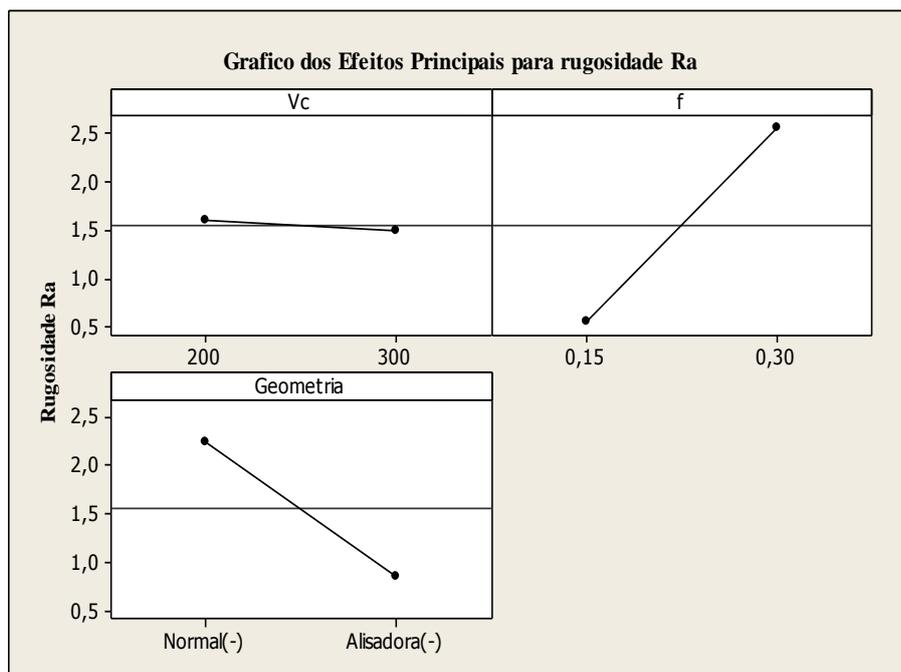


Figura 5.4 – Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na rugosidade Ra

Fazendo também uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos e suas interações no comportamento da rugosidade  $R_t$ , pode ser obtida avaliando-se os resultados dispostos na Figuras 5.5 e 5.6. Observa-se que todos os elementos exercem influência na rugosidade  $R_t$ , ressaltando os elementos, avanço, geometria e a interação de 2ª ordem entre avanço e geometria. Em primeiro lugar, nota-se o fator avanço (f) como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na rugosidade  $R_t$  como na análise de  $R_a$ , seguidos da geometria e da velocidade de corte, além das interações de 2ª ordem entre velocidade de corte e avanço e entre avanço e geometria. Conforme pode ser observado na Figura 5.5, a interação de 3ª ordem, assim como a interação de 2ª ordem entre velocidade de corte e geometria não obtiveram influência na rugosidade  $R_t$ , ao contrário no que foi analisado na rugosidade  $R_a$ , o qual todas as interações obtiveram influência.

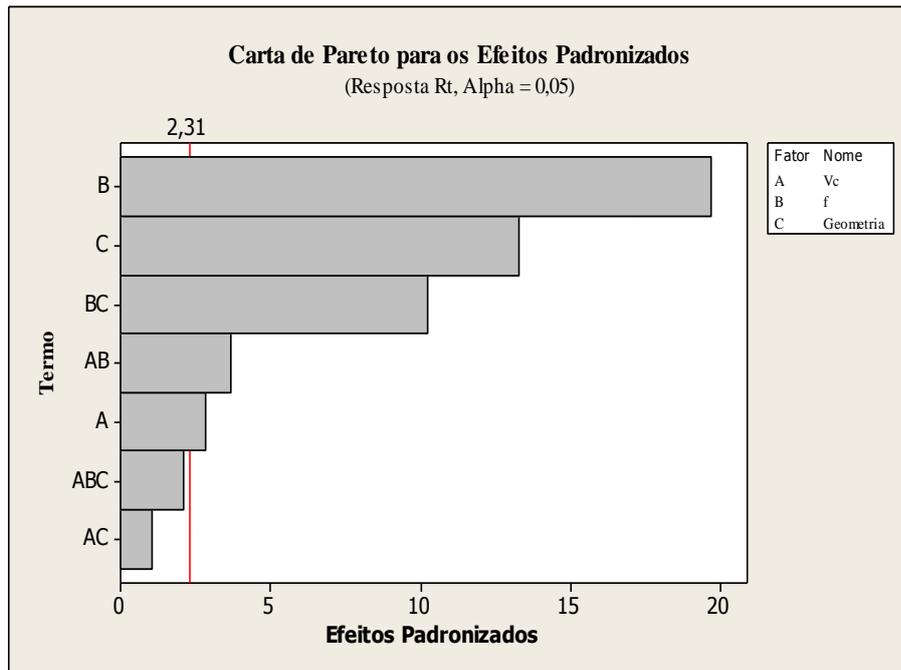


Figura 5.5 – Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Rugosidade Rt

A Figura 5.6 mostra o gráfico dos efeitos principais de vc, f e geometria na rugosidade Rt. Nota-se que o efeito avanço (f) também contribuiu para o aumento da rugosidade Rt quando em seu nível superior, ou seja, com o aumento do avanço a rugosidade Rt também aumenta, o que acontece ao contrário com a geometria da ferramenta, o que já era de se esperar, pois com a geometria alisadora espera-se encontrar baixas rugosidades devido ao seu efeito alisador, comparando-se com a ferramenta de geometria normal. Nota-se também que a velocidade de corte (vc) obteve uma influência maior na rugosidade Rt se comparando com a Rugosidade Ra com o fator avanço (f).

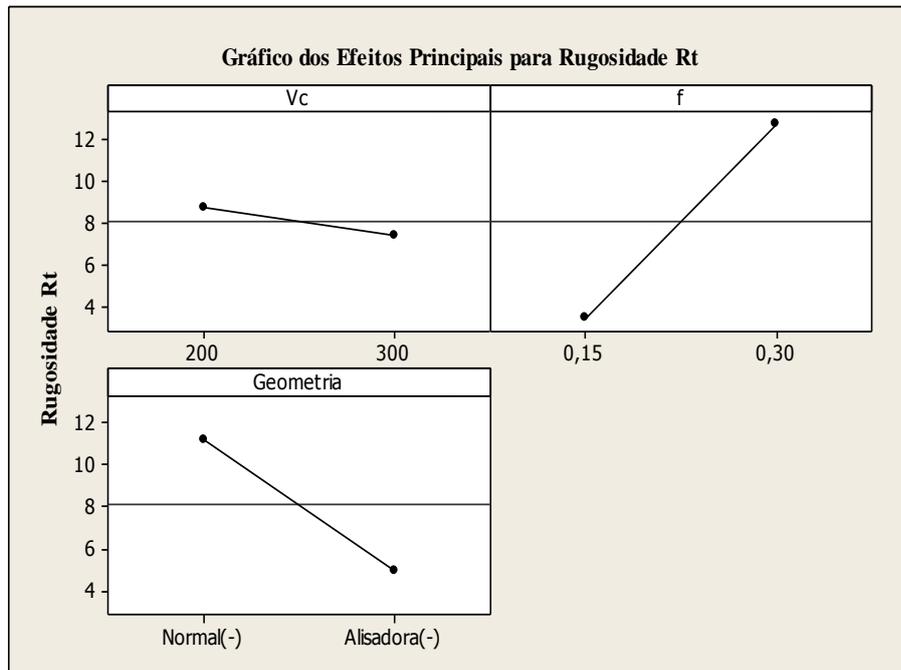


Figura 5.6– Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na rugosidade Rt

## 5.2- Modelo Forças de Corte ( $F_z$ , $F_x$ e $F_y$ ) para ferramenta negativa (normal e alisadora)

Através da elaboração de um arranjo fatorial completo com uma réplica proceder-se-á à análise dos dados obtidos experimentalmente. A Tabela 5.4 apresenta os resultados das componentes das forças de usinagem  $F_z$ ,  $F_x$  e  $F_y$  (N) para as dezesseis condições ensaiadas para as ferramentas negativas.

Nestes ensaios foram variados os parâmetros de usinagem, adotando-se a velocidade de corte (vc) entre os níveis 200 m/min e 300 m/min, avanço de usinagem (f) entre os níveis 0,15 mm/v e 0,30 mm/v e profundidade de usinagem fixa ( $a_p=1$  mm) e a geometria da ferramenta com raio de ponta normal e alisador.

Tabela 5.4– Fatorial completo  $2^3$  com réplicas para ferramenta negativa, para a resposta das forças de corte ( $F_z$ ,  $F_x$  e  $F_y$ )

<b>Nº do Ensaio</b>	<b>vc (m/min)</b>	<b>f (mm/v)</b>	<b>Geometria (normal-alisadora)</b>	<b>Fz (N)</b>	<b>Fx (N)</b>	<b>Fy (N)</b>
1	300	0,30	Alisadora	647,55	148,02	119,63
2	300	0,15	Alisadora	329,81	186,34	138,82
3	200	0,30	Alisadora	528,23	134,70	123,03
4	300	0,30	Alisadora	694,02	160,52	125,04
5	200	0,30	Normal	521,47	94,34	116,82
6	200	0,30	Normal	512,18	87,27	113,02
7	300	0,15	Normal	282,29	115,59	137,44
8	200	0,15	Alisadora	364,02	200,12	141,97
9	300	0,30	Normal	505,49	80,18	104,68
10	200	0,15	Alisadora	352,51	198,55	142,74
11	300	0,15	Alisadora	322,30	186,58	139,74
12	200	0,30	Alisadora	607,16	143,77	125,72
13	300	0,30	Normal	505,88	87,74	107,18
14	300	0,15	Normal	269,72	110,51	135,82
15	200	0,15	Normal	298,02	117,00	136,57
16	200	0,15	Normal	300,00	114,20	132,70

Nas Figuras, 5.7, 5.8 e 5.9 são apresentadas as forças de corte ( $F_z$ ), força de avanço ( $F_x$ ) e força passiva ( $F_y$ ) da ferramenta de metal duro negativa (normal e alisadora) para cada uma das condições ensaiadas.

Observou-se na Figura 5.7 que a força de corte ( $F_z$ ) para a ferramenta com geometria alisadora foi superior ao da ferramenta com geometria normal. A mesma situação acontece para o avanço ( $f$ ), aumentando-se o avanço, conseqüentemente aumenta-se a força de corte, pois com o aumento do avanço aumenta-se também a área da secção do cavaco fazendo com que a força de corte também aumente (DINIZ *et al.*, 2008).

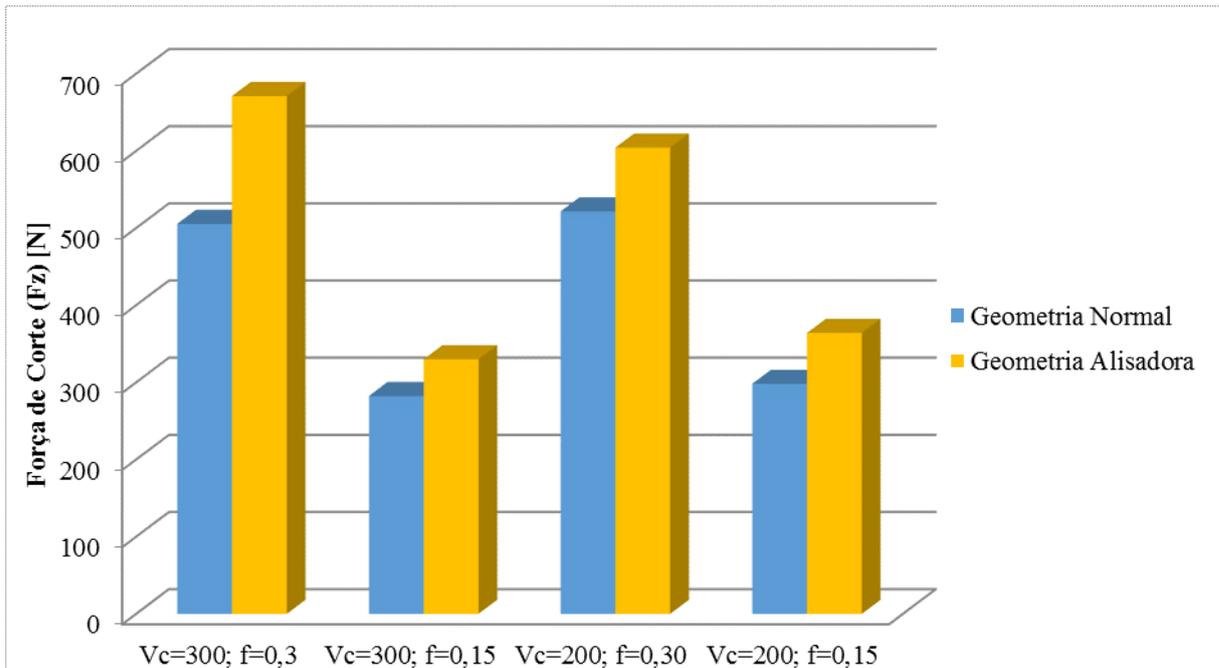


Figura 5.7- Força de Corte ( $F_z$ ) para os pontos fatoriais para ferramenta negativa com geometria alisadora e normal.

Já para as forças de avanço ( $F_x$ ) e Passiva ( $F_y$ ) como pode ser observado nas Figuras 5.8 e 5.9, notou-se o contrário, aumentando o avanço houve uma diminuição das forças ( $F_x$  e  $F_y$ ) tanto para geometria normal quanto para a geometria alisadora, pois aumentando o avanço ( $f$ ) aumenta-se também a velocidade de avanço e conseqüentemente o coeficiente de atrito diminui, pois o corte se torna mais dinâmico e o cavaco se cisalha com mais facilidade, e também à uma diminuição da pressão específica de corte  $K_s$ , pois o fluxo de cavaco é relativamente maior, pois quase todo volume de material deformado se transforma em cavaco (DINIZ *et al.*,2008).

Também observou-se que a geometria alisadora da ferramenta provoca maiores forças de avanço e passiva, comparada a geometria normal. Isto é devido a maior área de contato entre ferramenta-peça na presença do raio de ponta alisador.

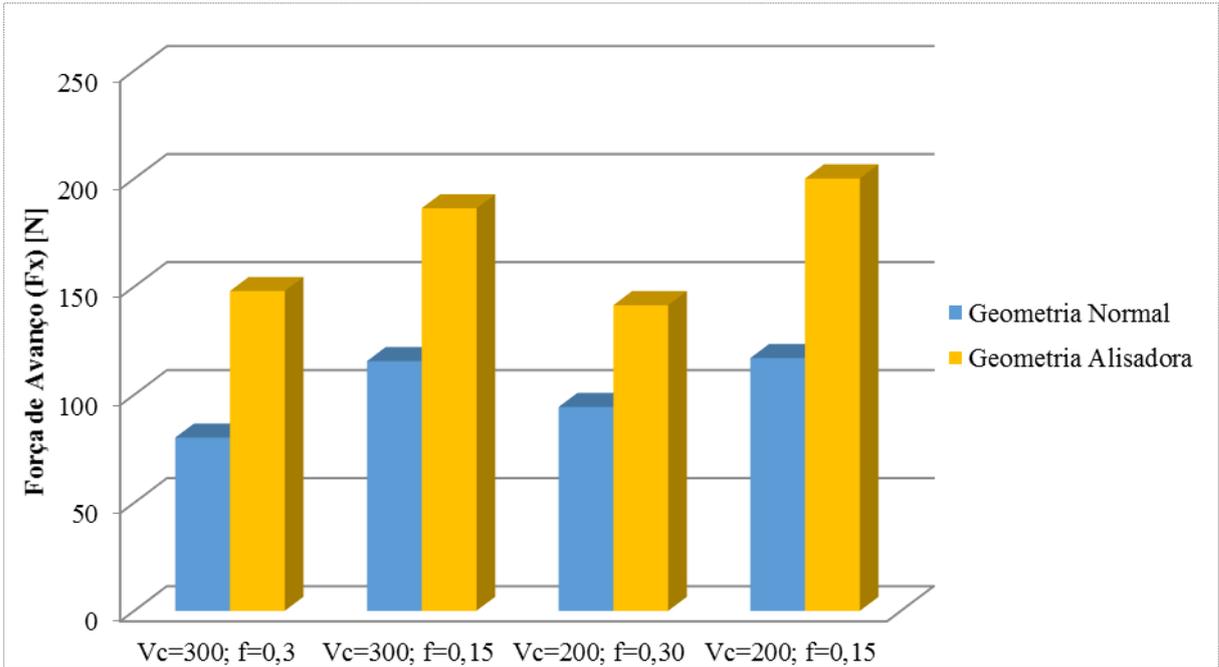


Figura 5.8- Forças de Avanço (Fx) para os pontos fatoriais para ferramenta negativa com geometria alisadora e normal.

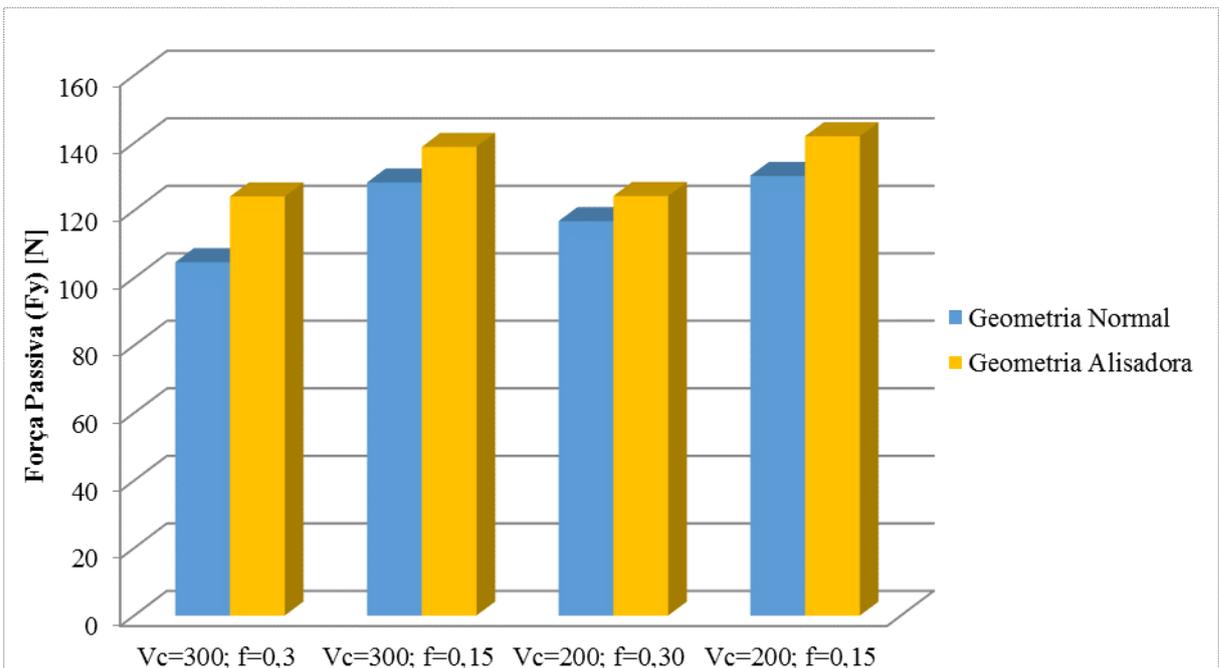


Figura 5.9- Forças Passiva (Fy) para os pontos fatoriais para ferramenta negativa com geometria alisadora e normal.

Na Tabela 5.5 é apresentada a ANOVA para a componente de força de corte (Fz), observando-se os valores de P pode-se dizer que os termos geometria, avanço (f), e a interação de 2ª ordem entre avanço e velocidade de corte (vc) e a interação de 3ª ordem entre os termos foram significativos, uma vez que P<5%. Dessa maneira pode-se montar a Equação 5.3 para a resposta da Força de Corte (Fz) para ferramenta negativa:

$$Fz = 440,041 + 4,592*vc + 125,207*f + 40,659*geometria + 18,396*vc*f + 13,128*vc*geometria + 13,333*f*geometria + 15,429*vc*f*geometria. \quad (5.3)$$

Tabela 5.5– ANOVA do fatorial completo 2<sup>3</sup> com réplicas para Força de Corte (Fz)

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
<b>Constante</b>		440,041	5,872	74,94	0,000
<b>vc</b>	9,184	4,592	5,872	0,78	0,457
<b>f</b>	250,414	125,207	5,872	21,32	0,000
<b>geometria</b>	81,319	40,659	5,872	6,92	0,000
<b>vc x f</b>	36,791	18,396	5,872	3,13	0,014
<b>vc x geometria</b>	26,256	13,128	5,872	2,24	0,056
<b>f x geometria</b>	26,666	13,333	5,872	2,27	0,053
<b>vc x f x geometria</b>	30,859	15,429	5,872	2,63	0,030
<b>S=23,4876</b>		R-Sq=98,51%	<b>R-Sq(adj)= 97,21%</b>		

Nota-se que o efeito avanço (f) contribuiu para um aumento da força de corte quando em seu nível superior, ou seja, com o aumento do avanço a força de corte também aumenta, pois, o crescimento do avanço a área de contato entre ferramenta e peça aumenta, fazendo com que haja atrito e assim maior força de corte.

Observou-se também que há uma pequena interação entre velocidade de corte (vc) e avanço (f) e uma interação de 3ª ordem entre os três fatores (vc, f, geometria), pois com o aumento da velocidade de corte (vc) os valores da pressão específica de corte (ks) tendem a diminuir devido a diminuição da deformação e da dureza dos cavacos gerados e também com a diminuição dos coeficientes de atrito que o aumento de vc proporciona, pois a força de corte Fz aumenta com o aumento da profundidade de corte (ap) e avanço (f) (DINIZ *et al.*, 2008 e MACHADO *et al.*, 2009).

Já para a força de corte (Fz) nota-se que o fator mais significativo foi o avanço (f) e seguido pela geometria, já a velocidade de corte (vc) e a interação entre velocidade de corte (vc) e geometria e avanço (f) e geometria não tiveram influência significativa, já a interação

de 3ª ordem entre velocidade de corte, avanço (f) e geometria tiveram uma influência na força de corte (Fz), conforme se pode notar na Figura 5.10.

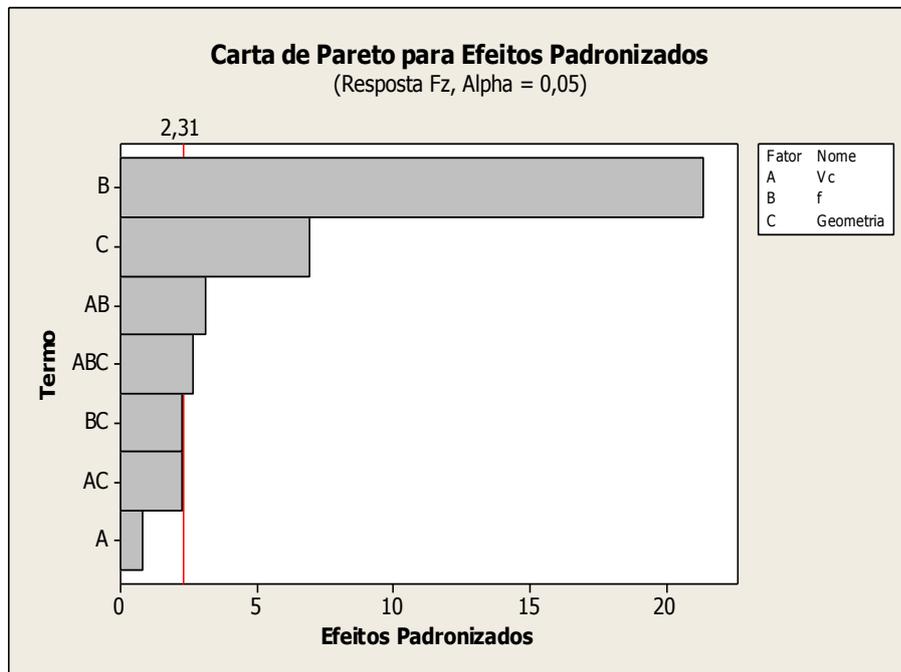


Figura 5.10 – Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Força de Corte (Fz).

Nota-se na Figura 5.11 o gráfico dos efeitos principais entre vc, f e geometria na força de corte Fz com a geometria normal e alisadora. Nota-se que o efeito avanço (f) contribuiu para um aumento da força corte quando em seu nível superior, ou seja, com o aumento do avanço a força de corte também aumenta, pois, com o aumento do avanço a área de contato entre ferramenta- peça aumenta fazendo com que haja atrito e assim a força de corte aumente.

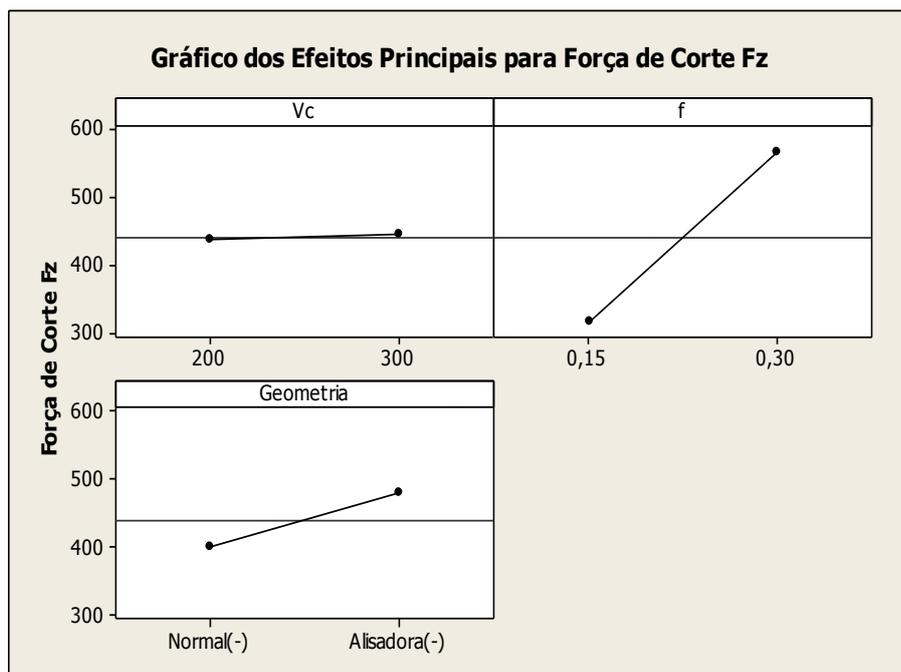


Figura 5.11 Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na Força de corte (Fz).

Na Tabela 5.6 é apresentada a ANOVA para a componente da força de avanço (Fx). A velocidade de corte não foi significativa, mas sua interação com o avanço apresentou valor de P de 0,042. Assim o modelo completo obtido na Equação 5.4 contempla todas as variáveis, e apresenta um excelente ajuste de 98,59%.

$$F_x = 135,34 - 0,90*vc - 18,27*f + 34,49*geometria + 2,95*vc*f + 1,44*vc*geometria - 4,80*f*geometria + 4,03*vc*f*geometria \quad (5.4)$$

Tabela 5.6– ANOVA do fatorial completo  $2^3$  com réplicas para Força de Avanço (Fx)

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		135,34	1,221	110,82	0,000
vc	-1,81	-0,90	1,221	-0,74	0,480
f	-36,54	-18,27	1,221	-14,96	0,000
geometria	68,97	34,49	1,221	28,24	0,000
vc x f	5,90	2,95	1,221	2,42	0,042
vc x geometria	2,89	1,44	1,221	1,18	0,271
f x geometria	-9,60	-4,80	1,221	-3,93	0,004
vc x f x geometria	8,05	4,03	1,221	3,30	0,011
<b>S=4,88507</b>		<b>R-Sq=99,25%</b>		<b>R-Sq(adj)= 98,59%</b>	

Fazendo uma análise mais precisa para a Força de Avanço ( $F_x$ ) verifica-se na Figura 5.12 que o fator mais significativo foi a geometria seguido pelo avanço (f). Nota-se também que a velocidade de corte (vc) e a interação com a geometria não foi um fator que influenciou a força de avanço ( $F_x$ ), mas a interação entre a velocidade de corte (vc) e avanço (f) e a interação de 3ª ordem entre velocidade de corte (vc), avanço (f) e geometria tiveram influência significativa sobre a força de avanço.

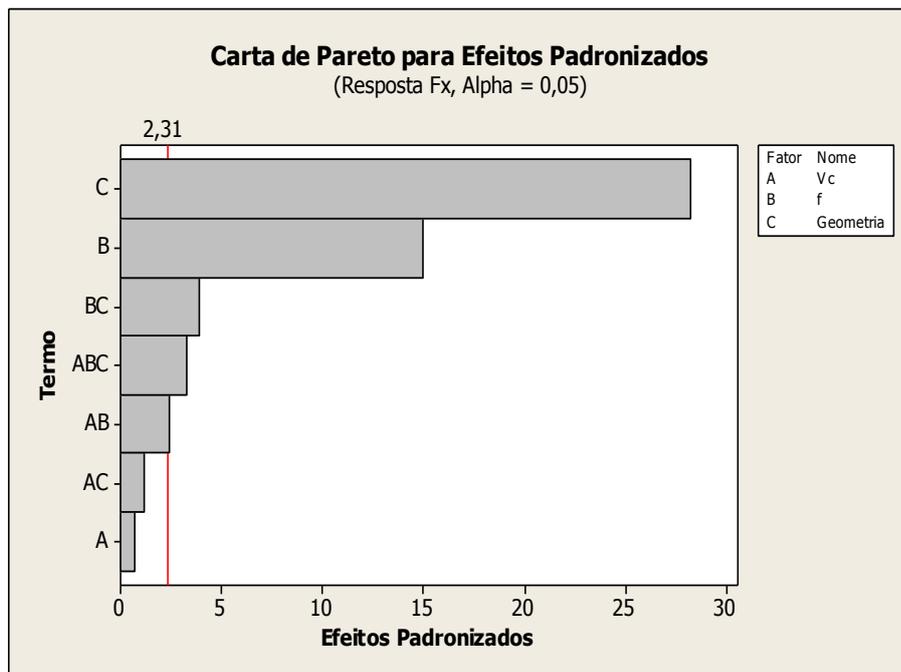


Figura 5.12–Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Força de Avanço ( $F_x$ )

A Figura 5.13 apresenta o gráfico dos efeitos principais de vc, f e geometria normal e alisadora na força de avanço ( $F_x$ ). Nota-se que o efeito avanço (f) contribuiu para a diminuição da força de avanço quando em seu nível superior, ou seja, com o aumento do avanço a força de avanço também diminuiu. Acontece ao contrário com a geometria da ferramenta, o que já era de se esperar, pois segundo Diniz et al. (2008) com um aumento do ângulo de posição da ferramenta ( $X_r$ ) gera-se um aumento da força de avanço. Assim, o  $X_r$  da ferramenta de geometria alisadora é de  $93^\circ$  e o  $X_r$  da geometria normal é de  $62,5^\circ$  justificando esse aumento da força de avanço  $F_x$ .

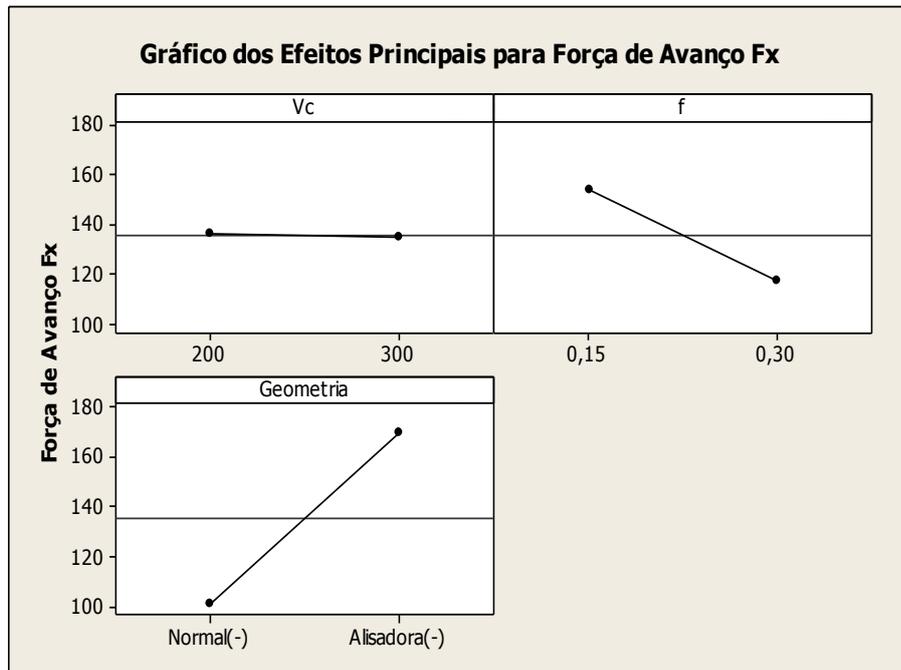


Figura 5.13– Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na Força de Avanço Fx

A Tabela 5.7 apresenta a análise de variância para o experimento para a força Passiva (Fy). Nota-se que as interações de 1ª ordem e 3ª ordem foram significativas uma vez que os valores de P foram inferiores a 5%. Da mesma forma podemos montar a Equação 5.5 para a resposta da Força Passiva (Fy) com ajuste excelente de 96,9%.

$$F_y = 127,56 - 1,51*vc - 10,67*f + 4,53*geometria - 1,24*vc*f + 0,23*vc*geometria + 1,94*f*geometria + 1,50*vc*f*geometria \quad (5.5)$$

Tabela 5.7 – ANOVA do fatorial completo 2<sup>3</sup> com réplicas para Força Passiva (Fy)

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		127,56	0,5457	233,75	0,000
vc	-3,03	-1,51	0,5457	-2,77	0,024
f	-21,33	-10,67	0,5457	-19,55	0,000
geometria	9,06	4,53	0,5457	8,30	0,000
vc x f	-2,49	-1,24	0,5457	-2,28	0,052
vc x geometria	0,47	0,23	0,5457	0,43	0,678
f x geometria	3,87	1,94	0,5457	3,55	0,008
vc x f x geometria	3,00	1,50	0,5457	2,75	0,025
<b>S=2,18281</b>		<b>R-Sq=98,37%</b>		<b>R-Sq(adj)= 96,95%</b>	

Já para a força passiva ( $F_y$ ) percebe-se que o fator mais significativo foi o avanço (f) seguido da geometria e da velocidade de corte (vc) que obteve menor influência. Nota-se também que a interação entre avanço (f) e geometria também obteve uma importante influência na força  $F_y$ , seguido da velocidade e da interação de 3ª ordem entre velocidade de corte (vc), avanço(f) e geometria, conforme é mostrada Figura 5.14.

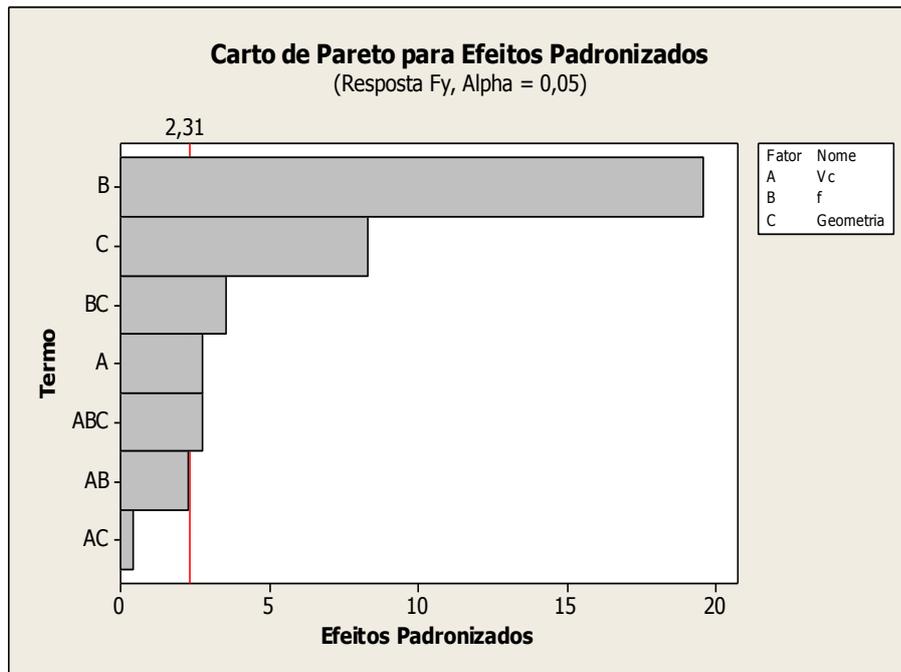


Figura 5.14 – Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Força Passiva ( $F_y$ )

Nota-se na Figura 5.15 o gráfico dos efeitos principais para vc, f e geometria normal e alisadora na força passiva ( $F_y$ ). Nota-se que o efeito avanço (f) contribuiu para uma diminuição da força passiva quando em seu nível superior, ou seja, com o aumento do avanço a força passiva também diminuiu, o que contribuiu para a geração de menor rugosidade, principalmente com a geometria alisadora. Esta geometria apresenta maior força passiva, o não suficiente para prejudicar a rugosidade da peça. Nota-se também que a velocidade de corte (vc) teve influência na força de avanço.

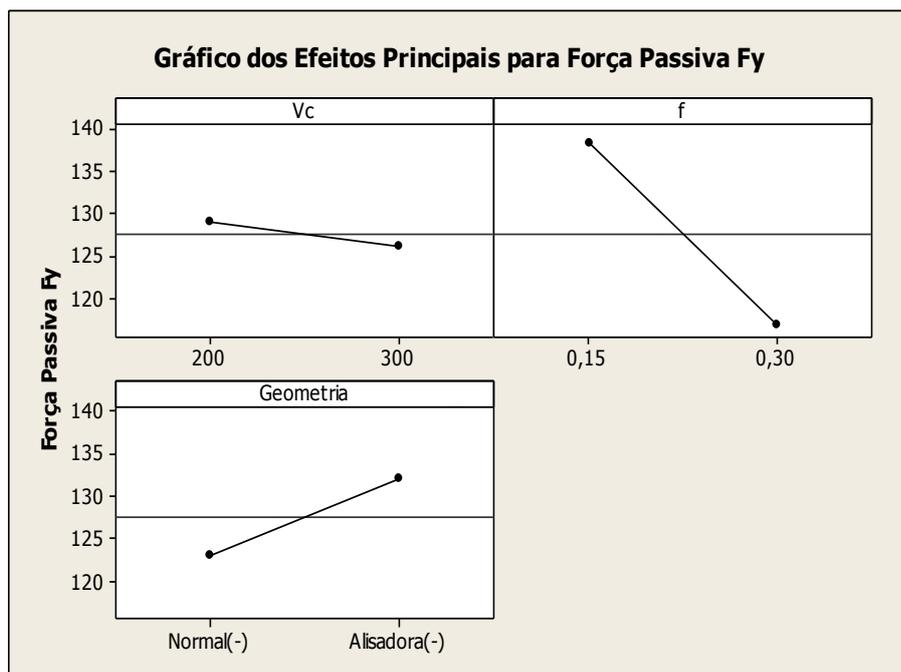


Figura 5.15 – Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na Força Passiva (Fy)

Muitos dos fatores que influenciam os valores da força de corte ( $F_z$ ) também influenciam as forças de avanço ( $F_x$ ) e profundidade (passiva) ( $F_y$ ), mas outros, como o raio de ponta da ferramenta e os ângulos de posição ( $X_r$ ) têm uma influência mais marcante nestas duas componentes da força de usinagem.

Nas figuras 5.16, 5.17 e 5.18 são apresentadas essas influências. Pode-se notar nessas figuras que, à medida que o avanço ( $f$ ) cresce, as forças de avanço e as forças passivas tanto para geometria normal quanto para geometria alisadora também crescem.

Nota-se também que o crescimento do ângulo de posição ( $X_r$ ) gera um aumento da força de avanço, principalmente quando ( $X_r$ ) é maior. A influência do ângulo de posição ( $X_r$ ) é diretamente proporcional aos crescimentos dos mesmos (DINIZ *et al.*, 2008).

Apesar do maior  $X_r$  da ferramenta com geometria alisadora ( $X_r=93^\circ$ ) todas as componentes de forças foram superiores para esta geometria, em relação à geometria normal.

Observou-se também que, em todos os testes, seja ele com ferramenta com geometria normal ou alisadora, um aumento nos valores do avanço implicou em consequente aumento nas forças de corte. De fato, tal comportamento já era esperado, uma vez que um incremento no avanço proporciona direta elevação da área de contato entre o cavaco e a ferramenta fazendo assim com o atrito entre as mesmas gere uma maior força.

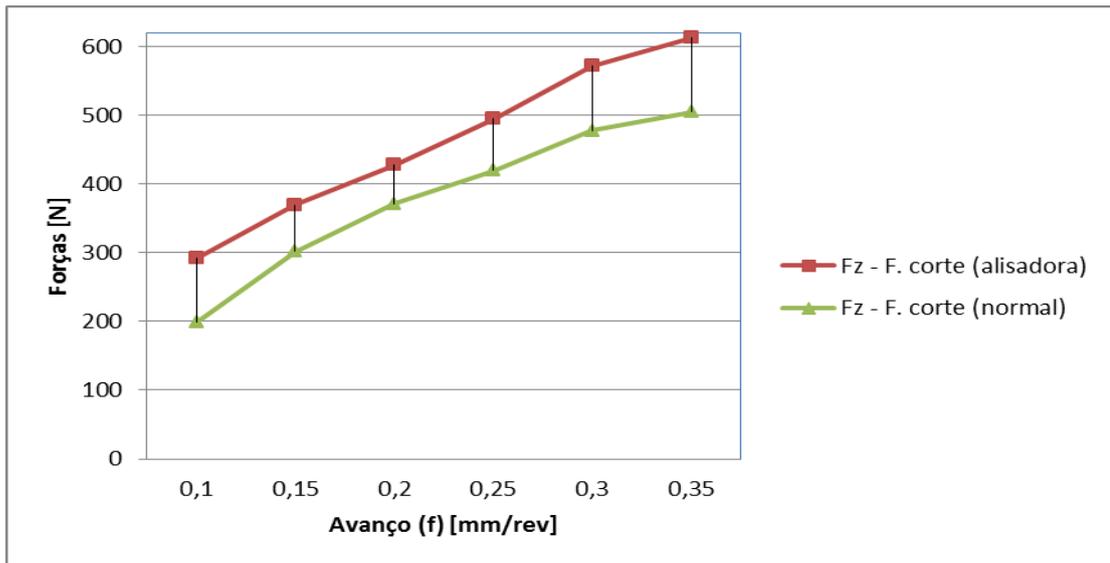


Figura 5.16- Variação da força de corte ( $F_z$ ) com o avanço para ferramentas normal e alisadora

Na Figura 5.17 e 5.18 observa-se uma forte influência do avanço na Força  $F_x$  para a geometria alisadora, pois conforme discutido anteriormente, com o aumento do avanço a área de contato entre ferramenta-peça aumenta e assim gera-se um aumento da força  $F_x$ , pois a geometria alisadora além de possuir um  $X_r$  de  $93^\circ$  também possui uma maior área de contato entre ferramenta-peça. Ao contrário, as forças  $F_x$  e  $F_y$  tiveram pequeno crescimento com o avanço para a geometria normal, que não contribuiu para a melhora da rugosidade da peça.

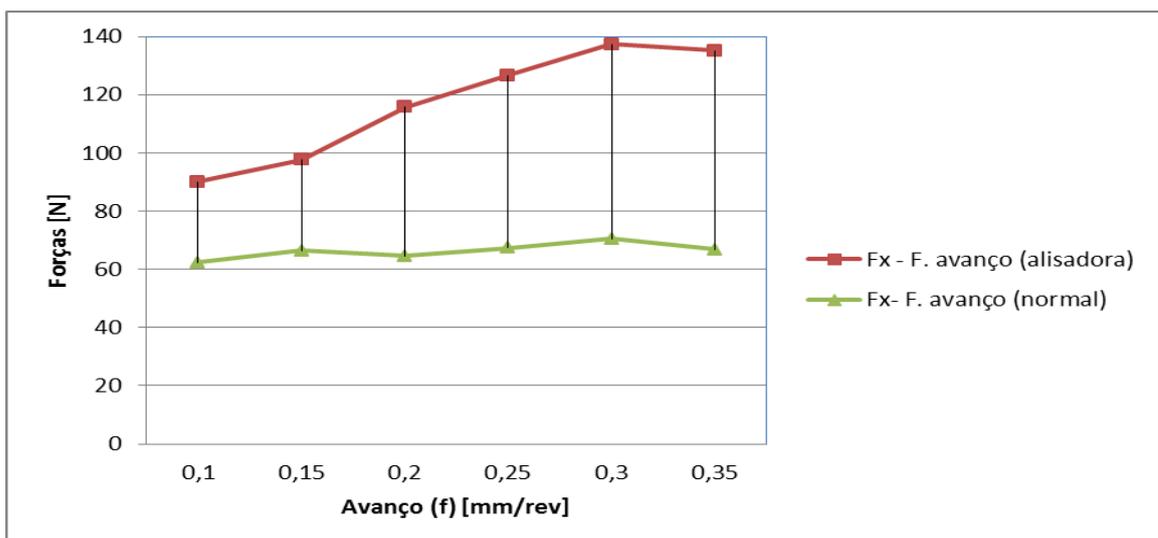


Figura 5.17- Variação da força de avanço ( $F_x$ ) com o avanço para ferramentas normal e alisadora

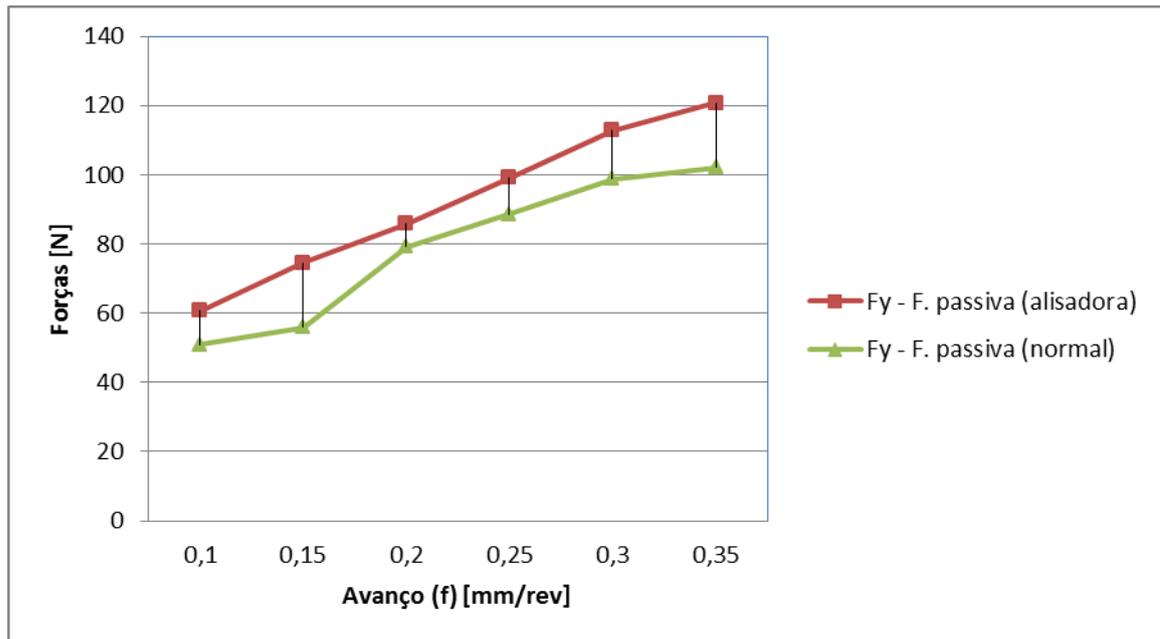


Figura 5.18- Variação da força passiva ( $F_y$ ) com o avanço para ferramentas normal e alisadora

Nas Figuras 5.19 e 5.20, nota-se uma grande influência do avanço ( $f$ ) na força de corte ( $F_z$ ). Já nas outras componentes também se pode-se notar uma pequena influência nas forças de avanço ( $F_x$ ) e na força passiva ( $F_y$ ), tanto para geometria normal quanto para geometria alisadora da ferramenta negativa. Nota-se também que os valores das forças para a ferramenta alisadora (Figura 5.19) são maiores que as forças da ferramenta normal (Figura 5.20), pois conforme discutido anteriormente o  $X_r$  da ferramenta com geometria alisadora é maior que o  $X_r$  da ferramenta com geometria normal.

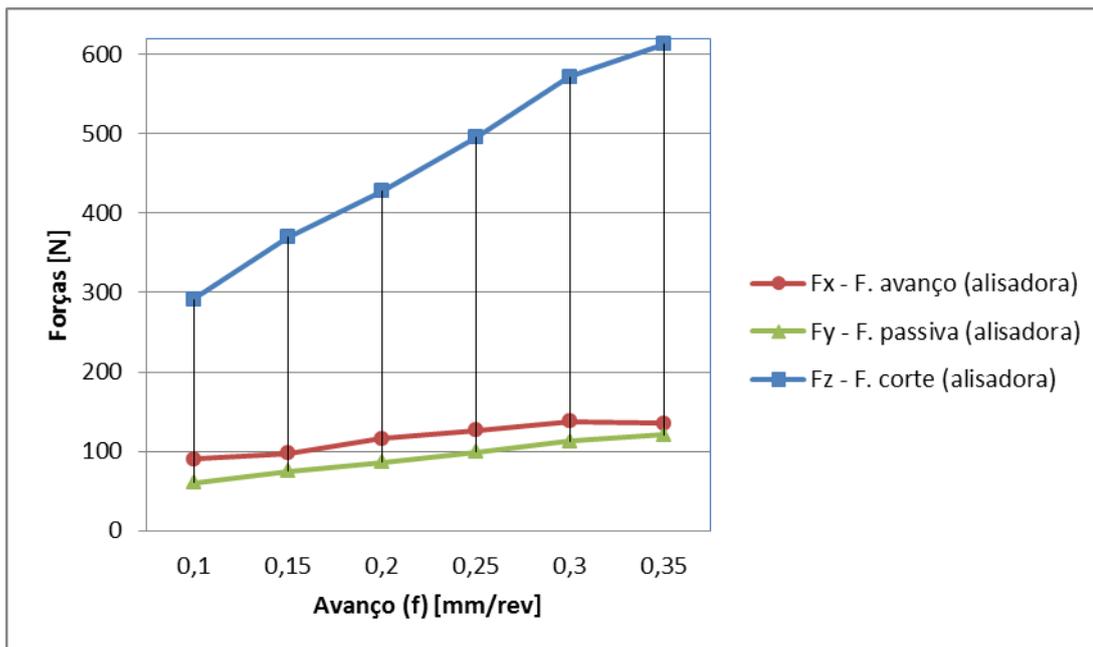


Figura 5.19- Variação das Forças de Corte ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) com o avanço para ferramenta alisadora

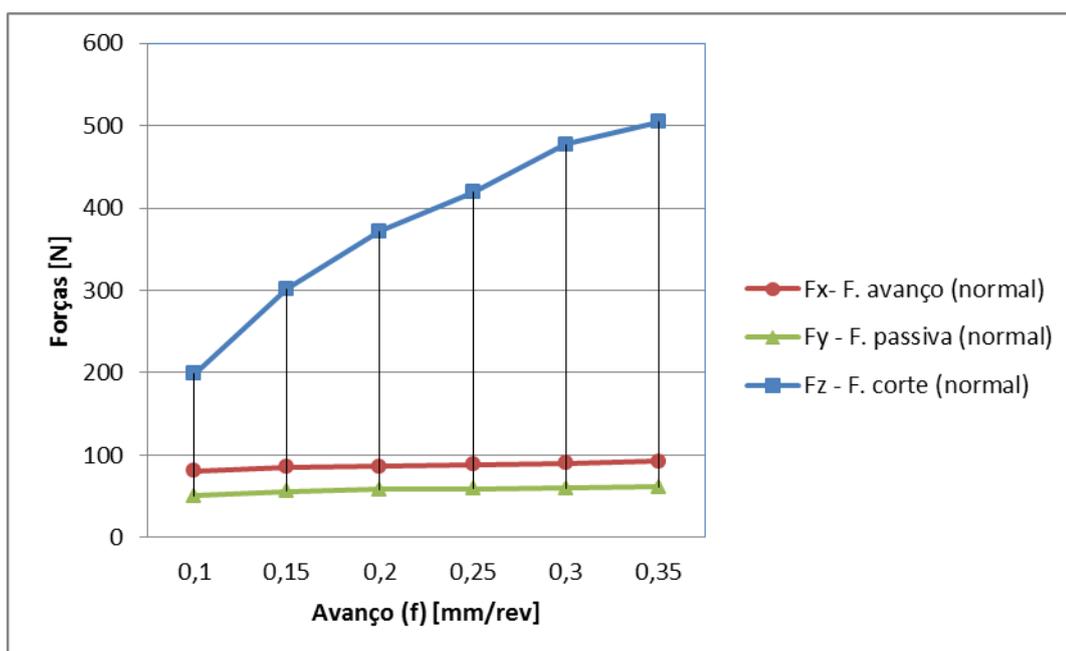


Figura 5.20- Variação das Forças de Corte ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) com o avanço para ferramenta normal

O bronze de alumínio por ser um material que apresenta uma ductilidade elevada com relação ao demais, teve maiores forças de corte, isto devido à grande resistência que este material oferece para ser cisalhado.

Como as tensões de compressão nestes planos são grandes, isto faz com que os cavacos saiam contínuos, longos e difíceis de serem controlados. Isso oferece uma grande dificuldade para que estes materiais movam-se sobre a superfície de saída, acarretando uma elevação nas forças. No caso do bronze de alumínio as forças de usinagem requeridas já se enquadraram em uma faixa intermediária, devido à combinação de ductilidade e resistência também destes materiais devido ao tratamento térmico que a superliga foi submetida. A Figura 5.21 ilustra os tipos de cavacos gerados no processo de torneamento do Bronze de Alumínio.



Figura 5.21- Tipos de cavacos gerados no torneamento do Bronze de Alumínio

Observa-se na Figura 5.22 a forma mais abrangente das camadas sobrepostas do mecanismo de formação e também as linhas de deformação que estão ligadas ao processo de torneamento e que neste caso são mais visíveis, ou seja, são acentuadas, pois se acumulam encruando mais o material.

Isso se deve pela pressão exercida, somado a remoção mais a passagem pelo ângulo de saída da ferramenta, assim tem-se pressão do material removido por vários lados, fazendo com que eles se curvem e deformam até que se formem uma geometria serrilhada.

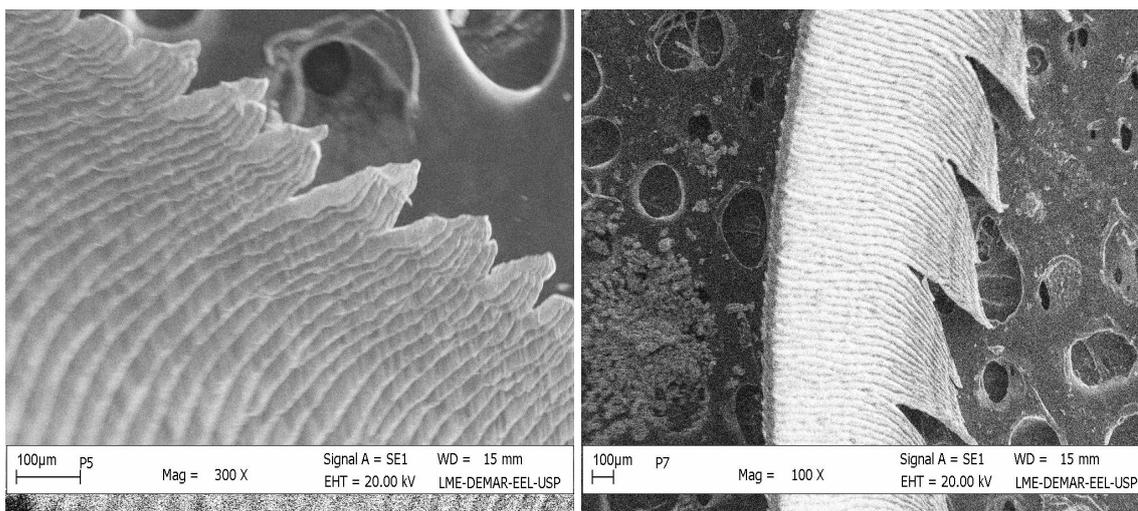


Figura 5.22- Camadas sobrepostas do mecanismo de formação e também as linhas de deformação – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

### 5.3-Modelo De Rugosidades (Ra E Rt) Para Ferramenta Positiva (Normal E Alisadora)

Agora através da elaboração de um arranjo fatorial completo com uma (1) réplica irão proceder-se-á à análise dos dados obtidos experimentalmente para a ferramenta positiva. A Tabela 5.8 apresenta os resultados da rugosidade Ra e Rt em micron metro ( $\mu\text{m}$ ) para as dezesseis condições ensaiadas necessárias à obtenção das respostas seguidos de suas respectivas réplicas para a ferramenta positiva.

Nestes mesmos ensaios foram variados os parâmetros de usinagem iguais aos da ferramenta negativa para efeito comparativo, adotando-se a velocidade de corte (vc) entre os níveis 200 m/min e 300 m/min, avanço de usinagem (f) entre os níveis 0.15 mm/v e 0,30 mm/v e profundidade de usinagem (ap) fixa em 1 mm e a geometria da ferramenta em Normal e Alisadora. Em todos os ensaios foram utilizadas pastilhas de metal duro recobertas com Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN).

Observa-se que os parâmetros de rugosidades Ra obtidos nos ensaios para a superliga bronze de alumínio foram relativamente baixos, visto que o avanço (f) variou de 0,15 a 0,30 mm/v. A rugosidade média Ra ficou na faixa de 0,42- 3,47  $\mu\text{m}$  e a rugosidade máxima Rt ficou na faixa de 2,83-14,69  $\mu\text{m}$ . Justifica-se estes resultados de Ra abaixo de 0,5  $\mu\text{m}$ , pelo efeito alisador da geometria de corte da ferramenta de metal duro revestida e pela baixa

dureza da peça na faixa de 35 HRC. Cabe salientar que o torno CNC utilizado é de pequeno porte e não apresenta grande rigidez.

Tabela 5.8– Fatorial completo  $2^3$  com réplicas para ferramenta positiva, para a resposta Rugosidades (Ra e Rt).

Nº do Ensaio	vc (m/min)	f (mm/v)	Geometria (normal-alisadora)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )
1	300	0,30	Normal	3,48	14,69
2	300	0,15	Alisadora	0,65	3,65
3	300	0,30	Alisadora	0,88	4,94
4	200	0,15	Alisadora	0,42	2,83
5	300	0,15	Normal	1,10	5,05
6	300	0,30	Alisadora	0,84	5,12
7	200	0,30	Normal	3,47	14,68
8	200	0,15	Alisadora	0,44	3,80
9	300	0,15	Alisadora	0,63	3,58
10	200	0,15	Normal	1,06	4,91
11	300	0,15	Normal	1,07	5,10
12	200	0,30	Alisadora	0,87	5,75
13	200	0,15	Normal	1,07	4,94
14	200	0,30	Normal	3,44	14,76
15	200	0,30	Alisadora	0,90	5,68
16	300	0,30	Normal	3,42	14,65

As Figuras 5.23 e 5.24 apresentam rugosidades Ra e Rt da ferramenta de metal duro positiva (normal e alisadora) para cada uma das condições ensaiadas e suas respectivas réplicas. Suas análises mostram que os experimentos foram coerentes, principalmente no tocante à repetitividade, visto que as rugosidades Ra e Rt no torneamento da superliga bronze de alumínio, apresentaram valores bastante próximos nos ensaios e em suas respectivas réplicas, fato este que evidencia a consistência dos ensaios realizados, o que será de grande importância para o bom andamento do presente estudo. Constatou-se também a eficácia da geometria alisadora quando se trabalhou com avanços ( $f=0,3$  mm/v), ou seja, nestes casos haverá uma redução significativa das rugosidades Ra e Rt, enquanto que nos ensaios com avanço ( $f=0,15$  mm/v) a geometria normal também alcançou bons níveis de rugosidade Ra e Rt.

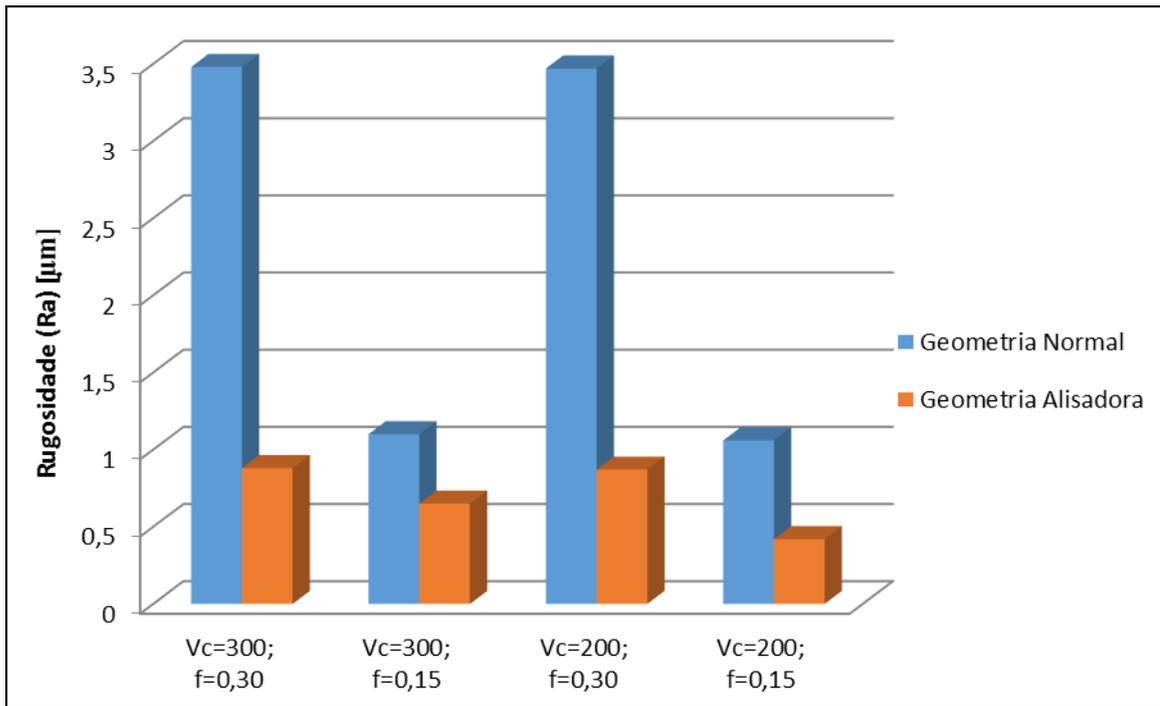


Figura 5.23- Rugosidade Ra para os pontos fatoriais para ferramenta positiva com geometria alisadora e normal.

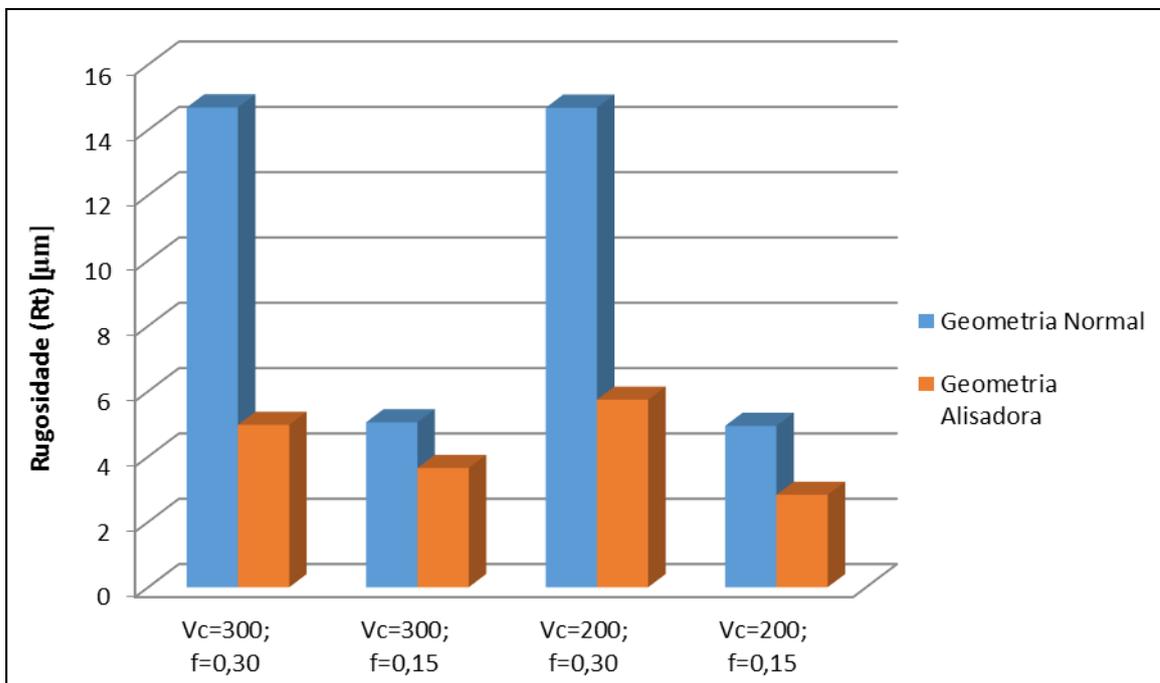


Figura 5.24- Rugosidade Rt e respectivas réplicas para os pontos fatoriais para ferramenta positiva com geometria alisadora e normal.

A Tabela 5.9 apresenta a análise de variância (ANOVA) do fatorial completo para os três fatores e dois níveis ( $2^3$ ), para a resposta rugosidade Ra. A análise dos dados das Tabelas 5.8 mostra que os termos de 1ª, 2ª e 3ª ordem foram significativos uma vez que o P apresentam valores inferiores ao nível de significância de 5%, o que sinaliza uma alta significância. Com isso podemos montar os a equação 5.6 como resposta para a rugosidade Ra.

$$Ra = 1,4913 + 0,0325*vc + 0,6712*f - 0,7725*geometria - 0,0400*vc*f + 0,0288*vc*geometria - 0,5175*f*geometria - 0,0337*vc*f*geometria \quad (5.6)$$

Tabela 5.9– ANOVA do fatorial completo  $2^3$  com réplicas para resposta Rugosidade (Ra)

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
<b>Constante</b>		1,4913	0,008478	175,90	0,000
<b>vc</b>	0,0650	0,0325	0,008478	3,83	0,005
<b>f</b>	1,3425	0,6712	0,008478	79,18	0,000
<b>geometria</b>	-1,5450	-0,7725	0,008478	-91,12	0,000
<b>vc x f</b>	-0,0800	-0,0400	0,008478	-4,72	0,002
<b>vc x geometria</b>	0,0575	0,0288	0,008478	3,39	0,009
<b>f x geometria</b>	-1,0350	-0,5175	0,008478	-61,04	0,000
<b>vc x f x geometria</b>	-0,0675	-0,0337	0,008478	-3,98	0,004
<b>S=0,0339116</b>		R-Sq=99,96%	<b>R-Sq(adj)= 99,92%</b>		

Na Figura 5.25 observa-se que todos os elementos exercem influência na rugosidade Ra, ressaltando os elementos, avanço e a combinação do avanço com a geometria. Em primeiro lugar, nota-se o fator avanço de usinagem como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na rugosidade Ra pela maior área de contato entre ferramenta e peça, seguidos da geometria e da velocidade de corte e pelas interações de 2ª e 3ª ordem destes fatores.

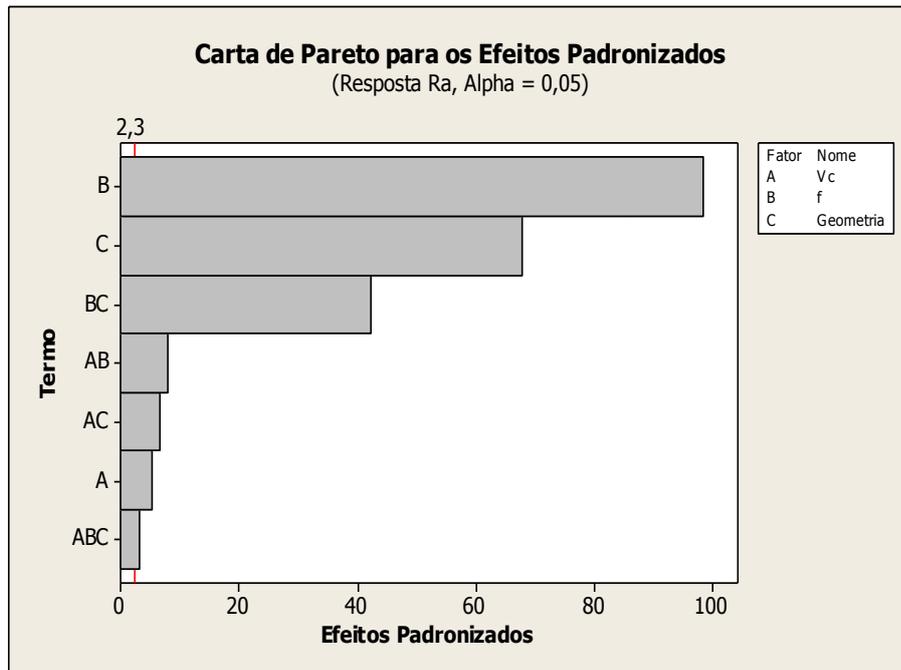


Figura 5.25 – Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Rugosidade Ra

A Figura 5.26 apresenta o gráfico dos efeitos principais vc, f e geometria na rugosidade Ra com a geometria normal e alisadora. Nota-se que o efeito avanço (f) concorreu para o aumento da rugosidade Ra quando em seu nível superior, ou seja, com o aumento do avanço as rugosidades Ra também aumentam, pois, conforme já mencionado nesse trabalho, com o aumento do avanço cresce a área de contato entre ferramenta e a peça, o que acontece ao contrario com a geometria da ferramenta, o que já era de se esperar, pois com a geometria alisadora espera-se encontrar baixas rugosidades devido a geometria da ponta da ferramenta, se comparando com a ferramenta de geometria normal.

Nota-se que a velocidade de corte (vc) não teve uma forte influência na rugosidade Ra se comparado com o fator avanço (f).

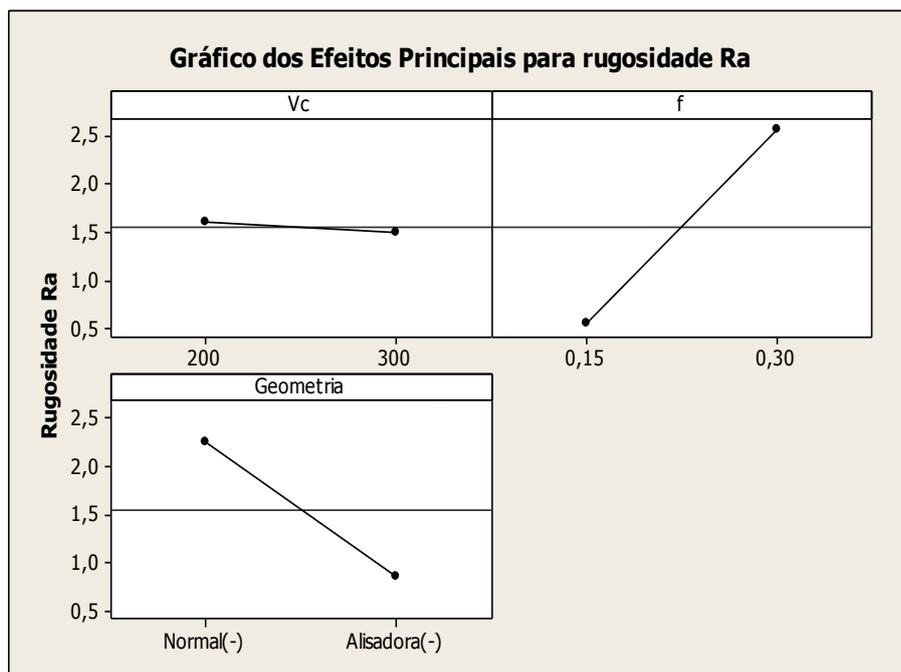


Figura 5.26 – Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na rugosidade Ra

Da mesma forma podemos observar na Tabela 5.10 que os termos de 1ª ordem como a velocidade de corte, a interação de 2ª ordem entre velocidade de corte e geometria e a de 3ª ordem, os valores de P foram superiores ao nível de significância (5%) o que os torna não significativos para a rugosidade Rt, mesmo assim o coeficiente de determinação do modelo ( $R^2_{adj}$ ) apresentou valor de 99,43%, o que significa que os modelos explicam adequadamente os fenômenos. Dessa forma podemos montar a equação 5.7.

$$R_t = 7,220 - 0,039*vc + 2,904*f - 2,631*geometria - 0,227*vc*f - 0,060*vc*geometria - 1,940*f*geometria - 0,181*vc*f*geometria \quad (5.7)$$

Tabela 5.10– ANOVA do fatorial completo  $2^3$  com réplicas para resposta Rugosidade (Rt)

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
<b>Constante</b>		7,220	0,08561	84,33	0,000
<b>vc</b>	-0,0777	-0,039	0,08561	-0,45	0,663
<b>f</b>	5,807	2,904	0,08561	33,92	0,000
<b>geometria</b>	-5,263	-2,631	0,08561	-30,73	0,000
<b>vc x f</b>	-0,455	-0,227	0,08561	-2,66	0,029
<b>vc x geometria</b>	-0,120	-0,060	0,08561	-0,70	0,503
<b>f x geometria</b>	-3,880	-1,940	0,08561	-22,66	0,000
<b>vc x f x geometria</b>	-0,363	-0,181	0,08561	-2,12	0,067
<b>S=0,342454</b>		<b>R-Sq=99,70%</b>		<b>R-Sq(adj)= 99,43%</b>	

Fazendo também uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos e suas interações no comportamento da rugosidade  $R_t$  com a ferramenta positiva, podem ser obtidas avaliando-se os resultados dispostos na Figuras 5.27 e 5.28. Observa-se que nem todos os elementos exercem influência na rugosidade  $R_t$ , ressaltando os elementos, avanço, geometria e a combinação do avanço com a geometria. Em primeiro lugar, nota-se o fator avanço (f) de usinagem como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na rugosidade  $R_t$  como na análise de  $R_a$ , seguidos da geometria e da interação entre avanço (f) e geometria e uma pequena interação entre velocidade de corte (vc) e avanço (f). Nota-se também que a velocidade corte (vc) isoladamente não é significativa, muito menos a interação entre velocidade de corte (vc) e geometria e a interação tripla entre as variáveis.

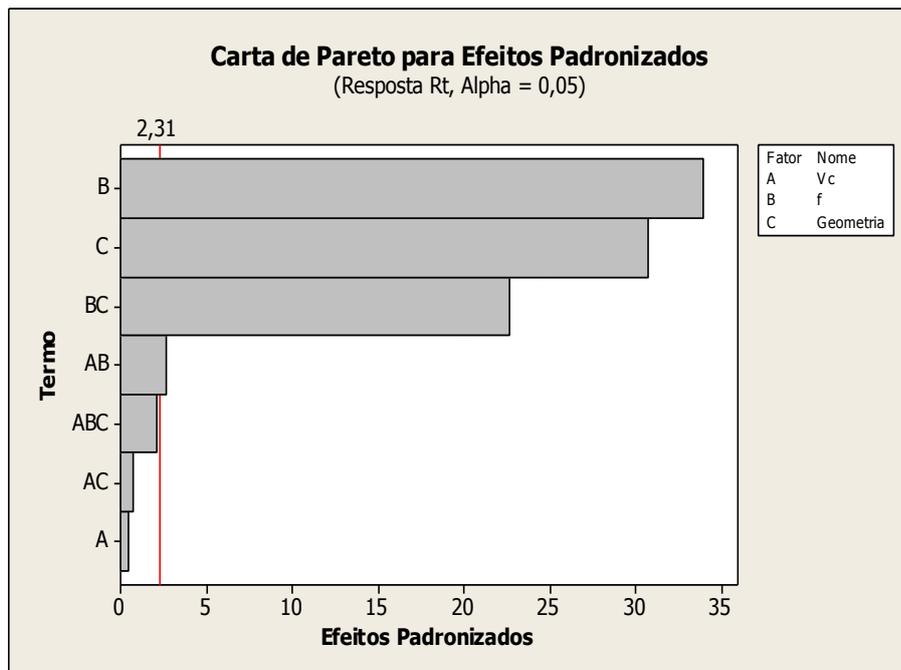


Figura 5.27 – Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para Rugosidade  $R_t$

A Figura 5.28 apresenta o gráfico dos efeitos principais vc, f e geometria na rugosidade  $R_t$  com a geometria normal e alisadora da ferramenta positiva. Nota-se que o efeito avanço (f) também concorreu para o aumento da rugosidade  $R_t$  quando em seu nível superior, ou seja, com o aumento do avanço as rugosidades  $R_t$  também aumenta, o que acontece ao contrario com a geometria da ferramenta, o que já era de se esperar, pois com a

geometria alisadora espera-se encontrar baixas rugosidades devido a geometria da ponta da ferramenta, se comparando com a ferramenta de geometria normal.

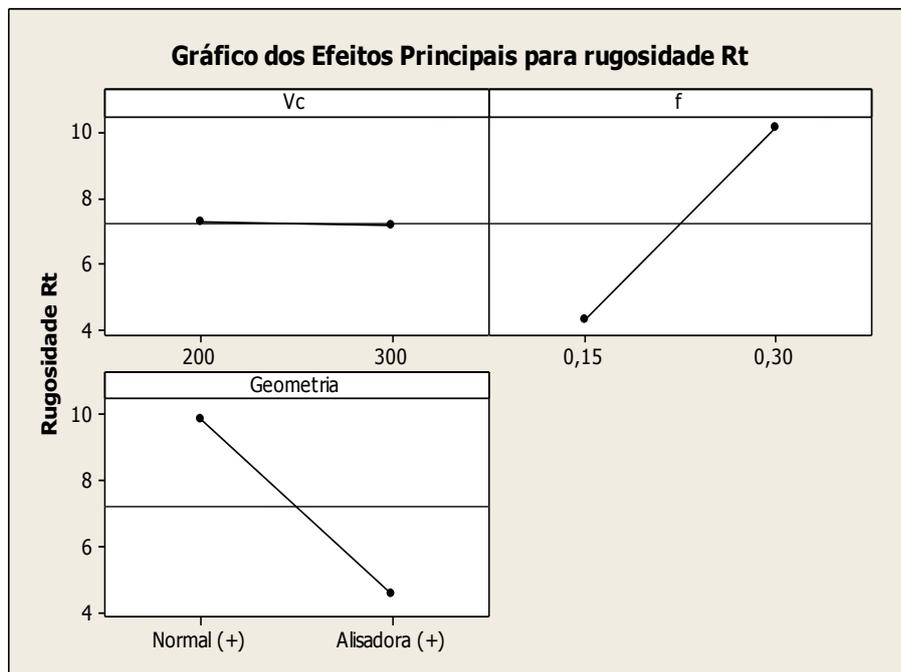


Figura 5.28 – Gráficos dos efeitos principais de vc, f e geometria na rugosidade Rt.

O sentido físico dos resultados acima mencionados devem ser discutidos para verificar a sua consistência e para a melhor compreensão e aplicação da metodologia por pesquisadores em usinagem ou outros sistemas de manufatura. Rugosidade é a grandeza que quantifica o grau de acabamento. Está diretamente relacionada com a geometria da ferramenta e parâmetros de usinagem. Aumentando o raio da ponta da ferramenta, por exemplo, tende a reduzir a rugosidade. Isso ocorre em um certo limite, porque o aumento do raio pode causar vibrações, o que contribui para piorar o acabamento.

O avanço (f) também é uma variável que influencia diretamente o valor teórico da rugosidade, uma vez que o menor é o seu valor, menos provável será a marcas deixadas na superfície da peça de trabalho pela passagem da ferramenta. Portanto, considerando as consequências físicas da configuração obtida com o DOE, observamos que  $vc = 200$  a  $300$  m/min,  $f = 0,15$  a  $0,30$  mm/v e  $ap = 1$ mm para as ferramentas negativa e positivas com geometria alisadora, são uma configuração adequada para a operação de acabamento da superfície do Bronze de Alumínio. Para comparar o desempenho das pastilhas de metal duro com cobertura de TiAlN com geometria normal e geometria alisadora, vamos utilizar os dados presentes neste trabalho.

## 5.4 – Comparativo Da Rugosidade Média (Ra) Entre As Ferramentas Negativa E Positiva

A Figura 5.29 apresenta a rugosidade Ra para a ferramenta negativa e positiva, ambas com raio de ponta normal, onde observa-se que não houve uma diferença significativa entre as rugosidades Ra obtidas, o que pode indicar pelo uso de ferramenta negativa devido ao seu custo por aresta.

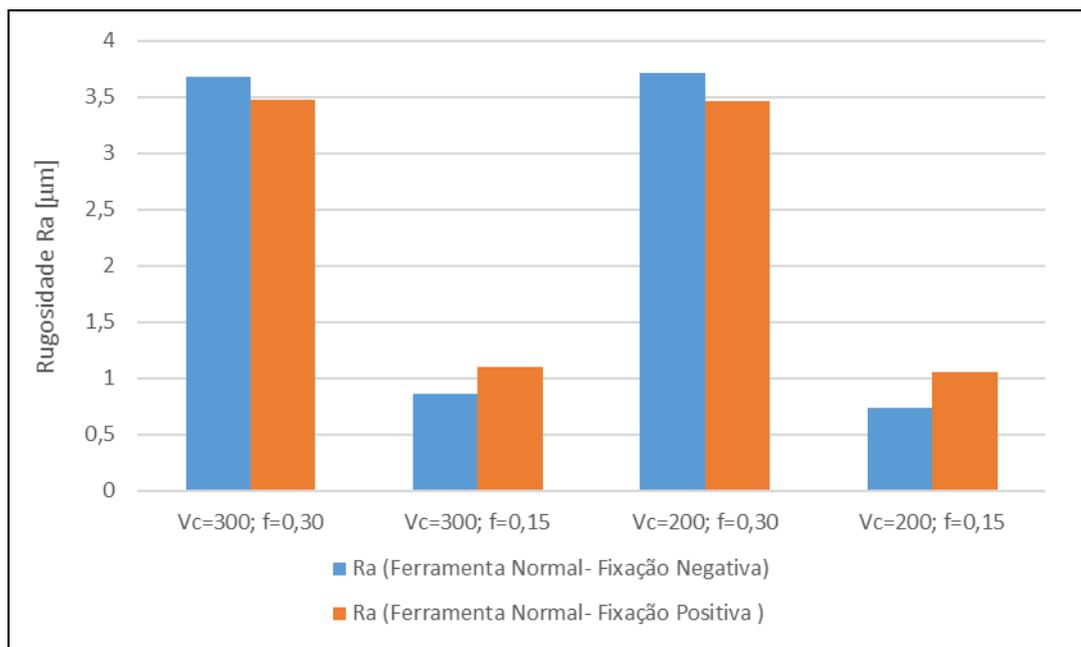


Figura 5.29 – Comparação da Rugosidade Ra entre Ferramenta Normal de Fixação Negativa e Positiva

A Figura 5.30 apresenta a rugosidade Ra para as ferramentas negativas e positivas, ambas com raio de ponta alisador, onde observa-se o efeito significativo da geometria alisadora da ferramenta positiva na redução de rugosidade Ra de 30 a 50% com avanço  $f=0,30$  mm/v. O que mostra a indicação da ferramenta positiva alisadora em casos onde deseja-se maior produtividade (maior avanço) e melhor qualidade superficial (baixa rugosidade) no torneamento de acabamento da superliga bronze de alumínio.

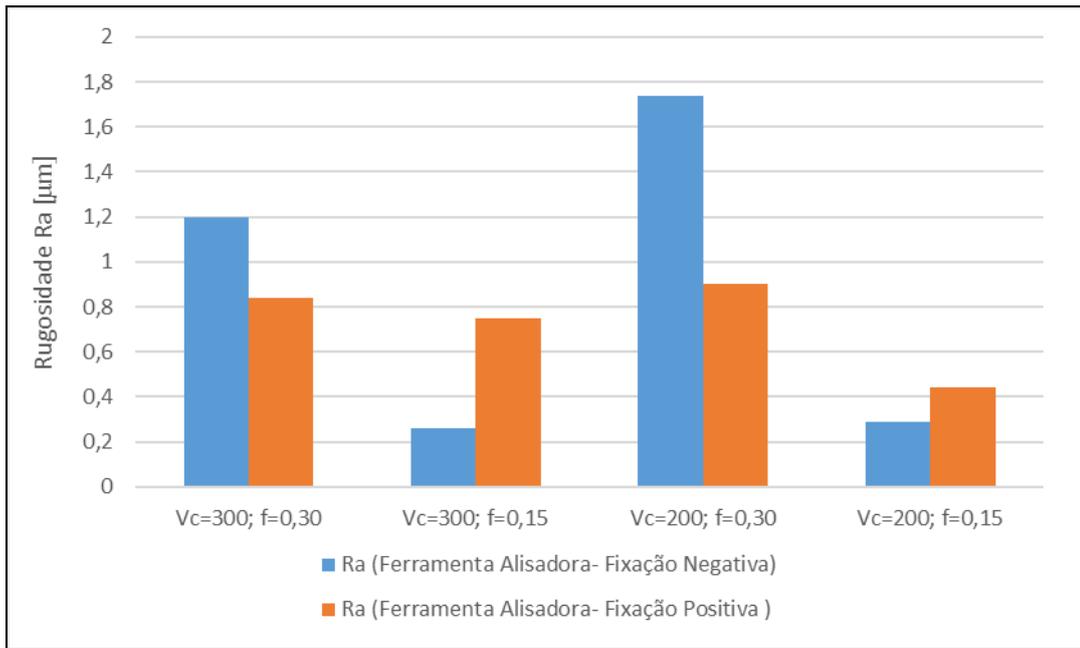


Figura 5.30 – Comparação da Rugosidade Ra entre Ferramenta Alisadora de Fixação Negativa e Positiva

## Capítulo 6

### CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos no torneamento de acabamento da liga bronze de alumínio pode-se concluir que:

- A ferramenta com geometria alisadora apresentou efeito significativo em todos os ensaios, alcançando rugosidades mínimas de 0,26  $\mu\text{m}$  Ra e 2,7  $\mu\text{m}$  Rt;
- O emprego da geometria alisadora permitiu trabalhar com avanços da ordem de 0,3 mm/v conseguindo rugosidade Ra abaixo de 1 $\mu\text{m}$  com ferramenta de fixação positiva;
- As ferramentas de fixação negativa e positiva com geometria normal não apresentaram diferenças significativas nas rugosidades obtidas;
- Notou-se que as ferramentas não sofreram nenhum tipo de desgaste durante a realização dos experimentos;
- Todas as variáveis estudadas  $V_c$ ,  $f$ , geometria e suas interações apresentaram influencia significativa sobre a rugosidade (Ra) da peça. Tendo o avanço influencia negativa e a geometria alisadora efeito positivo;
- As ferramentas com geometria alisadora apresentaram maiores componentes de forças de usinagem em relação a geometria normal. Onde esta diferença chegou a 100%;
- A componente da força de corte foi muito superior (3 a 6 vezes) as componentes da forças de avanço e passiva. Tendo estas últimas resultados muito próximos;
- O avanço influenciou significativamente a força de corte e a rugosidade da peça, ambas de maneira crescente.
- Os modelos de rugosidade Ra e Rt obtidos através da metodologia do projeto de experimento (DOE), realizaram previsões muito próximas à realidade, com ajustes acima de 95% para ambos os casos; isto mostra a viabilidade do modelamento de processos de usinagem por esta técnica (DOE);

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência do tamanho do raio da ponta da ferramenta replicando os experimentos realizados neste trabalho;
- Estudar a variação da pressão específica de corte com os tipos de geometria da ponta da ferramenta;
- Avaliar o acabamento da liga bronze de alumínio com outros parâmetros de rugosidade ( $R_z$ ,  $R_y$ ,  $R_q$ );
- Estudar a correlação das componentes das forças de usinagem com os diversos parâmetros de rugosidade da peça;
- Testar outras geometrias alisadoras de ferramentas no torneamento da liga bronze de alumínio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, M. J., KRABER, S. L. (1999). **Keys to successful designed Experiments.** Quality Digest Magazine, p. 25.

Aluminium Bronze for Industry, **CDA Publication** No 83, 1986.

AGOSTINHO. O L; RODRIGUES. A C S; LIRANI, J: **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**, Ed 2004, Editora Edgard Blucher, S Paulo

ANDRAE, P. **Chip formation in high speed cutting HSC.** In: INTERNACIONAL MACHINING & GRINDING CONFERENCE, 3. p.107-120, Oct, 1999.

BOX, G. E. P., BEHNKEN, D. W. (1960). **Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables.** *Technometrics*, v.2, n. 4, p. 455-475.

BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. (1978). **Statistics for Experimenters.** New York, John Wiley & Sons.

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

BRYMAN, A., (1989). **Research Methods and Organization Studies.** Unwin Hyman, London, pp. 2-50, 60-120.

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.

BÄKER, M.; RÖSLER, J.; SIEMERS, C. **Deformation and microstructure of titanium chip and workpiece.** *ZeitschriftfürMetallkunde*, v. 92 (2), p. 853 - 859, 2001.

BRESCIONI, ETTARE FILHO. **Selecao de metais não ferrosos.** Campinas: Editora da UNICAMP, 1997.

BENEDETTI, A.V. et al. **Electrochemical Studies of Cu-Al alloys in sulphate solutions with diferentpH.***PortugaliaeElectrochimica Acta.* 2003.

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

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.

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.

CIOCAN A., BRATU F. **Chemical and Structural Changes for Bimetallic Materials Obtained by the Welding**

CENOZ, Isaac; **Metallography of aluminium bronze alloy as cast in permanent iron die**. Association of Metallurgical Engineers of Serbia. 2010.

CANTOR, BRIAN; ASSENDER, HAZEL; GRANT, PATRICK. **Aerospace Materials**. London: Institute of Physics, 2001.

COUTINHO, TELMO DE AZEVEDO. **Metalografia de nao-ferrosos**. Sao Paulo: Edgard Blucher, 1980.

DINIZ, A. E; NORITOMI, P. Y. **Influência dos parâmetros de corte na rugosidade de peças torneadas**, Departamento de Engenharia de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, 2002.

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

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

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.

DROZDA, T. J.; WICK, C., (1983). **Tools and Manufacturing Engineers Handbook**, v.1. 1, Machining, SME, pp. 21-40.

DEREK E., Tyler; BLANK, William T. - **Introduction to Copper and Copper Alloys**, ASM, **Metals Handbook**, 10th ed, vol 2, (Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials),1990.

DREHER, FABRÍCIO SILVEIRA. **Sinterização de bronze ao alumínio seguido de envelhecimento artificial**. 2009. Tese (Mestrado). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ELBESTAWI, M. A., ELWARDANY, I., TAN, M. **Performance of whisker-reinforced ceramic tools in milling nickel-based superalloy**. In: *Annals of the CIRP*, v.42, n.1, p.99-102, 1993.

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

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

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, p. 751, 1977.

FALLBÖHMER, C. A., RODRÍGUEZ, T., ÖZEL, T., ALTAN, T. **High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing**. *Journal of Materials Processing Technology*, n.98, p.104-115, 2000.

GATTO, A., IULIANO, L. **Chip formation analysis in high speed machining of a nickel base superalloy with silicon carbide whisker-reinforced alumina**. *Internacional Journal Machine Tools Manufacturing*, v.34, n.8, p.1147-1161, 1994.

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

- JUN, Z., JIANXIN, D., JIANHUA, Z., XING, A. **Failure mechanisms of a whisker-reinforced ceramic tool when machining nickel-based alloys.** *Wear*, n.208, p.220-225, 1997.
- JEELANI, S., RAMAKRISHNAN, K. **Surface damage in machining titanium 6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy.** *Journal of Materials Science*, v. 20, p. 3245 - 3252, 1985.
- KÖNIG, W; WAND, TH. **Turning bearings steel with amorphous ceramic.** *Industrial Diamond Review*, v. 47/3, p. 117 – 120, 1993.
- KITAGAWA, T. KUBO, A AND MAEKAWA, K., “**Temperature and wear of cutting tools in high speed machining of Inconel and Ti-6Al-6V-2Sn**”. *Wear* 202, 1997. p. 142–148
- KITAGAWA, W; KOMANDUI, R; TÖNSHOFF, H. K; ACKERSCHOTT, G. **Machining of hard materials**, *Annals of the CIRP*, v. 33/2, p. 417-27, 1989.
- KÖNIG, W; WAND, TH. **Turning bearings steel with amorphous ceramic.** *Industrial Diamond Review*, v. 47/3, p. 117 – 120, 1993.
- KÖNIG, W., GERSCHWILER, K. **Machining nickel-based superalloys.** *Manufacturing Engineering*. n.3, p.102-108, 1999.
- MACHADO, A.R. e SILVA, M.B., (2004). *Usinagem dos Materiais*, Universidade Federal de Uberlândia, 8a. edição, Abril 2004.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments. Fourth ed.**, Wiley, New York, 2001.
- MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2 ed., p. 570, 2003.
- MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers. 5 ed.** John Wiley & Sons Inc., EUA, 2011.
- MILLS, B. E REDFORD, A. H., “**Machinability of Engineering Materials**”, Applied Science Publishers, Essex England. 1983.

- MYERS, R. H. & MONTGOMERY, D. C. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**, Canada, John Wiley & Sons, 1995.
- MONTGOMERY, D. C. (1997). **Designs and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons.
- NAKAYAMA, K. *et al.* **Relationship between cutting forces, temperature, built-up edge and surface finish**. *Annals of CIRP*, v. 14, p. 211-223, 1966.
- NAKAYAMA, K; ARAI, M.; KANDA, T. **Machinig characteristics of hard materials**. *Annals of the CIRP*, v. 37/1, p. 89 – 92, 1988.
- NARUTAKI, N., YAMANE, Y., KAYASHI, K. **High-speed machining of Inconel 718 with ceramic tools**. In: *Annalsofthe CIRP*, v.42, n.1, p.103-106, 1993.
- NOBRE, RAFAEL; LIBERTO, RODRIGO; MAGNABOSCO, RODRIGO. **Efeito de envelhecimento a 550 C da liga Cuproníquel Cu14Ni com adicoes de alumínio e ferro**. Sao Paulo: 18 Siicusp, 2010.
- NOVASKI, O., CORRÊA, M. A **HSC como vantagem competitiva**. *Máquinas e Metais*, n. 394, p.74-89, nov, 1998.
- PRVAN, T., STREET, D. J. (2002). **An annotated bibliography of application papers using certain classes of fractional factorial and related designs**. *Journal of Statistical Planning and Inference*, n.106, p.245-269.
- PAIVA, A. P. (2004). **Estudo da minimização de erro nas medições de concentração de emulsões por titração Karl-Fischer utilizando-se Projeto de Experimentos**, Dissertação de mestrado, Itajubá, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 215 p.
- PAIVA, A. P., COSTA, S. C., PAIVA, E. J., BALESTRASSI, P. P., FERREIRA, J. R. **Multi objective optimization of pulsed gas metal arc welding process based on weighted principal component scores**. *InternationalJournal Adv. Manuf. Technol*, 2504-y, 2007.
- PASHBY, I. R.; KHAMSEHZADEH, H. **A usinagem de waspaloy com diferentes pastilhas cerâmicas**. *Máquinas e Metais*, n.296, p.30-39, set, 1990.

- ROSS, P. J. (1991). **Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade**. Makron Books. São Paulo, p.26-96.
- RICHARDS, N., ASPINWALL, D. **Use of ceramic tools for machining nickel based alloys**. *Internacional Journal Machine Tools Manufacturing*, v.29, n.4, p.575-588, 1989.
- RODRIGUES, J.R.P., “**Componentes da força de usinagem no processamento de ligas não ferrosas e aços**”, *Maquinas e Metais*, v.476, 2005, pp.42-53.
- SIDIA, M. C. J. **Bioestatística: Princípios e Aplicações**. Ed. Artmed, Porto Alegre, 2003. 256p.
- SHAFFER, W. **Cutting tool edge preparation**. In: INTERNACIONAL MACHINING & GRINDING CONFERENCE, 3. p. 799-808, Oct, 1999.
- SANDVIK (2000). Catálogo técnico do fabricante de ferramentas, SandvikCoromant.
- SANDVIK (2010). Catálogo técnico do fabricante de ferramentas, SandvikCoromant.
- SANDVIK COROMANT, (2005). *Ferramentas para Torneamento* AB SandvikCoromant, Brasil, Catálogo 2005
- SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. I New York: Clarendon Press Oxford, 1986.
- SENAI/SP **Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento** - Santa Bárbara do Oeste- Fundação Romi Formação de Formadores, 2002.
- SAE International. Extrusions, **Nickel-Aluminum Bronze, Martensitic 78.5 Cu-10.5Al - 5.1 Ni - 4.8 Fe**. Solution Heat Treat and Tempered (TQ50). SAE AMS 4590B. USA. 2006.
- SANTOS, REZENDE GOMES. **Transformações de fases em materiais metálicos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2006.
- THANGARAJ, A. R., WEINMANN, K. J. **On the wear mechanisms and cutting performance of silicon carbide whisker-reinforced alumina**. *Journal of Engineering for Industry*, v.114, p.301-308, Aug, 1992.
- TRENT, E. M., “**Metal Cutting**” , 2nd ed, Butterworth, Londo, 1984. p. 245.

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

WAYNE, S. F., BULJAN, S. T. **Wear of ceramic cutting tools in Ni-based superalloy machining**. *TribologyTransactions*, v.33, n.4, p.618-626, 1990.

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.

WHARTON, J.A.; STOKES, K.R. **The influence of nickel-aluminium bronze microstructure and crevice solution on the initiation of crevice corrosion**. *Electrochimica Acta* 53, 2008, p. 2463–2473.

VIGNEAU. J. **Obtendo alta produtividade na usinagem de ligas de titânio e superligas**. *Máquinas e Metais*, n. 380, p.16-31, set. 1997.

ZHANG, D. et al. **Effect of heat treatment on microstructure and properties of hot-extruded nickel-aluminum bronze**. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 17, 2007, p.1254-1258.