

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Determinação de Modelos de Vida de  
Ferramenta e Rugosidade no Torneamento do  
Aço ABNT 52100 Endurecido Utilizando a  
Metodologia de Superfície de Resposta (DOE).**

**Autor: Jean Carlo Cescon Pereira**

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

Itajubá, Fevereiro de 2006.

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Determinação de Modelos de Vida de  
Ferramenta e Rugosidade no Torneamento do  
Aço ABNT 52100 Endurecido Utilizando a  
Metodologia de Superfície de Resposta (DOE).**

**Autor: Jean Carlo Cescon Pereira**

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

**Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Projeto e Fabricação**

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

Itajubá, Fevereiro de 2006

M.G. – Brasil

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Determinação de Modelos de Vida de  
Ferramenta e Rugosidade no Torneamento do  
Aço ABNT 52100 Endurecido Utilizando a  
Metodologia de Superfície de Resposta (DOE).**

Autor: **Jean Carlo Cescon Pereira**

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

Composição da Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva – UFU**

**Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa – UNIFEI**

**Prof. Dr. João Roberto Ferreira – UNIFEI**

## **Dedicatória**

*À minha esposa Emiliana e à minha família,  
minha mãe Therezinha, meu pai Juvenal e  
minha irmã Juliana, que me deram todo o  
apoio e incentivo, imprescindíveis para o  
alcance de mais este ideal.*

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. João Roberto Ferreira, orientador e amigo, pela dedicação, competência e paciência transmitidos durante o transcorrer deste trabalho.

Ao amigo Anderson Paulo de Paiva, pela ajuda e apoio, pessoa com a qual sempre pude contar em todos os momentos de dificuldade.

Aos amigos da república MMP, pelo companheirismo, amizade e inesquecíveis momentos de convivência, impossíveis de serem sintetizados numa frase.

A todos os funcionários da UNIFEI, que no cumprimento das mais diversas funções, sempre com muita dedicação e competência, deram valiosa contribuição para o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro, através do sistema de bolsas.

À Sandvik pelo incentivo à pesquisa, através da doação das pastilhas cerâmicas utilizadas nos experimentos.

Aos professores da Universidade Federal de Itajubá, em especial aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica, pela oportunidade concedida na realização deste trabalho.

*E ele não sabia que era impossível. E foi lá. E fez.*

## Índice

<b>Resumo</b> .....	x
<b>Abstract</b> .....	xi
<b>Lista de figuras</b> .....	xii
<b>Lista de tabelas</b> .....	xv
<b>Nomenclatura</b> .....	xvi
<b>Capítulo 1: Introdução</b> .....	1
<b>Capítulo 2: Torneamento de Aços Endurecidos</b> .....	6
2.1 Materiais de ferramentas para torneamento duro.....	6
2.1.1 Ferramentas de nitreto de boro cúbico policristalino.....	8
2.1.1.1 Propriedades dos insertos de PCBN.....	10
2.1.1.2 Aplicações para os insertos de PCBN.....	12
2.1.2 Ferramentas cerâmicas.....	13
2.1.2.1 Propriedades dos insertos cerâmicos.....	15
2.1.2.2 Aplicações para os insertos cerâmicos.....	19
2.1.3 Comparação entre ferramentas cerâmicas e PCBN.....	19
2.1.4 Geometria das ferramentas cerâmicas e PCBN.....	22
2.2 Torneamento de aços endurecidos.....	23
2.2.1 Forças de corte.....	23
2.2.2 Máquinas-ferramenta.....	25
2.2.3 Deterioração da ferramenta.....	25
2.3 Características da superfície usinada.....	28
2.3.1 Rugosidade superficial.....	28
2.4 Refrigeração no torneamento duro.....	33
2.5 Desgaste e vida das ferramentas de corte.....	33
2.5.1 Desgastes em ferramentas de corte e suas áreas de incidência.....	34

2.5.2 Mecanismos causadores dos desgastes.....	34
2.5.3 Avarias das ferramentas de corte.....	37
2.6 Torneamento duro versus retificação cilíndrica.....	38
2.7 Trabalhos sobre vida de ferramentas.....	41
2.7.1 Desgaste de ferramentas de cerâmica mista e PCBN com geometria alisadora e convencional.....	41
2.7.2 Desgaste no torneamento de aço endurecido.....	44
2.7.3 Refrigeração no torneamento de aço endurecido.....	46
<b>Capítulo 3: Projeto de experimentos.....</b>	<b>49</b>
3.1 Princípios básicos de planejamento e análise de experimentos.....	49
3.1.1 Conceitos gerais de experimentação.....	50
3.1.2 Processo para conduzir experimentos.....	52
3.2 O método do projeto de experimentos.....	57
3.2.1 Introdução.....	57
3.2.2 Estratégia do DOE.....	58
3.3 O projeto padrão.....	60
3.4 Fatoriais fracionários .....	63
3.4.1 meia fração de um planejamento $2^k$ .....	63
3.5 A metodologia da superfície de resposta.....	65
3.6 <i>Center points</i> .....	68
3.7 <i>Central composite designs</i> .....	69
3.8 Teste para a significância do modelo.....	71
3.9 Teste para a significância individual dos coeficientes do modelo.....	72
3.10 Teste para a falta de ajuste ( <i>Lack-of-fit</i> ).....	72
3.11 Ponto estacionário.....	73
3.12 Otimização de uma única resposta.....	74
<b>Capítulo 4: Procedimento experimental.....</b>	<b>76</b>
4.1 Máquina-ferramenta.....	76



4.2 Ferramentas de corte.....	77
4.3 Material usinado.....	78
4.4 Instrumentos de medição.....	79
4.5 Parâmetros de usinagem.....	80
4.6 Metodologia de ensaios.....	80
<b>Capítulo 5: Resultados e discussão.....</b>	<b>84</b>
5.1 Modelo de vida da ferramenta.....	84
5.2 Ajuste de modelos.....	93
5.3 Experimentos de confirmação.....	102
5.4 Desgaste e avarias na ferramenta de corte.....	104
5.5 Modelo para rugosidade.....	108
5.6 Experimentos de confirmação.....	122
<b>Capítulo 6: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>126</b>
6.1 Conclusões.....	126
6.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	128
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>129</b>

## Resumo

Pereira, Jean Carlo Cescon (2006), *Estudo das condições de corte no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido, utilizando a metodologia de projeto de experimentos (DOE)*. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, Dissertação de Mestrado, 132 p.

No atual cenário da indústria, os processos produtivos evoluem a cada dia, aliados ao desenvolvimento de novos materiais e geometrias para ferramentas e máquinas mais precisas e eficientes. Estas novas tecnologias permitem maior flexibilização dos processos, como a substituição do processo de retificação de materiais endurecidos pelo torneamento. Esta mudança traz significativas reduções em custos de ferramental, tempo de set-up e usinagem. Acompanhando esta evolução tecnológica, ocorre o aparecimento da metodologia denominada Projeto de Experimentos (DOE). O DOE torna mais eficientes as experimentações, que cada vez mais fazem parte da rotina das indústrias que desejam continuar competitivas no mercado. A utilização do DOE, permite chegar a resultados mais precisos com menor número de experimentos, o que se traduz em menor tempo de resposta, menos gastos com material e ferramentas para testes e dados mais confiáveis. Neste trabalho é realizado um estudo das condições de usinagem do aço ABNT 52100 endurecido, com ferramentas de cerâmica mista, aplicando-se o projeto de experimentos. São analisados a vida da ferramenta e o acabamento superficial da peça; como critério de fim de vida da ferramenta de corte foi adotado um desgaste de flanco da aresta igual ou superior a  $V_B = 0,3$  mm. Todos os parâmetros de corte, quando em seus níveis mais elevados, contribuíram de forma significativa para a redução da vida da ferramenta, enquanto que para a rugosidade superficial, apenas o aumento do avanço mostrou influência significativa no acabamento da peça.

### Palavras chave

Usinagem, Torneamento de aços endurecidos, Projeto de Experimentos, Ferramentas cerâmicas, Aço ABNT 52100.

## **Abstract**

Pereira, Jean Carlo Cescon (2006), Study of cut conditions on turning hardened steel ABNT 52100, using design of experiment methodology (DOE). Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, Master's Degree, 132 p.

At the current industry scenario the productive processes grow everyday along with the development of new materials and shape for tools as well as more effective machines. These new technologies allow higher process flexibility as the replacement of grinding process of hardened materials by turning. This change brings meaningful reductions in the tool costs, set up time and machining. Following this technological evolution the methodology named Design of Experiment (DOE) comes into existence. The DOE makes the experimentation more effective once it is present in every industry that wants to keep competitive in the market. Using the DOE allows more precise results with a fewer number of experiments which brings a result in short time, reduced expenses with materials and tools for tests and more reliable data. The study carried out in this paper is about the determination of the machining condition to cut hardened ABNT 52100 steel with mixed ceramic tools, applying the Design of Experiment on it. Tool life and surface finishing of the piece are analyzed. A flank wear of 0,3 mm is adopted as end of tool life criterion. All the cutting parameters, when in its highest values contributed to a meaningful tool life reduction while as for surface roughness just the increase of feed rate showed meaningful influence.

### **Key words**

Machining, Turning hardened steel, Design of Experiment, Ceramic tools, ABNT 52100 steel.

## Lista de figuras

Figura 1.1-Modelo geral de um sistema de transformação, Montgomery (1991).....	3
Figura 2.1-Variação da dureza com a porcentagem de CBN, Wise (1992), citado por Costa, (1993).....	12
Figura 2.2- Divisão de materiais cerâmicos para ferramentas de corte, Sandvik (2002).....	13
Figura 2.3- Valores da dureza com relação à temperatura para determinados materiais; Komanduri e Samanta (1989).....	17
Figura 2.4- Variação da resistência à compressão com a temperatura para insertos de cerâmica (Alumina) e Metal Duro (P10), Ezugwu e Wallbank (1987).....	18
Figura 2.5- Variação da dureza com a temperatura para diferentes materiais de insertos, Boehs ( 1987).....	27
Figura 2.6- Desvio médio aritmético $R_a$ , Agostinho, et. al. (1990).....	29
Figura 2.7- Altura das irregularidades dos 10 pontos “ $R_z$ ”, Agostinho, et. al. (1990).....	30
Figura 2.8- Altura máxima das irregularidades “ $R_{max}$ ” e profundidade média “ $R_p$ ”, Agostinho, et. al. (1990).....	31
Figura 2.9- Influencia da temperatura e/ou velocidade de corte nos desgastes das ferramentas, Bas (2001).....	36
Figura 2.10- Avarias das ferramentas de corte, Sandvik (2000).....	37
Figura 2.11- Trinca e quebra de origem mecânica na aresta de corte, Sandvik (2000).....	38
Figura 2.12- Comparação entre os processos de torneamento e retificação, Donnangelo, Georgetti e Santos (2000).....	41
Figura 2.13- Rugosidade $R_a$ ( $V_c=150$ m/min, $a_p=0,2$ mm, ferramenta convencional e alisadora), Salles (2004).....	42
Figura 2.14- Rugosidade $R_a$ em função do número de peças usinadas, Salles (2004).....	43
Figura 2.15- Rugosidade $R_a$ em função do número de peças usinadas, Salles (2004).....	44
Figura 2.16- Vida das ferramentas em função das velocidades de corte, Diniz e Matsumoto (1999).....	45

Figura 2.17- Vida da ferramenta de PCBN para o critério $R_a=0,75 \mu\text{m}$ , Teixeira (2000).....	47
Figura 2.18- Vida da ferramenta de PCBN para o critério $V_{\text{max}}=0,15 \text{ mm}$ , Teixeira (2000).....	48
Figura 3.1- Diferentes categorias dos fatores; Coleman e Montgomery (1993).....	54
Figura 3.2- Roteiro para condução de experimentos, Haaland e O'Connell (1993).....	56
Figura 3.3- Representação gráfica de um Central Composite Design, Paiva (2002).....	70
Figura 3.4- Estratégia de otimização experimental.....	75
Figura 4.1- Geometria ISO CNGA da pastilha de cerâmica.....	77
Figura 4.2-Dimensões dos corpos de prova do aço ABNT 52100 com dureza 55 HRC.....	79
Figura 4.3- Posições de leitura da rugosidade nos corpos de prova.....	81
Figura 4.4- Esquema do banco de ensaios.....	82
Figura 4.5- Representação gráfica de um <i>Central Composite Design</i> (CCD).....	83
Figura 5.1- Vida das ferramentas de corte nos ensaios e respectivas réplicas para os pontos fatoriais.....	86
Figura 5.2- Diagrama de pareto dos efeitos padronizados.....	88
Figura 5.3- Gráficos dos efeitos principais de $V_c$ , $f$ e $a_p$ na vida da ferramenta.....	89
Figura 5.4- Gráfico das interações dos efeitos na vida da ferramenta.....	90
Figura 5.4- Diagrama de pareto dos efeitos padronizados.....	91
Figura 5.5-a- Superfícies de respostas do tempo de vida da ferramenta $T$ (min) para $a_p=0,225 \text{ mm}$ .....	97
Figura 5.5-b- Superfícies de respostas do tempo de vida da ferramenta $T$ (min) para $V_c=220 \text{ m/min}$ .....	98
Figura 5.6- Gráfico de contorno da vida da ferramenta.....	99
Figura 5.7- Análise de resíduos da RSM da resposta Vida.....	100
Figura 5.8- Resíduos versus ordem de execução dos experimentos.....	101
Figura 5.9- Resíduos versus valor ajustado da vida da ferramenta.....	101
Figura 5.10- Análise estatística dos experimentos de confirmação.....	104
Figura 5.11- Evolução do desgaste da ferramenta para a condição $V_c = 200 \text{ m/min}$ , $f = 0,05 \text{ mm/v}$ e $a_p = 0,15 \text{ mm}$ .....	105

Figura 5.12- Desgastes na ferramenta após atingir critério de fim de vida, para $V_c=200$ m/min, $f=0,05$ mm/v e $a_p=0,15$ mm.....	105
Figura 5.13- Evolução do desgaste para a condição $V_c = 240$ m/min, $f = 0,10$ mm/v e $a_p = 0,15$ mm.....	106
Figura 5.14- Quebra da ferramenta para a condição $V_c=240$ m/min, $f=0,10$ mm/v e $a_p=0,15$ mm.....	107
Figura 5.15- Rugosidade da superfície usinada e respectivas réplicas, medidas após último passe de usinagem.....	109
Figura 5.16- Diagrama de pareto dos efeitos padronizados.....	111
Figura 5.17- Gráficos dos efeitos principais $V_c$ , $f$ e $a_p$ na rugosidade média.....	112
Figura 5.18- Gráficos das interações dos efeitos na rugosidade média.....	113
Figura 5.19- Superfície de resposta para rugosidade média ( $R_a$ ).....	118
Figura 5.20- Gráfico de contorno para rugosidade média ( $R_a$ ).....	119
Figura 5.21- Resíduos versus ordem de execução dos experimentos.....	120
Figura 5.22- Resíduos versus valores ajustados da resposta rugosidade média.....	120
Figura 5.23- Evolução da rugosidade para a condição $V_c = 200$ m/min, $f = 0,10$ mm/v e $a_p = 0,30$ mm.....	121
Figura 5.24- Evolução da rugosidade para a condição $V_c = 240$ m/min, $f = 0,10$ mm/v e $a_p = 0,30$ mm.....	122
Figura 5.25- Análise estatística para os experimentos de confirmação.....	124
Figura 5.26- Gráfico de sobreposição das curvas de níveis das superfícies de resposta para a Vida da Ferramenta e a Rugosidade Média ( $R_a$ ).....	125

## Lista de tabelas

Tabela 2.1- Comparação entre as propriedades de cerâmicas e o PCBN; Costa (1993).....	20
Tabela 2.2- Comparação entre as propriedades de vários tipos de cerâmica e o metal duro; Diniz,et al (1994).....	20
Tabela 3.1- Repetição de experimentos.....	60
Tabela 3.2- Ordem padrão para um experimento com três fatores em dois níveis; Paiva (2002).....	62
Tabela 3.3- Tabela de sinais para o fatorial fracionário $2^{3-1}$ .....	64
Tabela 4.1- Composição química do aço ABNT 52100.....	78
Tabela 4.2- Parâmetros de usinagem utilizados.....	80
Tabela 5.1- Fatorial completo $2^3$ com <i>center points</i> , para a resposta vida de ferramenta T (min).....	85
Tabela 5.2- ANOVA do fatorial completo $2^3$ com <i>center points</i> para resposta Vida.....	87
Tabela 5.3- Parâmetros de corte e resultados para o RSM da resposta Vida, utilizando-se a blocagem.....	91
Tabela 5.4- ANOVA da superfície de resposta, para a resposta vida da ferramenta, considerando-se a blocagem.....	92
Tabela 5.5- Modelo linear para vida da ferramenta.....	93
Tabela 5.6- ANOVA da superfície de resposta.....	94
Tabela 5.7- ANOVA de modelo reduzido.....	95
Tabela 5.8- Valores de vida dos experimentos de confirmação.....	103
Tabela 5.9- Fatorial completo $2^3$ com <i>center points</i> para a resposta rugosidade superficial Ra ( $\mu\text{m}$ ).....	108
Tabela 5.10- ANOVA do fatorial completo $2^3$ para rugosidade média (Ra).....	110
Tabela 5.11- Parâmetros de corte e resultados para o RSM da resposta rugosidade média.....	114
Tabela 5.12- ANOVA da superfície de resposta, para a resposta rugosidade média (Ra)...	115
Tabela 5.13- Valores de rugosidade média dos experimentos de confirmação.....	123

## NOMENCLATURA

### Abreviações

<b>CaO</b> .....	Óxido de cálcio
<b>CBN</b> .....	Nitreto de boro cúbico
<b>COEF</b> .....	Coeficiente
<b>CONV</b> .....	Convencional
<b>HRC</b> .....	Escala de dureza rockwell
<b>HV</b> .....	Escala de dureza vickers
<b>K<sub>1c</sub></b> .....	Tenacidade á fratura em condições de deformação plana
<b>MnS</b> .....	Sulfeto de manganês
<b>PCBN</b> .....	Nitreto de boro cúbico policristalino
<b>PCD</b> .....	Diamante policristalino
<b>R<sub>t</sub></b> .....	Rugosidade máxima
<b>TEMP</b> .....	Temperatura
<b>V<sub>Bmax</sub></b> .....	Desgaste de flanco máximo
<b>ZTA</b> .....	Zona termicamente afetada



## **Siglas**

**ABM**.....Associação Brasileira de Metalurgia e Metais

**AISI**.....American Iron and Steel Institute

**ASM**.....American Society for Materials

**ASTM**.....American Society for Testing Materials

**CNC**.....Comando numérico computadorizado

**ISO**.....International Standardization Organization

**LAM**.....Laboratório de automação da manufatura

## Simbologia

<b>a<sub>p</sub></b> .....	Profundidade de corte (mm)
<b>B</b> .....	Boro
<b>C</b> .....	Carbono
<b>Cr</b> .....	Cromo
<b>f</b> .....	Avanço por volta (mm/v)
<b>l<sub>c</sub></b> .....	Comprimento de corte
<b>Mn</b> .....	Manganês
<b>Mo</b> .....	Molibdênio
<b>Nb</b> .....	Nióbio
<b>NB</b> .....	Nitreto de boro
<b>Ni</b> .....	Níquel
<b>P</b> .....	Fósforo
<b>S</b> .....	Enxofre
<b>Si</b> .....	Silício
<b>T</b> .....	Vida da ferramenta de corte
<b>Ti</b> .....	Titânio
<b>V</b> .....	Vanádio
<b>V<sub>c</sub></b> .....	Velocidade de corte
<b>Zr</b> .....	Zircônio

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

O torneamento de materiais duros vem sendo cada vez mais utilizado ao longo dos tempos, devido ao crescente aumento da demanda de produção e à necessidade de redução dos custos de fabricação, oriundos da exigência cada vez maior das novas tecnologias empregadas nos processos industriais.

Convencionou-se chamar de torneamento duro, a remoção de cavacos em materiais com dureza superior aos 45 HRC. Há poucos anos, materiais que necessitavam ser usinados em sua forma endurecida, o eram apenas pelo processo de retificação.

Hoje, devido ao desenvolvimento de materiais para ferramentas de elevada dureza e resistência ao desgaste em altas temperaturas, aliados ao surgimento de máquinas ferramentas de maiores rigidez e precisão dimensional em altas rotações, é possível a usinagem destes materiais pelo processo de torneamento. No presente trabalho, dentre os diferentes tipos de ferramentas existentes que possibilitam o torneamento duro, optou-se pelas pastilhas cerâmicas, devido à sua elevada dureza à quente e resistência ao desgaste e o seu baixo custo quando comparadas com as pastilhas de CBN ou PCBN.

O estudo de alguns trabalhos acena com a possibilidade de obtenção de peças com qualidade semelhante às obtidas na retificação fina, utilizando-se para isto, tornos de alta precisão, parâmetros otimizados de corte e geometrias especiais de ferramentas. Segundo Sales (2004), é possível obter-se em tornos CNC, rugosidades de 0,2 a 0,3  $\mu\text{m}$ , que

correspondem às obtidas na retificação em geral. A substituição do processo de retificação pelo torneamento duro, traz inúmeras vantagens, dentre as quais a possibilidade de trabalhar sem fluido de corte, a eliminação de etapas no processo de fabricação, maior produtividade, baixo consumo de energia por volume de material usinado, máquinas-ferramenta de menor custo e também a possibilidade da realização de várias operações numa mesma fixação, o que garante as características geométricas da peça e reduz o tempo de usinagem; Matsumoto (1998).

Optou-se neste trabalho, pelo torneamento a seco, devido ao fato de nesta condição de corte, a alta temperatura favorecer a deformação e o cisalhamento do cavaco, reduzindo os esforços de corte. Na condição a seco, evita-se também sérios inconvenientes quanto ao manuseio, manutenção e descarte de fluidos, que vêm a causar poluição da água e do solo, além de danos à saúde do ser humano; Teixeira Filho (2000).

No estudo da vida de ferramentas e da rugosidade média das superfícies usinadas, pelo processo de torneamento, temos vários fatores de influência, como por exemplo, a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem. Na análise convencional da influência destes fatores num processo de usinagem, geralmente é estudada a influência de cada um deles isoladamente, o que demanda um grande número de ensaios, elevado consumo de material de usinagem e ferramentas, além da necessidade de utilização de muitas horas-máquina, o que em geral, torna os custos com a experimentação proibitivos.

É neste contexto que surge a metodologia de projetos de experimento, a qual nos permite estabelecer um relacionamento funcional adequado entre vida de ferramenta, rugosidade média da superfície usinada e parâmetros de corte, levando-se em consideração a variação simultânea dos fatores para construir modelos de previsão para as respostas de interesse. Esta abordagem de cunho estatístico consiste em planejar experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma eficaz análise, o que resulta em conclusões válidas e objetivas; Montgomery (1997).

O experimento projetado ou planejado é um teste ou uma série de testes, nos quais se induzem mudanças deliberadas ou estímulos nas variáveis de entrada do processo, de tal forma que seja possível observar e identificar os efeitos nas respostas ou nas variáveis de saída. O processo de transformação é representado pela combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam uma entrada em produtos acabados ou semi-acabados, com características ou parâmetros específicos, conforme Figura 1.1.

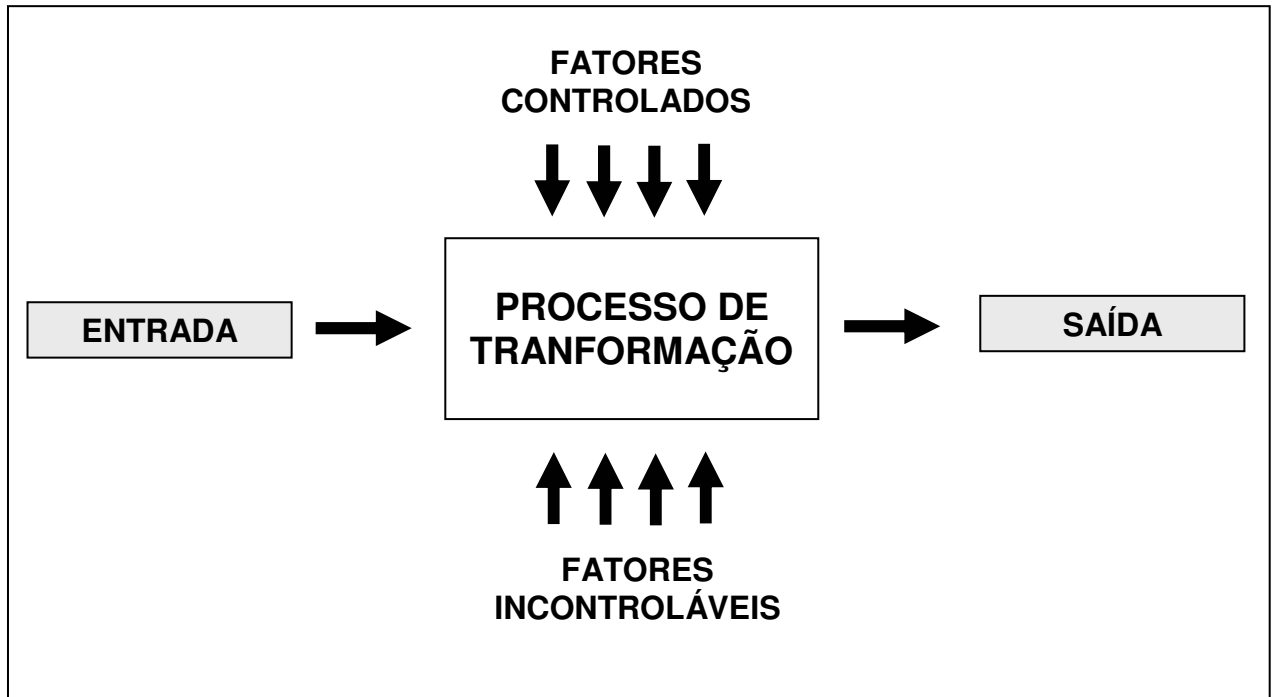


Figura 1.1- Modelo geral de um sistema de transformação, Montgomery (1991).

Segundo Montgomery (1991), as técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas basicamente para melhorar as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa, tais como, material, tempo de funcionários, disponibilidade de máquinas etc. Button (2001), descreve que esse objetivo geral pode ser dividido em objetivos secundários:

- Identificar as variáveis (fatores de controle) do processo que mais influem nos parâmetros de resposta de interesse;
- Atribuir valores às variáveis influentes do processo de modo que a variabilidade da resposta de interesse seja mínima ou que o valor do resultado seja próximo do valor nominal;
- Atribuir valores às variáveis influentes do processo, de modo que o efeito das variáveis não controláveis sejam reduzido.

Segundo Galdámez (2002), as técnicas experimentais são pouco difundidas nas empresas brasileiras, isto se deve a falta de conhecimento estatístico, que comumente os gerentes, funcionários e engenheiros enfrentam ao usar tais ferramentas.

Quando as informações dos experimentos são analisadas estatisticamente, garante-se que o produto será projetado com robustez às variações decorrentes do próprio processo de fabricação, meio ambiente e usuário. Ainda, a análise estatística é importante porque uma pequena diferença entre as especificações técnicas de um produto ou nos níveis de ajustagem dos fatores de controle de um processo de fabricação pode significar o ganho ou perda de tempo de produção, ferramentas de usinagem e qualidade do produto, o que conseqüentemente, se converte em grandes ganhos ou perdas econômicas para a empresa.

Em face dos tópicos anteriormente mencionados e tendo-se em vista as condições de trabalho disponíveis, propõe-se como objetivos do presente trabalho os itens descritos a seguir:

- Estudar o comportamento de ferramentas cerâmicas no torneamento do aço ABNT 52100 no estado endurecido;
- Avaliar as influências das variações dos parâmetros de usinagem, como velocidade de corte, avanço de corte e profundidade de usinagem na vida da ferramenta;
- Monitorar o desgaste das ferramentas e o conseqüente acabamento da peça devido à degradação da ferramenta;
- Avaliar o desempenho da operação de torneamento, no tocante à rugosidade da superfície usinada.

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos para uma melhor ordenação das idéias explanadas, os quais estão descritos a seguir:

- Capítulo I: Introdução
- Capítulo II: Torneamento de Aços Endurecidos

Discorre-se neste capítulo sobre a usinabilidade dos aços endurecidos, estudando-se o seu comportamento, assim como os materiais para ferramentas de corte utilizados neste tipo de usinagem. Apresentam-se aqui dados obtidos em experimentos similares de torneamento de aços endurecidos;

➤ Capítulo III: Projeto de Experimentos

Revisa-se neste capítulo a metodologia empregada no projeto de experimentos, evidenciando-se as vantagens obtidas com a utilização desta técnica;

➤ Capítulo IV: Procedimento Experimental

Neste capítulo serão descritas as ferramentas de corte, o material utilizado para a usinagem, características da máquina, instrumentos, corpos de prova, condições de corte e procedimento utilizado.

➤ Capítulo V: Resultados e Discussões

Discussão e análise dos dados obtidos com os experimentos, objetivando-se a correta interpretação dos mesmos.

➤ Capítulo VI: Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

É apresentada neste capítulo uma síntese do capítulo anterior, fornecendo as conclusões obtidas e sugestões para futuros trabalhos.

➤ Capítulo VII: Referências Bibliográficas.

## **CAPÍTULO 2**

### **TORNEAMENTO DE AÇOS ENDURECIDOS**

O torneamento de materiais endurecidos é uma operação que possui algumas peculiaridades, as quais serão aqui estudadas antes de adentrar-se à análise de resultados obtidos em experimentos desta natureza. O presente capítulo irá tratar de questões como as ferramentas possíveis de serem utilizadas na usinagem dura, bem como suas respectivas vantagens e limitações. Discorrer-se-á também, sobre os mecanismos de desgaste das ferramentas, tipos de cavaco formados e comportamento das forças de corte.

#### **2.1 Materiais de Ferramentas para Torneamento Duro**

Diversos são os materiais utilizados na confecção de ferramentas para torneamento, os quais possuem propriedades que poderão ser melhores ou piores, dependendo das condições em que ocorrer a usinagem e também do tipo de material a ser usinado.



Numa rápida referência a estes materiais, podemos citar, em ordem crescente de dureza à quente:

- Aços rápidos
- Aços rápidos com cobertura
- Metal duro
- Metal duro com cobertura
- Material cerâmico
- Nitreto de boro cúbico (CBN)
- Diamante

Para o torneamento de aços endurecidos, os materiais para ferramentas devem cumprir alguns requisitos, que segundo König et al (1984), são:

- Elevada dureza à temperatura ambiente e à quente;
- Elevada resistência à ruptura transversal, sendo esta superior à  $390 \text{ N/mm}^2$ ;
- Elevada tenacidade à fratura;
- Elevada resistência à compressão;
- Elevada resistência ao choque térmico;
- Elevada resistência às reações químicas;

O aço rápido e o metal duro não cumprem um importante pré-requisito, que é elevada dureza à quente e não são recomendados quando a dureza da peça é superior a 50 HRC, o que, apesar do baixo custo da pastilha, os tornam inviáveis para a usinagem dura.

Os materiais cerâmicos, apesar da baixa tenacidade, propriedade esta que pode ser melhorada em determinados compostos cerâmicos, como será visto a seguir, possuem uma boa relação custo / benefício neste tipo de usinagem, sendo inclusive o material escolhido para os testes de torneamento no presente trabalho.

Outro material de excelente desempenho no torneamento de materiais endurecidos é o nitreto de boro cúbico, sendo, entretanto uma de suas limitações com relação às pastilhas cerâmicas, o seu elevado custo por aresta e a menor estabilidade química aos aços.

O mais duro de todos os materiais citados e que também atende à maioria dos requisitos, possui um sério inconveniente na usinagem de materiais ferrosos. Em temperaturas acima dos 800 °C, o diamante policristalino reage quimicamente com o ferro, perdendo o gume cortante; König (1993); Kloche (1995); Abrão (1996), citados em Matsumoto (1998).

Desta forma, restam duas classes de materiais interessantes para a tarefa em questão, os cerâmicos e os CBN, sendo as propriedades de ambos salientadas a seguir.

### **2.1.1 Ferramentas de nitreto de boro cúbico policristalino**

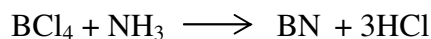
A partir de uma compressão, sob elevada pressão (50 a 90 Kbar) e temperaturas superiores a 2000 °C, a combinação química entre boro e nitrogênio dá origem ao nitreto cúbico de boro cristalino (CBN). Os grãos monocristalinos de CBN podem ser produzidos por sinterização (sob alta pressão) ou por deposição iônica sob vapor ou por dupla exposição iônica. Os processos baseados na deposição iônica são usados na produção de micro coberturas de CBN, que podem ser empregados como dielétricos, dissipadores de calor e proteção contra desgaste ou corrosão. Os grãos de CBN obtidos após a sinterização, serão selecionados e então sinterizados, obtendo-se uma grande massa policristalina, pois os insertos para ferramentas de geometria definida requerem uma massa maior, se comparados aos grãos abrasivos empregados nos rebolos. Os produtos atualmente comercializados possuem outro material como segunda fase.

Este material pode ser um metal (geralmente o cobalto) ou uma cerâmica (TiC ou TiN) ou o próprio nitreto de boro na forma hexagonal. A proporção desta segunda fase, e também sua composição química variam conforme as propriedades requeridas pelo produto.

O pó de CBN misturado com o material usado como segunda fase, pode ser sinterizado *in situ* sobre uma base de metal duro (WC+Co). A espessura da camada de PCBN varia comercialmente de 0,5 a 0,7 mm. O material assim produzido ainda não se encontra na forma acabada e deverá ser cortado próximo à geometria desejada, brasado e retificado para as dimensões finais (Heath, 1989, citado por Costa, 1993). O corte pode ser feito por eletroerosão ou laser. A brasagem pode ser feita diretamente sobre o porta insertos ou sobre um inserto de metal duro, sendo posteriormente fixado mecanicamente. A operação seguinte é a retificação, onde são empregados rebolos diamantados em decorrência da elevada dureza do material a ser retificado.

Os insertos de PCBN podem ainda ser sinterizados mediante a consolidação da mistura de pós sem o substrato, formando uma peça inteiriça. Esta peça é cortada por laser e retificada para a geometria final. Desta forma são produzidos os insertos intercambiáveis de dupla face. Os insertos de PCBN são, portanto, produzidos com padrões dimensionais e geométricos sem furo para fixação e sem quebra cavaco sinterizado ou em forma de plaquetas.

O nitreto cúbico de boro é, portanto, um material sintético obtido pela reação química:



Sendo quimicamente mais estável que o diamante, pode ser utilizado na usinagem de ligas ferrosas, sem que ocorra grande desgaste por difusão.

Sua tenacidade é similar ao do material cerâmico baseado em nitretos e cerca de duas vezes a da alumina. Sua dureza só pode ser superada pelo diamante, equivalendo a quase duas vezes a dureza da alumina; Costa (1993), citado por Teixeira (2000).

Existem diversos tipos de PCBN no mercado, pois cada fabricante utiliza diferentes materiais, quantidades de aglomerantes e diferentes tamanhos e distribuição de partículas. De maneira geral os PCBN's podem ser divididos em duas categorias, segundo suas aplicações:

- PCBN's para usinagem de desbaste –  $a_p$  entre 0,5 e 8 mm
- PCBN's para usinagem de acabamento –  $a_p$  menor que 0,5 mm

Os PCBN para desbaste possuem maior concentração de nitreto cúbico de boro, cerca de 90% em volume, o que aumenta a ligação cristal com cristal e faz a sua tenacidade aumentar. Além disso, devido ao alto teor de CBN, estes materiais apresentam a maior dureza entre os PCBN's.

Os PCBN's indicados para o acabamento, são aqueles nos quais uma fase cerâmica é adicionada, de tal maneira que eles possuem menor tenacidade e dureza, mas melhor estabilidade química e térmica, já que em geral a cerâmica possui maior resistência à difusão que o CBN.

Um fator importante que deve ser levado em consideração na comparação entre ferramentas com alto e baixo teor de CBN é a sua condutividade térmica, pois nas operações de acabamento a geração de calor é muito alta. Uma ferramenta com maior teor de CBN tem maior condutividade térmica, o que faz com que o calor seja retirado da zona de corte sem causar o amolecimento necessário do material da peça ao seu redor, dificultando desta forma o corte. Já um material com menor teor de CBN e maior teor cerâmico, tem condutividade térmica menor e não retira muito calor da região de corte, o que possibilita um certo amolecimento da peça ao redor da região de corte e facilita a usinagem; Sorrel e MacCartney, (1986), citados por Matsumoto (1998).

### 2.1.1.1 Propriedades dos insertos de PCBN

- Resistência às reações químicas

Este material apresenta reduzida tendência de reagir com o ferro, quando comparado ao diamante, o que o torna capaz de usinar os aços. O nitreto de boro cúbico presente no

PCBN reage com o oxigênio em altas temperaturas, dando origem ao óxido de boro. Este, por sua vez, forma uma fina camada protetora que vem a impedir o prosseguimento da reação; Teixeira (2000).

Pelo fato de uma ferramenta de PCBN possuir dureza, tenacidade e condutividade térmica superior aos insertos cerâmicos, a mesma deve, quando utilizada na usinagem de aços endurecidos, resistir muito mais ao desgaste abrasivo, às trincas e quebras do que os materiais cerâmicos. Possui, porém, menor resistência a reações químicas com o ferro que os materiais cerâmicos, o que deve causar uma maior taxa de desgaste difusivo, principalmente o desgaste de cratera, na usinagem de aços endurecidos e também devido ao fato de que, apesar de duros, estes materiais não formam cavacos curtos (como será visto posteriormente), o que facilita a formação do desgaste de cratera; Costa (1993).

- **Resistência ao choque térmico**

Baseando-se nas propriedades térmicas, como coeficiente de expansão e condutividade térmica, supõe-se que as ferramentas de PCBN com maior teor de CBN são consideravelmente mais resistentes ao choque térmico, enquanto que para os insertos com altos teores cerâmicos (TiC ou TiN) como segunda fase, espera-se uma resistência inferior, pois a condutividade térmica é consideravelmente inferior, com um valor de aproximadamente 50% da condutividade térmica dos insertos com maior teor de CBN; Costa (1993).

- **Dureza**

A dureza dos insertos de PCBN é inferior ao do CBN monocristalino e varia de acordo com o conteúdo de CBN do inserto, conforme pode ser visto na Figura 2.1; Wise (1992), onde se observa que o aumento da dureza é diretamente proporcional ao aumento da porcentagem de CBN.

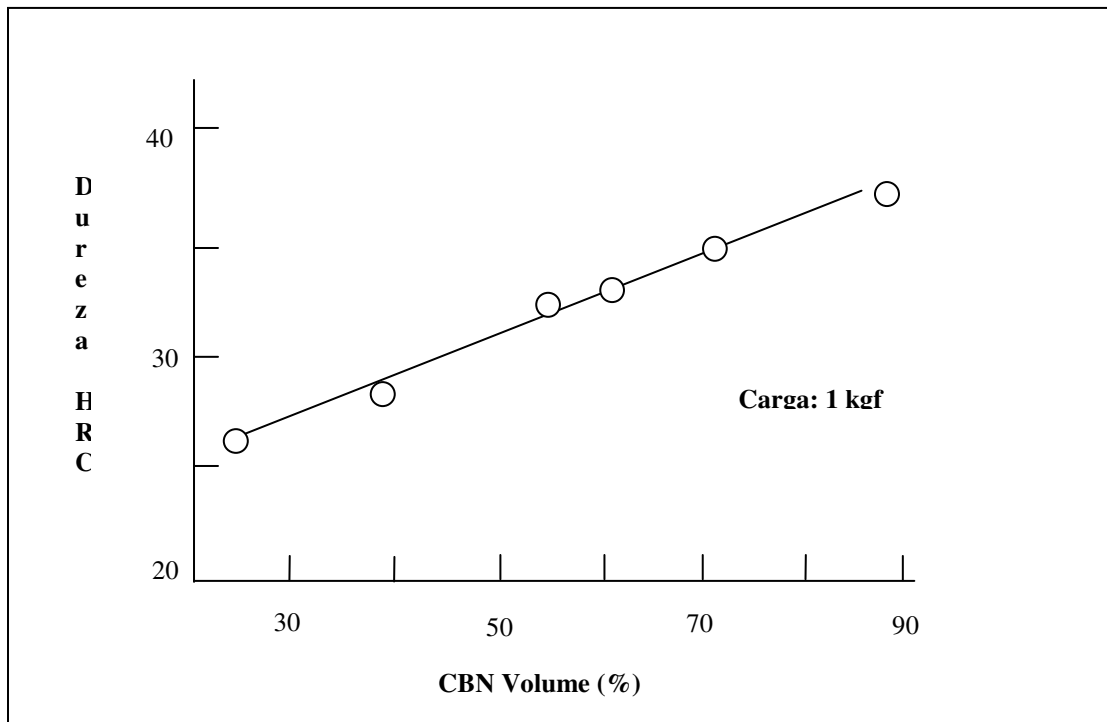


Figura 2.1- Variação da dureza com a porcentagem de CBN; Wise (1992), citado por Costa (1993).

- Tenacidade

A tenacidade, que pode ser relacionada à resistência ao choque, é determinada pelas partículas de CBN contidas no inserto. Isto porque, o caminho da trinca é transgranular. De uma maneira geral, a tenacidade à fratura do PCBN chega próximo ao do metal duro e é superior à das cerâmicas; Pipkin et al, (1987). Isto é bastante interessante, pois normalmente um material com maior dureza e maior resistência mecânica, apresenta menores valores de tenacidade. É de grande importância que uma ferramenta de usinagem alie dureza à quente, a frio e tenacidade.

### 2.1.1.2 Aplicações para os Insertos de PCBN

Geralmente utilizam-se as ferramentas de PCBN para a usinagem de aços endurecidos (45 – 65 HRC), inclusive em condições severas como corte interrompido, aços ferramenta,

aços rápidos, ligas ferrosas resistentes a altas temperaturas a base de cobalto, metais duros e revestimentos duros com altas porcentagens de carboneto de tungstênio ou Cr – Ni, aplicadas por soldagem de deposição ou jato de material liquefeito por chama.

De modo geral, as aplicações onde o PCBN é utilizado são aquelas, onde o diamante policristalino não pode ser utilizado e o metal duro não possui propriedades adequadas para realizar a tarefa, como por exemplo, a substituição do processo de retificação cilíndrica pelo processo de torneamento.

### 2.1.2 Ferramentas cerâmicas

O grupo de ferramentas composto por insertos confeccionados à base de materiais cerâmicos é formado por várias classes de insertos, os quais estão divididos em dois grandes grupos em função do material empregado como matriz – óxido de alumínio ou alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), conforme Figura 2.2. Dentro destes grupos, estes materiais diferem entre si de acordo com as suas características e propriedades, conforme será visto a seguir.

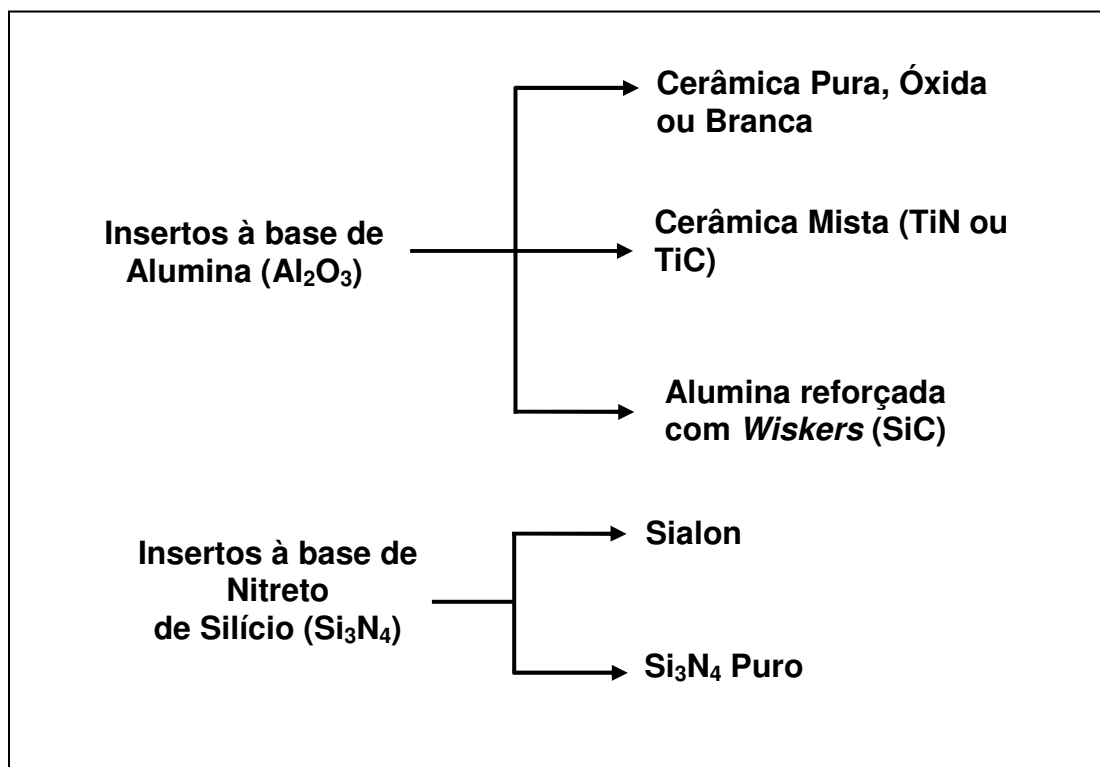


Figura 2.2- Divisão de materiais cerâmicos para ferramentas de corte, Sandvik (2002).

A cerâmica mista faz parte do grupo de ferramentas cerâmicas à base de alumina, contendo 25 a 40% de carboneto de titânio em volume, com uma segunda fase dispersa na matriz de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ ), conhecida também como cerâmica preta.

Outra composição, mais recente, contém aproximadamente 23% em peso de nitreto de titânio (TiN) mais TiC disperso na matriz de alumina, esse material é de cor marrom escuro e possui maior resistência à ruptura transversal, maior dureza e maior condutividade térmica que as demais cerâmicas, possuindo desta forma uma maior área de atuação.

A presença de TiC e TiN na matriz de alumina, permite que estas ferramentas sejam empregadas com velocidades de corte mais elevadas e menor risco de fratura súbita. Além disso, a cerâmica mista apresenta uma dureza à quente superior à de outras ferramentas à base de alumina, podendo ser utilizada na usinagem de aços temperados e ferros fundidos de elevada dureza. São as mais indicadas pelos fabricantes de ferramentas para o torneamento de aços endurecidos.

- Cerâmica pura, branca ou óxida

Trata-se de insertos de alumina reforçados com zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ), possui cor branca quando na sua fabricação é prensado a frio, ou cor cinza quando prensado à quente. Possui em sua composição, partículas de zircônia tetragonal dispersas em matriz de alumina, numa quantidade que pode variar de 10 a 40% (Jack,1986). Estas cerâmicas surgiram no mercado na década de 80, com o objetivo de expandir a faixa de aplicação das cerâmicas para a usinagem dos aços. Por tratar-se de material frágil, estes insertos devem ser utilizados com ângulo de saída negativo e aresta de corte chanfrada, objetivando-se melhorar a resistência à fratura. Devido à sua elevada resistência ao desgaste, é indicada para a usinagem de ferro fundido (cinzento, nodular e maleável). Em operações de acabamento, indica-se insertos com menores quantidades de zircônia, ao passo que para o desbaste são recomendadas pastilhas com maior teor de zircônia.



- Alumina reforçada com *whiskers* de SiC

Este tipo de inserto, possui em sua composição cerca de 20 a 40% em volume de carboneto de silício (SiC), na forma de cilindros monocristalinos, que têm diâmetro variando de 0,05 a 10  $\mu\text{m}$ . A finalidade destes cilindros monocristalinos de carboneto de silício, dispersos na matriz de alumina, é aumentar a tenacidade à fratura e a resistência ao choque térmico. Estas ferramentas possuem cor verde e são indicadas para a usinagem a altas velocidades (500m/min), de superligas à base de níquel e cobalto, ferro fundido endurecido e aços temperados, com durezas superiores a 45 HRC.

Este material não é indicado para a usinagem de aços de média e baixa dureza, devido às altas taxas de desgaste de cratera, provocado pela afinidade entre as fibras de SiC e os aços; Abrão et al. (1996).

- Sialon

O sialon é um inserto cerâmico à base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), possuindo excelentes propriedades em termos de dureza à quente e resistência ao choque térmico, porém é péssimo com relação à estabilidade química.

Devido a essa característica, é principalmente utilizado na usinagem do ferro fundido em desbaste, onde a dureza à quente, a resistência ao choque térmico e a tenacidade são fundamentais e também, onde o cavaco curto não tende a causar difusão na superfície de saída da ferramenta.

### 2.1.2.1 Propriedades dos insertos cerâmicos

- Resistência às reações químicas

Devido à incidência de altas temperaturas na interface cavaco–ferramenta e ferramenta–peça, o desgaste da ferramenta ocorre geralmente devido à difusão, mecanismo que normalmente não é observado em temperaturas inferiores. Para temperaturas mais baixas, o mecanismo de desgaste predominante, passa a ser a abrasão; Baldoni e Bujan (1988).

Neste aspecto, a alumina é o componente ideal para os insertos cerâmicos devido à sua inatividade química. Os insertos à base de nitreto de silício e a alumina reforçada com *whiskers* são os mais reativos com o cobalto e com o ferro. A reatividade do carboneto de silício com materiais ferrosos parece ser a razão pela qual os insertos de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$  possuem baixo desempenho nas aplicações em aços endurecidos, onde o desgaste predominante é o de cratera; Komanduri e Samanta (1989) e Costa (1993).

Pelo que foi exposto, pode-se dizer que os requisitos de um inserto cerâmico são exigências da aplicação em si. A aplicação do material da ferramenta depende do tipo de material a ser usinado, das condições de corte e das condições da máquina–ferramenta. A capacidade em atender a estes requisitos é função direta de suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e térmicas, e estas por sua vez são dependentes da composição química, da micro-estrutura e do processo de fabricação.

- Resistência ao choque térmico

Para os insertos cerâmicos, observa-se que a resistência ao choque térmico é inversamente proporcional ao coeficiente de expansão térmica e diretamente proporcional à condutividade térmica do material. Situações que envolvam alterações bruscas de temperatura como corte interrompido ou utilização interrupta de fluido refrigerante, pode causar fraturas nos insertos cerâmicos. Os insertos à base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) são os mais resistentes ao choque térmico, fato este, que se deve à sua boa condutividade térmica, e baixo coeficiente de expansão; Ezugwu e Wallbank (1987).

- Dureza

A dureza a frio da aresta de corte deve ser geralmente três vezes maior que a dureza da peça; Nakayama et al (1988). Portanto, para tornear aços cuja dureza seja superior a 60 HRC (aproximadamente 760 HV), seria necessário uma ferramenta com dureza superior a 2200 HV. Dos insertos cerâmicos anteriormente relacionados, os que apresentam maior dureza à temperatura ambiente são os insertos cerâmicos à base de alumina reforçada com *whiskers* (2000 HV) e a cerâmica mista (2200 HV). Porém, o fato de alguns insertos cerâmicos não apresentarem dureza ideal na temperatura ambiente, não deve ser considerado isoladamente, pois a dureza a quente do material da ferramenta e da peça, variam de acordo com o par, ferramenta – peça. Na Figura 2.3 é mostrada a variação da dureza com relação à temperatura para determinados materiais.

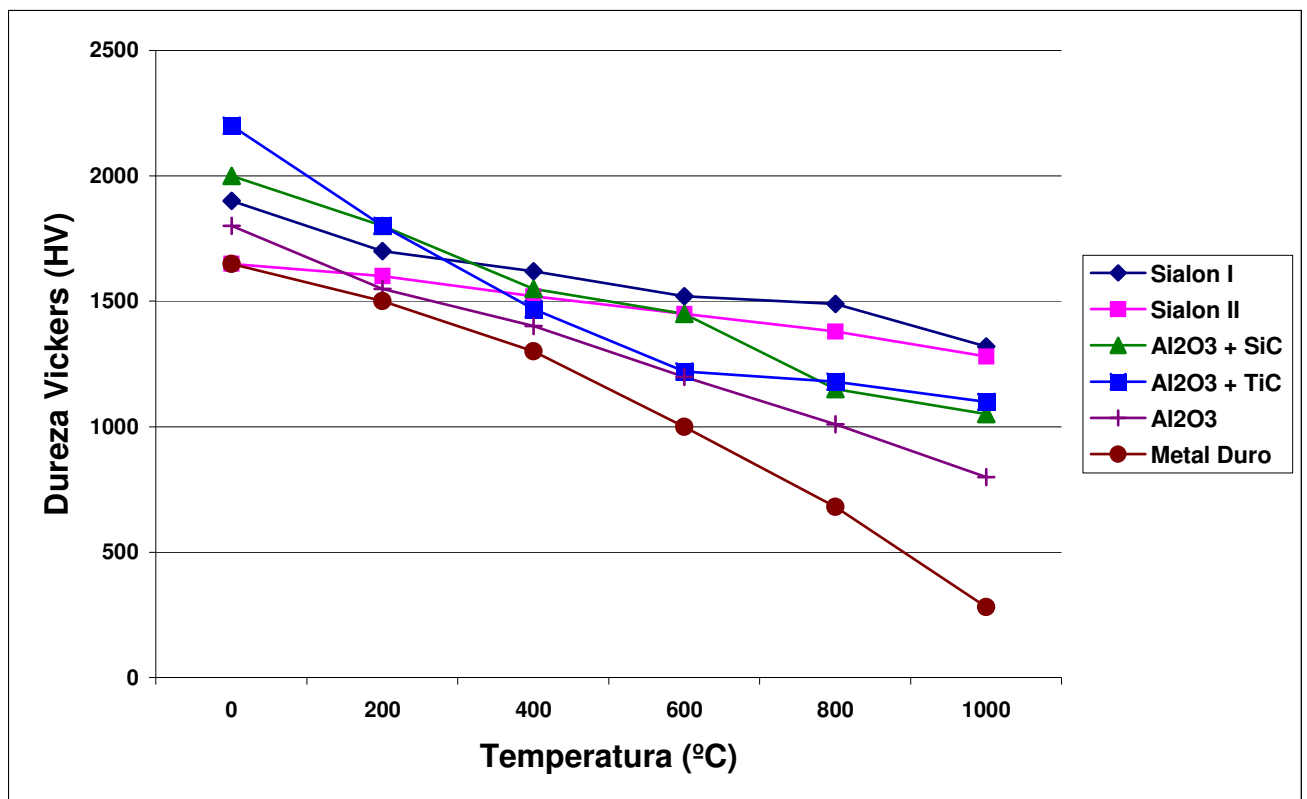


Figura 2.3- Valores da dureza com relação à temperatura para determinados materiais; Komanduri e Samanta (1989).

- Resistência mecânica

As cerâmicas geralmente falham devido à fratura frágil, apresentando uma deformação plástica reduzida antes da ruptura. A ruptura ocorre devido à propagação catastrófica de um defeito (trinca) quando sujeito a tensões suficientemente altas. Os inserts cerâmicos apresentam alta resistência à compressão, que varia muito pouco com relação à temperatura, conforme pode ser visto na Figura 2.4; Ezugwu e Wallbank (1987). Porém é pouco resistente ao choque. O metal duro, por exemplo, apresenta alta resistência à compressão, mas decai sensivelmente com o aumento da temperatura. Por outro lado, a resistência à tração dos materiais cerâmicos é muito baixa, razão pela qual recomenda-se a utilização de inserts com ângulo de saída negativo, visando tirar-se vantagem da alta resistência à compressão.

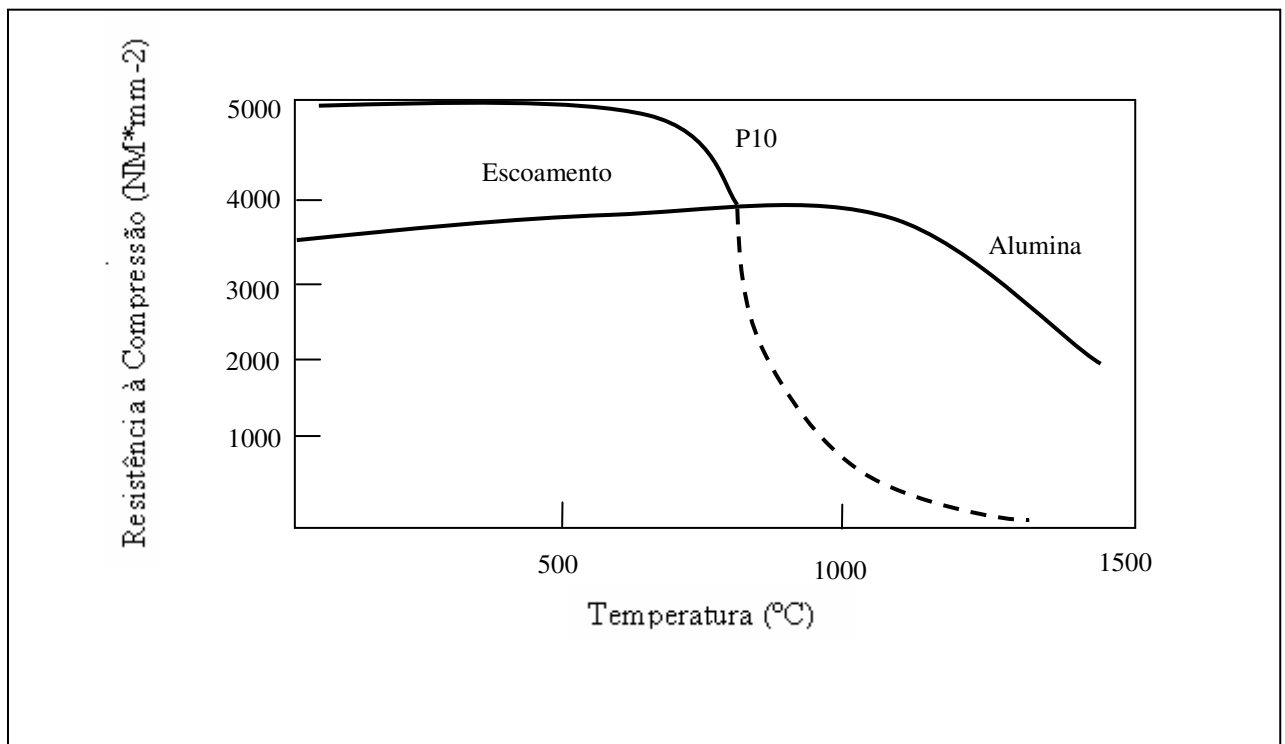


Figura 2.4- Variação da resistência à compressão com a temperatura para inserts de cerâmica (Alumina) e Metal Duro (P10); Ezugwu e Wallbank (1987).

### 2.1.2.2 Aplicações para os Insertos Cerâmicos

Atualmente a utilização de cerâmicos na usinagem de aços está restrita ao torneamento de aços de baixa liga ou endurecidos, sendo que, tanto as cerâmicas brancas como as mistas podem ser utilizadas. Em geral, à medida que a dureza da peça ou a velocidade de corte crescem, mais adequada é a utilização das cerâmicas mistas, que resistem melhor às tensões térmicas, e ao efeito combinado de alta temperatura e esforços de corte, quando comparadas às cerâmicas baseadas em óxidos. Razão pela qual são mais indicadas para o torneamento de aços endurecidos. Os cermets também são utilizados na usinagem de aços, porém, com menores velocidades de corte e principalmente para aços moles, devido a sua menor resistência ao desgaste; Abrão e Aspinwall (1996).

A usinagem de ligas de níquel resistentes ao calor é crítica devido ao elevado desgaste de entalhe gerado durante o corte. Para este tipo de desgaste, é recomendado um material que tenha baixa adesão ao cavaco e boa microtenacidade, já que o principal mecanismo de desgaste não é a abrasão, como nos casos de desgaste de flanco e cratera. Segundo Jack (1996), se forem levadas em consideração as principais características dos materiais, as cerâmicas a base de nitreto de silício, principalmente o sialon, são as que atingem maior sucesso na usinagem destes materiais. O  $Al_2O_3$  reforçado com whiskers também é utilizado com sucesso na usinagem das ligas de níquel resistentes ao calor.

As ferramentas cerâmicas também encontram larga aplicação na usinagem do ferro fundido em peças da indústria automobilística. As cerâmicas a base de  $Al_2O_3$  são recomendadas para a usinagem de fundidos de boa qualidade ou pré usinados, onde o risco de choques é menor ou a variação térmica causada pela variação da profundidade de usinagem é menor e, portanto, não se exige da ferramenta elevada tenacidade e resistência ao choque térmico.

### 2.1.3 Comparação entre ferramentas cerâmicas e PCBN

A Tabela 2.1 apresenta uma coletânea das propriedades dos insertos cerâmicos e de PCBN, baseada em diferentes fontes como Whitney e Vaidyanathan (1998); Komanduri e Samanta (1989) e Wise (1992), citados por Costa (1993).

Tabela 2.1- Comparação entre as propriedades de cerâmicas e o PCBN; Costa (1993).

	$Al_2O_3+ZrO_2$	$Al_2O_3+TiC$	$Al_2O_3+SiC_W$	SIALON	PCBN
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3,9	4,2	3,7	3,2	3,1
Dureza HV (20 °C)	1700	1900	2000	1600	4500
Tenacidade	5,0 a 8,0	3,5 a 4,5	4,5 a 8,0	4,5 a 6,0	10
Res. ruptura (MPa)	700 a 900	600 a 850	550 a 750	700 a 900	-----
Cond. Térm. (W/m°C)	8	12	32	23	100
Coef. Exp. Térmica	8,5	8	-----	3,2	5

A Tabela 2.2 apresenta uma comparação entre algumas propriedades dos materiais cerâmicos e do metal duro, citado por dezenas de estudiosos do assunto, onde essas propriedades recebem uma classificação de 1 (péssimo) a 5 (excelente), em valores absolutos.

Tabela 2.2- Comparação entre as propriedades de vários tipos de cerâmica e o metal duro; Diniz et al (1994).

	Tenacidade	Dureza a quente	Resistência ao choque térmico	Estabilidade química (Fe)	Estabilidade química (Ni)
Cerâmica Pura	2	2	1	5	5
Cerâmica Mista	1	3	2	4	4
Cerâmica + Wiskers	4	3	3	2	3
Sialon	3	5	4	1	2
Metal Duro	5	1	5	3	1

As propriedades relativas entre materiais cerâmicos e o metal duro, apresentadas pela Tabela 2.2, são descritas a seguir:

- A cerâmica pura ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é excelente com relação à estabilidade química, mas deixa a desejar no tocante a tenacidade e dureza a quente e é péssima com relação ao choque térmico. Devido a estas características, utiliza-se este material somente em operações de acabamento de peças endurecidas ou ferro fundido, pois nestas condições não é necessária elevada tenacidade, obtém-se elevadas temperaturas e a tendência ao desgaste por difusão é grande, necessitando-se elevada estabilidade química;
- O desempenho apresentado pela cerâmica mista denota melhor dureza a quente e estabilidade química, quando comparada à cerâmica pura. A tenacidade, no entanto, é péssima, tornando este material mais indicado para o torneamento de acabamento em aços endurecidos, onde é necessária tanto dureza à quente quanto estabilidade química. Por este tipo de operação constituir geralmente um acabamento fino, a tenacidade não é relevante;
- O sialon apresenta ótimo desempenho em termos de dureza à quente e resistência ao choque térmico e é bom com relação à tenacidade, porém é péssimo quanto à estabilidade química. Devido a estas características é utilizado principalmente na usinagem do ferro fundido, pois neste caso, o cavaco formado é curto e não tende a causar difusão na superfície de saída da ferramenta. Sua utilização ocorre principalmente em desbaste, onde a dureza a quente, resistência ao choque mecânico e tenacidade são fundamentais;
- A cerâmica reforçada com *wiskers* apresenta todas as suas propriedades num nível intermediário, devendo-se possivelmente a isto o fato de ser a ferramenta cerâmica menos utilizada.

### 2.1.4 Geometria das ferramentas cerâmicas e PCBN

- Ângulo de saída

Os insertos cerâmicos e de PCBN requerem alguns cuidados especiais quando da sua utilização, em virtude de possuírem baixa tenacidade quando comparados com o metal duro. O ângulo de saída necessita possuir valores negativos, pelo fato de esta geometria colocar a ponta da ferramenta sob a ação de forças de compressão, eliminando assim a formação de trincas devido à tração. Utiliza-se, quando possível, arestas de corte chanfradas (0,1 mm x 20° a 45°) a fim de direcionar os esforços de corte para o centro da ferramenta, reduzindo-se a possibilidade de quebra das arestas; Ezugwu e Wallbank (1987).

- Ângulo de folga

Este ângulo deve ser grande o suficiente, para reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça, porém não deve ser exagerado a ponto de enfraquecer a aresta de corte. Sua importância se torna relevante quando o desgaste predominante da ferramenta ocorre na superfície de folga; Ezugwu e Wallbank (1987).

- Ângulo de posição

Nos insertos cerâmicos, os fabricantes fornecem porta ferramentas para torneamentos internos e externos, com o ângulo variando entre 45° e 107°, sendo que o seu fator limitante é a geometria da peça; König e Wand (1987).



- **Ângulo de ponta**

Sempre que possível, deve utilizar-se ângulos de ponta grandes e insertos de geometria quadrada ou redonda, objetivando-se aumentar a robustez da ferramenta; König et al (1990). O ângulo de ponta, entretanto, depende do valor do ângulo de posição, tornando-o desta forma limitado pela geometria da peça.

## **2.2 Torneamento de Aços Endurecidos**

### **2.2.1 Forças de corte**

Quando da usinagem de materiais endurecidos, 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.

Iremos a seguir, comparar os resultados encontrados em alguns trabalhos, no tocante ao comportamento das forças de corte na usinagem de materiais endurecidos:

Segundo Abrão et al. (1995), na usinagem do aço ABNT 52100 (62 HRC) com ferramentas de PCBN e cerâmica mista, verificou-se que durante a operação de acabamento, a força passiva (radial) foi maior que as outras componentes de força, fato este, devido ao menor ângulo de posição ( $\chi_r$ ) causado pelo pequeno valor da profundidade de usinagem em relação ao valor do raio de ponta da ferramenta. Na operação de desbaste, a componente tangencial (força de corte) foi um pouco superior. As forças de corte tiveram um ligeiro

decrécimo com o aumento da velocidade de corte e aumentaram linearmente com o avanço e a profundidade de corte. A redução na força devido ao aumento da velocidade de corte foi minimizada pelo aumento no desgaste da ferramenta.

Nos trabalhos de Chao e Trigger (1995) e Matsumoto et al. (1987), verificou-se que as componentes da força de usinagem diminuem com o aumento da dureza do material a ser usinado, quando se utiliza ferramentas com ângulo de saída levemente negativo (0 a 5°), ao usinar-se aços com dureza variando entre 30 e 40 HRC.

Uma vez que as temperaturas de corte foram maiores para os aços mais duros, uma explicação pode ser dada pelo fato de as elevadas temperaturas na região de corte facilitarem o mesmo.

Para Nakayama et al. (1988), torneando-se um aço para rolamento em dois diferentes estados de tratamento térmico (recozido 23 HRC e temperado 62 HRC), observou-se que o valor da força de avanço foi superior ao da força de corte, nos dois casos, para um ângulo de saída variando de 0 a 60°.

Costa (1993), observou para o torneamento dos aços ABNT 52100 e M2 no estado temperado, com ferramentas de PCBN e cerâmica mista, que a força de corte e a força de avanço aumentaram com o aumento do avanço, enquanto a velocidade de corte não teve influência sobre as componentes da força de usinagem. Quanto ao efeito da dureza do material da peça, não se verificou nenhuma diferença acentuada, porém, isto é creditado a problemas ocorridos nos ensaios realizados. A potência de corte monitorada através da corrente do motor principal da máquina, apresentou uma variação muito pequena, provavelmente porque a deterioração da ferramenta foi muito pequena.

Para Chao e Tigger (1995); Matsumoto et al., (1987) e Nakayama et al., (1988); o valor da força de corte é superior ao da força de avanço, para aços com dureza variando entre 30 e 45 HRC, sendo as demais condições de corte constantes.

## 2.2.2 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 aços endurecidos 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.

## 2.2.3 Deterioração da ferramenta

Segundo Costa (1993), durante a usinagem dos aços ABNT M2 e 52100, ambos com dureza de 60 HRC, verificou-se que apesar da mesma dureza, tiveram influências diferentes sobre a deterioração dos insertos de PCBN e praticamente não conseguiu-se toronar o aço M2 com avanço igual ou superior a 0,2 mm/v, velocidade de corte entre 60 e 100 m/min e profundidade de usinagem igual 1,0 mm, usando-se insertos de cerâmica mista ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ ) e de PCBN.

Outros tipos de deterioração, como trincas, lascamentos e quebras, podem surgir durante o torneamento de aços endurecidos, decorrentes na maioria das vezes, das condições da

operação, que incluem rigidez da máquina, resistência da ferramenta, presença de corte interrompido, irregularidades na peça etc.

O desgaste das ferramentas de PCBN ocorre devido ao desgaste químico causado por interações com o meio ambiente (incluindo oxidação atmosférica), da formação de uma camada protetora a altas temperaturas e da remoção desta camada por cavacos a baixas velocidades de corte, conduzindo ao atrito e ao desgaste por difusão.

O melhor desempenho quanto ao desgaste dos PCBN com menores teores de CBN nas operações de acabamento, se deve à condutividade térmica mais baixa, que produz temperaturas de corte mais altas na interface ferramenta-peça e à formação de uma camada protetora. A presença de uma camada substancial de TiC também proporciona uma destacada resistência quanto ao desgaste por cratera. Geralmente é necessária a presença de um ou mais dos carbetos, como por exemplo, o TiC, para a formação de uma película protetora (Naylon et al, 1976). O melhor desempenho das ferramentas de baixo teor de CBN nas operações de acabamento deve-se ao fato de a restrição ao fluxo de calor na zona de corte, “amolecer” o material da peça, auxiliando o cisalhamento; Bosson (1991).

Uma explicação para estes dados obtidos é a existência de dois grupos de materiais endurecidos, independentes do valor da dureza, que devem ser distinguidos e que influenciam diferentemente sobre a deterioração da ferramenta:

- Materiais ferrosos endurecidos por transformação martensítica;
- Materiais ferrosos endurecidos por precipitação de carbonetos.

A Figura 2.5 mostra como varia a dureza (HV) em função do aumento da temperatura, para diferentes materiais de ferramenta. Pode-se observar na Figura 2.5 que a dureza, tanto a quente quanto a frio, dos insertos de PCBN é superior à dos insertos cerâmicos comerciais.

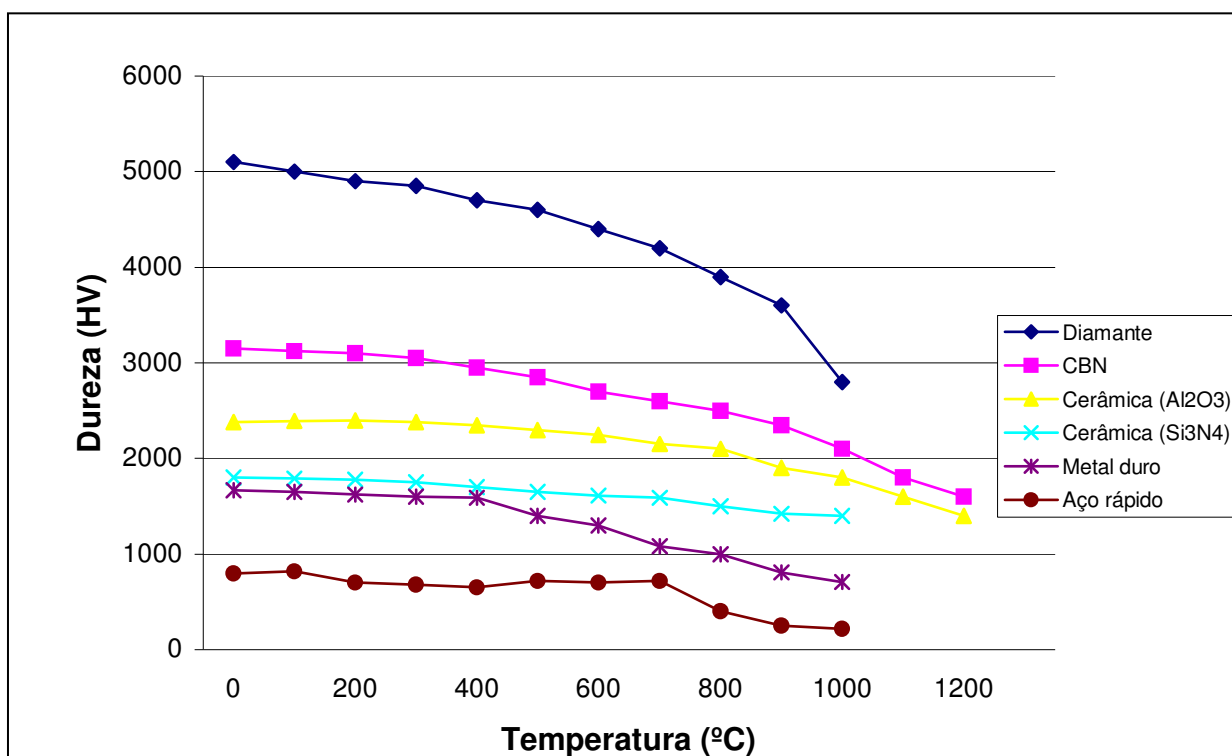


Figura 2.5- Variação da dureza com a temperatura para diferentes materiais de insertos; Boehs (1987).

Os aços cementados são os representantes típicos do primeiro grupo. Nestes aços, a alta temperatura gerada durante o corte deforma a matriz como um todo e o mecanismo de desgaste predominante passa a ser, dependendo do material da ferramenta, a difusão.

A difusão irá ocorrer, principalmente, onde as temperaturas mais altas são geradas, ou seja, na região de contato cavaco-ferramenta, sendo o desgaste de cratera preponderante. Já os materiais do segundo grupo, têm grande concentração de carbonetos distribuídos na matriz. Durante o corte, a alta temperatura gerada deforma a matriz, mantendo os carbonetos intactos. A agressividade dos carbonetos é, dessa forma, mantida. Neste caso, o mecanismo de desgaste por abrasão, passa a ser bastante significativo; König et al. (1984).

## 2.3 Características da Superfície Usinada

### 2.3.1 Rugosidade superficial

A rugosidade superficial é caracterizada pela forma como é feita sua medição. No Brasil, foi adotado pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, o sistema da “Linha Média” (M). Este é o sistema mais utilizado em todo o mundo. No sistema “M” todas grandezas de medição são definidas a partir de uma linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, linha esta que é a média entre os picos e reentrâncias de irregularidades. Os sistemas de medição baseados na linha média são divididos em três classes:

- Fundamentados na medida da profundidade da rugosidade;
- Fundamentados em medidas horizontais;
- Fundamentados em medidas proporcionais.

Serão vistos neste trabalho somente os sistemas fundamentados na medida da profundidade da rugosidade, por ser este o critério de medição de rugosidade dos corpos de prova usinados neste trabalho. Este sistema está dividido em cinco parâmetros, os quais serão descritos a seguir.

- **Desvio médio aritmético (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 Figura 2.6 mostra como é feito o cálculo de Ra.

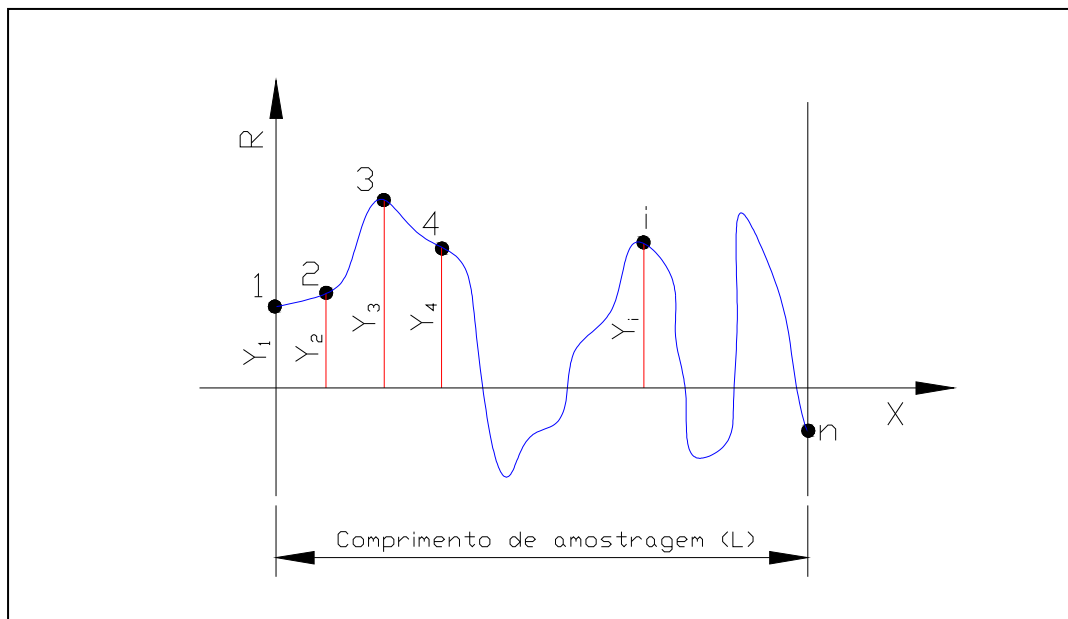


Figura 2.6- Desvio médio aritmético  $R_a$ ; Agostinho, et. al. (1990).

Onde:

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

- Desvio médio quadrático ( $R_q$ )

Defini-se como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média em um comprimento de amostragem. Seu valor é cerca de 11 % maior que o valor medido em  $R_a$ , pois a elevação ao quadrado amplifica o efeito das irregularidades. É calculado pela seguinte fórmula:

$$R_q = \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right)}$$

- Altura das irregularidades dos 10 pontos ( $R_z$ )

É definida pela diferença entre o valor médio dos cinco maiores picos de irregularidades e as cinco maiores reentrâncias de irregularidades, medidas a partir de uma linha paralela a linha média e no comprimento de amostragem, conforme mostrado na Figura 2.7.

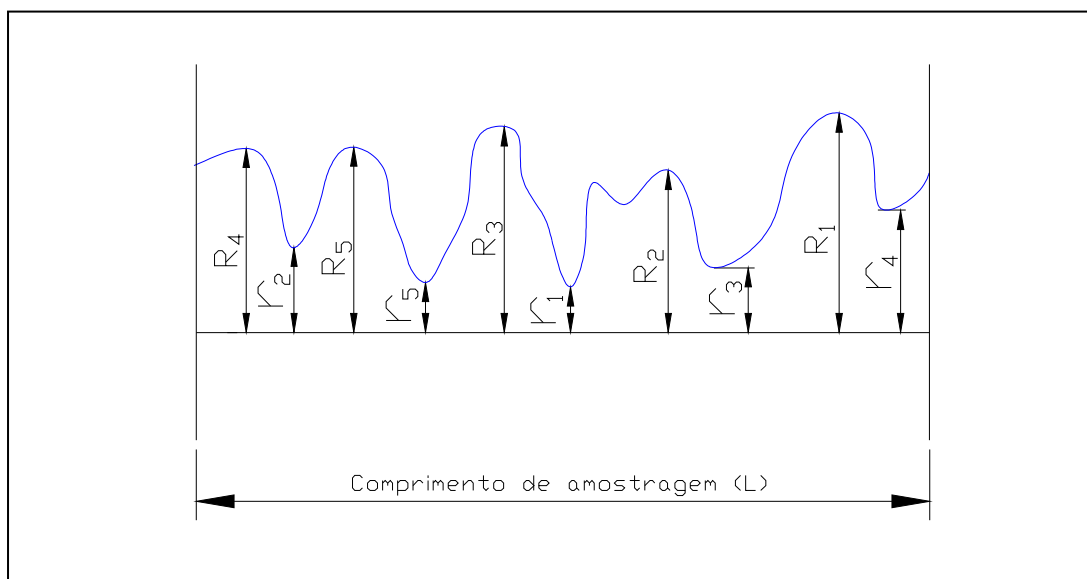


Figura 2.7- Altura das irregularidades dos 10 pontos “ $R_z$ ”; Agostinho, et. al. (1990).

Onde:

$$R_z = \frac{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5)}{5} - \frac{(r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5)}{5}$$

- Altura máxima das irregularidades ( $R_{max}$ )

Defini-se como a distância entre o maior pico de irregularidade e a maior reentrância de irregularidade medida no comprimento de amostragem. Para tal medição são utilizados aparelhos traçadores de perfil. A Figura 2.8 mostra como é realizada a medição em  $R_{max}$ .



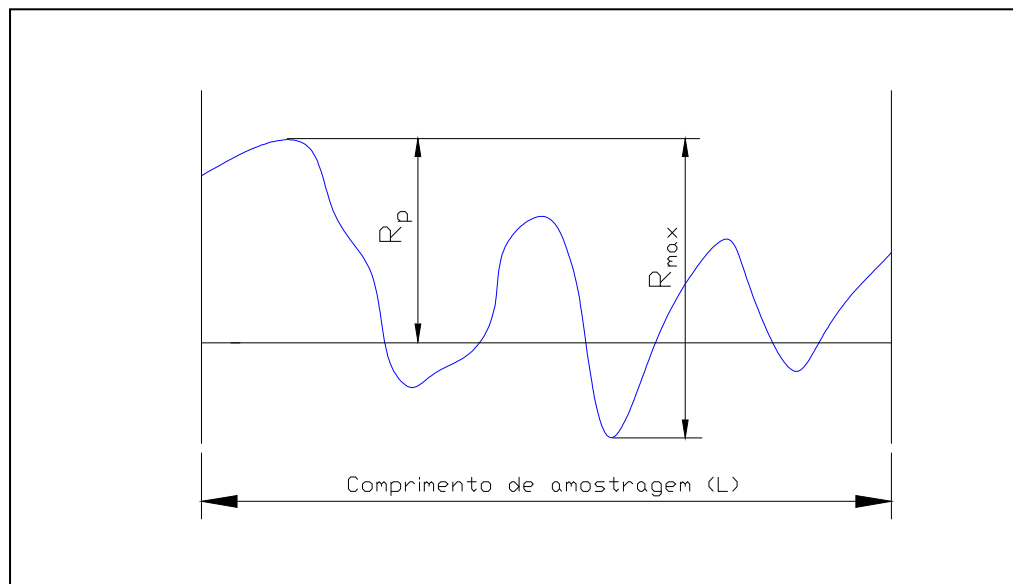


Figura 2.8- Altura máxima das irregularidades “ $R_{max}$ ” e profundidade média “ $R_p$ ”; Agostinho, et. al. (1990).

- Profundidade média ( $R_p$ )

É a ordenada do maior pico de irregularidade com a linha média, no comprimento de amostragem, conforme mostrado na Figura 2.8 (Agostinho, et. al., 1990). Em se tratando de torneamento de aços endurecidos, os dois principais fatores que influenciam na rugosidade da peça são o valor do raio de ponta da ferramenta “ $r_e$ ” e o avanço de corte “ $f$ ” (Shaw, 1986). A fórmula que é citada por vários autores:  $R_{max\ te\acute{o}rico} = f^2 / 8 r_e$ , onde  $f$  é o avanço de corte e  $r_e$  o raio de ponta da ferramenta de corte; significa o menor valor possível de  $R_{max}$  que se pode obter, cujo valor real (medido) é quase sempre maior e pode superar absurdamente o valor teórico. Essa divergência entre o valor teórico e real se deve a rigidez do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação da peça (vibrações), deformação do cavaco e fluxo lateral do cavaco. Nem sempre o ganho que se tem quando é aumentado o raio de ponta da ferramenta de corte (contribuição geométrica) se traduz em um melhor acabamento superficial da peça, pois ao aumentar o valor do raio de ponta da ferramenta também se aumenta às vibrações de todo o sistema; Diniz e Noritomi (2002) e Sata (1985).

Um estudo realizado sobre a influência dos parâmetros de corte na rugosidade dos corpos de prova do aço liga ABNT 4340, torneados com ferramentas de corte de metal duro, recoberta com nitreto de titânio (classe GC 435), cuja geometria escolhida foi ISSO TNMG 160404-61, revelou, segundo Diniz e Noritomi (2002), que:

- Com o aumento do avanço, a rugosidade permaneceu praticamente constante, sendo que para valores de avanço mais altos a rugosidade real foi menor que a teórica;
- Em geral a profundidade de usinagem teve pouca influência sobre os valores de rugosidade, porém notou-se para o caso específico experimentado, que a partir de uma profundidade de usinagem de 0,8 mm a rugosidade decresceu, o que é explicado pelo fato da diminuição da força passiva. A diminuição desta força está ligada à porção reta da aresta de corte da ferramenta que fica em contato com a peça, ou seja, a partir do momento em que não só o raio de ponta da ferramenta teve contato com a peça, a força caiu e conseqüentemente também os níveis de vibração;
- Com o aumento da velocidade de corte, o valor da rugosidade diminuiu.

Lima et al (2000) realizou um trabalho na empresa EATON (Valinhos-SP), em torneamento de engrenagens com 58-63 HRC de dureza. Para tal operação de acabamento foram utilizados insertos de CBN classe 7020 (Sandvik), com as seguintes geometrias: CNGA 120408S1020 e CNGA 120412S1020. Os parâmetros adotados foram  $V_c=165$  m/min.,  $f = 0,08$  mm/volta e  $a_p = 0,05$  mm e o critério de fim de vida da ferramenta de corte foi  $R_a$  de 0,4 mm (exigência de projeto da peça). Especificamente nesse estudo, quando comparados os resultados obtidos com ferramentas com raios de ponta de 1,2 e 0,8 mm, para uma mesma velocidade de corte adotada no acabamento, conseguiu-se usinar uma maior quantidade de peças com  $R_a$  igual ou menor a 0,4 mm, ao se adotar a ferramenta com raio de ponta de 1,2 mm (Lima et. al., 2000; Donnangelo et al.,2001).

## 2.4 Refrigeração no Torneamento Duro

Atualmente, com as possibilidades advindas do surgimento de novos materiais para ferramentas, aliado ao fato da crescente severidade da legislação ambiental quanto aos descartes industriais e os custos referentes aos fluidos de corte, a indústria tem buscado novas soluções produtivas, sendo uma delas a usinagem a seco, onde os fluidos de corte são eliminados do processo. Obviamente, a não utilização de fluidos de corte retira da usinagem os seus benefícios, que são a lubrificação, a refrigeração e a remoção de cavacos gerados no processo de torneamento. Entretanto, em estudos recentes foi analisado o comportamento de ferramentas de corte, bem como o acabamento superficial de peças usinadas sob diferentes condições de refrigeração, inclusive a seco. O referido trabalho, que será visto no item 2.7 da presente dissertação, acena com resultados muito satisfatórios para o torneamento de aços endurecidos a seco.

Conclui-se portanto, que a condição de usinagem a seco é a mais interessante para o propósito deste trabalho, devido ao fato de apresentar resultados satisfatórios para a vida da ferramenta, com excelentes valores de rugosidade superficial, aliados ao fato de evitar-se os problemas decorrentes de aquisição, manuseio e descarte de fluidos lubrificantes / refrigerantes.

## 2.5 Desgaste e Vida das Ferramentas de Corte

Diversos são os tipos de desgastes que acontecem em uma ferramenta de usinagem; o fim da vida de uma ferramenta de corte, geralmente é causado pelo aumento dos desgastes que nela atuam, progredindo em alguns casos para avarias mais graves. Um dos tópicos de usinagem que mais se estuda e o de maior importância, pois é ele que define a interrupção do processo, é o tempo de vida da ferramenta. Para o melhor entendimento desse fenômeno serão apresentados os principais tipos de desgaste e suas respectivas áreas de incidência, seus mecanismos causadores e as avarias sofridas pelas ferramentas de corte.

### 2.5.1 Desgastes em ferramentas de corte e suas áreas de incidência

Os principais desgastes sofridos pelas ferramentas de corte são de entalhe, frontal ou de flanco e de cratera, os quais são descritos a seguir.

- **Desgaste de entalhe:** pode ocorrer tanto na interface das extremidades do contato cavaco-ferramenta na superfície de saída da ferramenta, como do contato ferramenta-peça na superfície de folga da ferramenta. Ele ocorre juntamente com o desgaste de cratera e flanco e é caracterizado por sulcos profundos que geralmente são provocados principalmente pelo mecanismo de desgaste de oxidação;
- **Desgaste de flanco:** esse tipo de desgaste é o mais comum, ocorre na superfície de folga da ferramenta e é causado pelo atrito entre a ferramenta e a peça (por exemplo: desgaste por abrasão). O limite máximo permitido desse desgaste está ligado ao acabamento superficial desejado para a peça, pois quanto maior o seu valor médio ( $VB_B$ ) maior será a deterioração da aresta de corte. Com isso piores serão o acabamento superficial, a tolerância dimensional e os desvios de circularidade da peça;
- **Desgaste de cratera:** acontece na superfície de saída da ferramenta e é ocasionado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco, sendo exemplos os desgastes por difusão, oxidação e adesão. Há certos casos em que a taxa de desgaste de cratera é baixa, um exemplo claro disto é quando são gerados cavacos curtos, porém quando ocorre o contrário deve-se ter cuidado, pois seu aumento pode provocar a quebra da ferramenta.

### 2.5.2 Mecanismos causadores dos desgastes

- **Aderência**

Devido às altas temperaturas geradas e elevadas cargas desenvolvidas durante a

usinagem, ocorrem aderências entre a ferramenta, o cavaco e a peça que está sendo usinada. O desgaste por adesão pode ser reduzido pela fragilização do maior número possível de aderências, através do recobrimento ou melhor acabamento possível da superfície da ferramenta de corte ou ainda, se for o caso, pelo uso de fluido de corte com características lubrificantes; Bas (2001) e Diniz e Noritomi (2002).

- **Abrasão mecânica**

É uma das principais causas de desgaste das ferramentas de corte, sendo mais atuante no desgaste de flanco devido ao atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, mas também atua no desgaste de cratera (atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta). É influenciado pelas altas temperaturas que ocasionam a queda da dureza da ferramenta, e pelo nível de partículas duras do material usinado, partículas estas que geralmente são formadas por alumina, carbonetos, carbonitreto, silicatos e outros. Por isso, é importante a escolha de uma classe de ferramenta com excelente dureza a quente para usinagem de materiais com alto teor de partículas duras; Bas (2001), Diniz e Noritomi (2002), Cupini e Ferreira (1993) e Obtani e Yokogawa (1988).

- **Difusão**

Consiste basicamente na transferência de átomos de um material para outro, nesse caso especificamente entre o cavaco e a ferramenta de corte. Este fenômeno é ativado pelas altas temperaturas alcançadas na interface cavaco-ferramenta e sua intensidade depende da afinidade química desses dois materiais. É o principal agente do desgaste de cratera sob altas velocidades de corte. Ao escolher uma determinada ferramenta deve-se verificar o grau de estabilidade química dela em relação ao material a ser usinado; Diniz e Noritomi (2002) e Klimenko, et. al. (1992).

- Oxidação

A oxidação ocorre em altas temperaturas, quando o material da ferramenta de corte tem afinidade química com o oxigênio que está no ar ou na água contida no fluido de corte quando este é utilizado, propiciando assim reações químicas que formam óxidos de baixa resistência ao desgaste. É um dos causadores do desgaste de entalhe devido ao contato do ar nas extremidades da interface cavaco-ferramenta. O que se pode fazer para amenizar tal situação é usar isolamentos inertes nas ferramentas de corte e/ou limitar a temperatura da interface, utilizando para isto fluido de corte e/ou diminuindo a velocidade de corte; Bas (2001). A Figura 2.9 mostra a ocorrência dos mecanismos de desgaste no desgaste da ferramenta em função da velocidade / temperatura de corte.

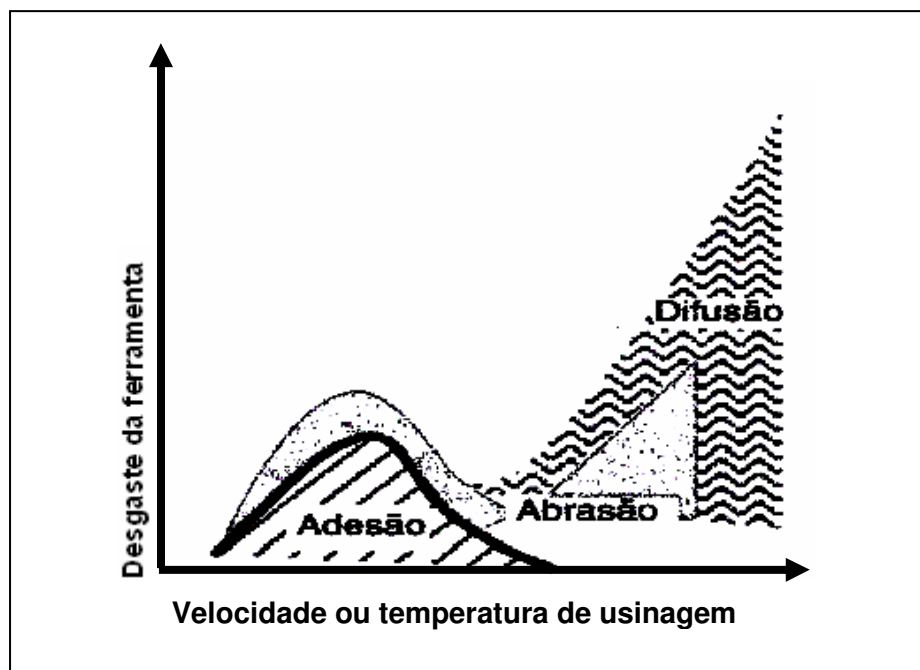


Figura 2.9- Influencia da temperatura e / ou velocidade de corte nos desgastes das ferramentas; Bas (2001).

### 2.5.3 Avarias das ferramentas de corte

Além dos desgastes já mencionados, as ferramentas de corte também sofrem avarias. Estas avarias podem ser provocadas pelos próprios desgastes ou ainda por inúmeras outras causas, como choques térmicos e / ou mecânicos, defeitos micro-estruturais das ferramentas, força de corte excessiva etc. As avarias podem causar muitos prejuízos em um processo de usinagem, pois às vezes não dão sinal que vão acontecer ou que estão acontecendo, como por exemplo, a quebra súbita da aresta de corte da ferramenta (conhecida como falha catastrófica). Além de provocar prejuízos para a ferramenta e tempo de máquina parada, as mesmas podem também provocar a inutilização da peça que está sendo usinada.

As Figuras 2.10 (a e b), mostram dois tipos de deformação plástica que ocorre na ponta da ferramenta (aresta de corte). São provocadas pela alta pressão aplicada à ponta da ferramenta em temperaturas elevadas. Seu aumento, além de causar imperfeições superficiais na peça usinada, pode provocar a quebra da aresta de corte. Quando há tendência de ocorrer essa avaria, deve-se escolher uma classe de ferramenta que tenha maior resistência à deformação plástica e maior dureza à quente.

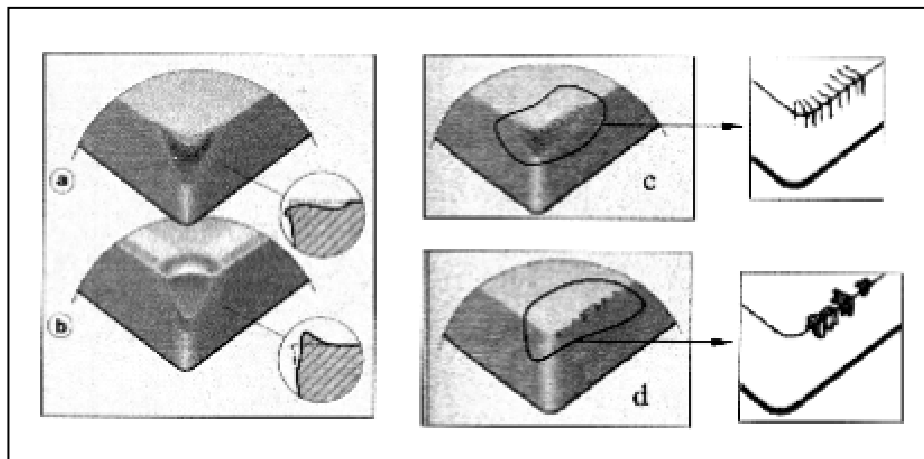


Figura 2.10- Avarias das ferramentas de corte, Sandvik (2000).

A Figura 2.10 (c), ilustra a disposição das trincas térmicas sobre a aresta de corte (perpendiculares à aresta de corte). Estas trincas são provocadas pela variação de temperatura. O crescimento das mesmas provoca a falha catastrófica. Um meio de amenizar-se esse

problema é evitar a variação de temperatura e escolher uma classe de ferramenta mais tenaz e de melhor resistência ao choque térmico. Finalizando, a Figura 2.10 (d), destaca o lascamento, que é a retirada de grandes partículas do material da ferramenta de uma só vez (o contrário dos desgastes de flanco e cratera). Seu aumento também provoca a quebra da ferramenta; para diminuir tal avaria aconselha-se usar classes com maior tenacidade e com geometria mais robusta.

O processo de usinagem é muito complexo, pois existem várias combinações de parâmetros para várias situações, onde ocorre desgastes e avarias diferentes para cada classe de ferramenta usada na usinagem de diferentes materiais, devido a isso o conhecimento do conjunto de todas variáveis do processo de usinagem é importante para se evitar a falha catastrófica da ferramenta, como pode ser visto na ilustração da Figura 2.11 (b). Na Figura 2.11 (a), é mostrada uma trinca de origem mecânica. A mesma origina-se paralelamente a aresta de corte, devido à variação de grandes esforços (ex: corte interrompido em desbaste). Para evitar que isto ocorra deve-se escolher uma classe de ferramenta mais tenaz, evitar o contato brusco da ferramenta na peça e diminuir avanço.

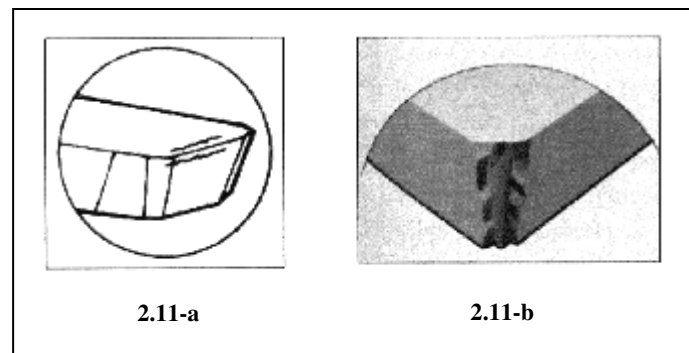


Figura 2.11- Trinca e quebra de origem mecânica na aresta de corte, Sandvik (2000).

## 2.6 Torneamento Duro Versus Retificação Cilíndrica

Em muitos trabalhos sobre usinagem de materiais endurecidos, é observada uma preocupação crescente da utilização deste processo em substituição ao processo de retificação.



Muitas são as razões de ser desta preocupação, como podemos compreender ao analisarmos as vantagens citadas a seguir.

1. Possibilidade de eliminar etapas de fabricação;
2. Maior produtividade;
3. Máquina-ferramenta mais simples e de menor custo;
4. Possibilidade de operações múltiplas em uma só fixação da peça;
5. Flexibilização do processo;
6. Menor custo das ferramentas de corte;
7. Superfícies da peça menos afetadas pelo calor.

Para este tipo de torneamento, geralmente são utilizados tornos de alta rigidez e grande potência. Na indústria, o torneamento de material endurecido tem substituído a retificação, especialmente na produção seriada de peças de transmissão. A superior flexibilidade do torneamento somente passou a ser aproveitada, com a utilização de materiais de corte adequados, como por exemplo, as cerâmicas mistas e os nitretos cúbicos de boro, juntamente com máquinas-ferramenta rígidas, e respectivos dispositivos de fixação. Para o torneamento de material endurecido sem corte interrompido, as cerâmicas mistas representam uma alternativa econômica para os materiais de corte de CBN.

Como exemplo disto, podemos citar o torneamento a seco de um pinhão de engrenagem, confeccionado em material 20MnCr5 com dureza na faixa de 60 a 62 HRC, com pastilhas de cerâmica mista e posteriormente com pastilhas de CBN. Os custos por aresta das ferramentas cerâmicas totalizaram apenas 12% dos custos por gume de corte das ferramentas de CBN. A usinagem pode ser realizada a seco ou com fluido refrigerante, sem prejudicar a produtividade; Santos Jr. et al (2001).

Em comparação com a retificação, no torneamento de material endurecido os custos por peça podem ser reduzidos em mais de 60%. O investimento menor exigido para um torno, o tempo de usinagem mais curto e a maior flexibilidade favorecem o torneamento de material endurecido; Kress (2001).

Segundo Donnangelo et al (2001), pode-se comparar a operação de retificação e de torneamento de materiais endurecidos, tanto nos quesitos técnicos quanto no cenário de manufatura atual. Em ambos, notamos que os ganhos do torneamento são significativos. Um

exemplo disso foi analisado para a usinagem de engrenagens de furo liso em material endurecido, no trabalho acima citado, de autoria de Donnangelo, Giorgetti e Santos (2000).

Dada a geometria normalmente empregada nesse tipo de peça, pode-se pensar em cerca de quatro operações de retificação para deixar a peça dentro das apertadas tolerâncias dimensionais, de forma e posição. Sem dúvida, pensa-se em uma operação de retificação interna, duas operações para retificar as faces do cubo da engrenagem e uma quarta operação para retificar o cone de engate. Este aglomerado de operações de retificação nos leva a pensar em dois aspectos distintos, porém muito importantes. Um deles é de ordem estritamente técnica e dimensional, ou seja, é o acúmulo de tolerâncias e amarrações de medidas entre essas operações de retificação, de forma a atender todos os requisitos do produto.

No aspecto técnico, quando substituímos as operações de retificação pelo torneamento, há um ganho significativo de qualidade, devido ao fato de realizarem-se todas as operações sob uma mesma fixação. Todas as dimensões e os desvios de forma e de posição foram tomados em relação ao diâmetro primitivo da engrenagem e conseqüentemente, a níveis menores do que os verificados nas operações de retificação. Uma vez que todas as operações estavam agrupadas em uma mesma máquina, pôde-se ter um maior controle estatístico sobre as variações de processo introduzidas nas engrenagens, decorrentes das variações de máquina.

O segundo, porém não menos importante aspecto, que está voltado para o cenário de manufatura atual, é a necessidade de reações mais rápidas às alterações de produto no mercado e às constantes exigências de se possuir processos de usinagem cada vez mais flexíveis e que não agridam o meio ambiente. Podemos verificar na Figura 2.12, uma comparação entre os processos de retificação convencional e torneamento de engrenagens de baixo carbono cementadas a uma dureza de 58 a 62 HRC, no tocante ao tempo de set-up de máquina, tempo de usinagem e custo do ferramental de fixação para a usinagem, sendo que em todos os tópicos analisados, observa-se uma enorme vantagem para o processo de torneamento em relação à retificação.

Analisando ambas sob a óptica da manufatura, pôde-se eliminar uma série de inconvenientes decorrentes das operações de retificação e introduzir novos projetos na fábrica em um menor tempo e a um custo significativamente menor.

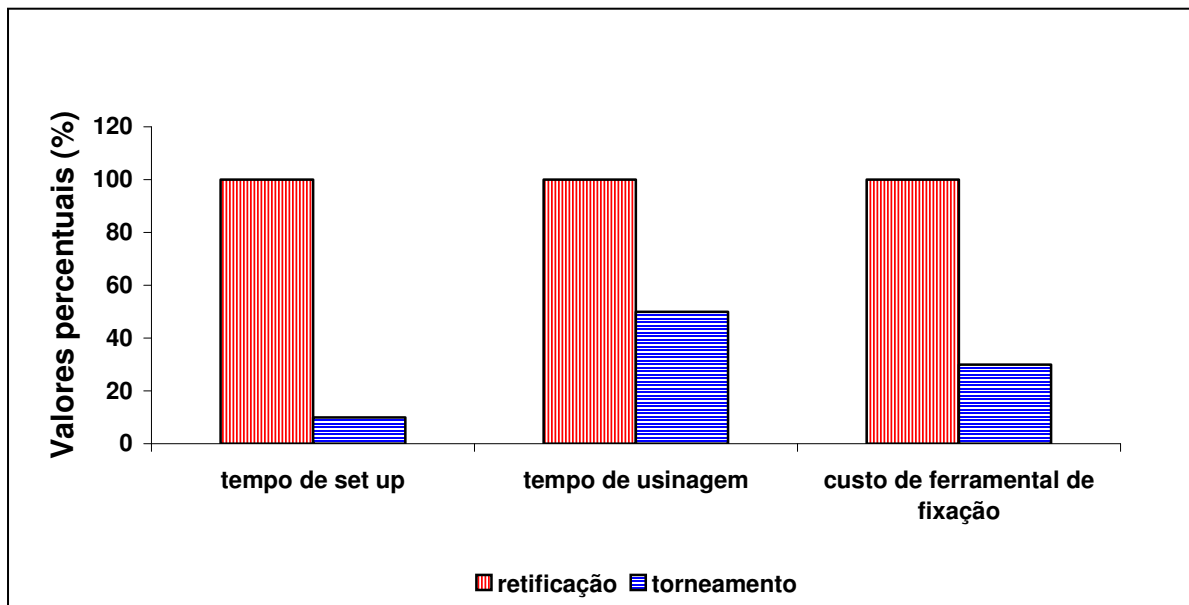


Figura 2.12- Comparação entre os processos de torneamento e retificação, Donnangelo et al (2001).

## 2.7 Vida de Ferramentas

Serão apresentados neste item alguns trabalhos sobre vida de ferramentas e acabamento superficial na usinagem de aços endurecidos, com ênfase especial para o desgaste das ferramentas de corte.

### 2.7.1 Desgaste de ferramentas de cerâmica mista e PCBN com geometria alisadora e convencional

Salles (2004), realizou experimentos de torneamento do aço ASTM 300M, em seu estado temperado e revenido, com dureza média de 50 HRC; neste trabalho foram testadas ferramentas cerâmicas mistas ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ ) classe Sandvik Coromant CC 650 com geometrias convencional – ISO CNGA 120408 T01020 e alisadora – ISO CNGA 120408 T01020WG e ferramentas de CBN (CBN + TiC) classe Sandvik Coromant CB 7020 com geometria convencional - ISO CNGA 120408 S01020A e alisadora - ISO CNGA 120408

T01020AWH. Foram traçadas as curvas de rugosidade em função do avanço de usinagem, para um critério de fim de vida de rugosidade  $R_a \leq 0,60 \mu\text{m}$ , conforme Figura 2.13 e também foram levantados os gráficos do número de peças usinadas para cada condição de usinagem e geometria das ferramentas, conforme Figuras 2.14 e 2.15.

A diferença de rugosidade entre as peças usinadas com ferramentas de geometria alisadora e convencional é extremamente alta, principalmente com avanços maiores. Ao analisarmos o comportamento da rugosidade ( $R_a$ ) na Figura 2.13, nota-se que para a ferramenta de geometria alisadora os valores praticamente se mantiveram constantes até o avanço de 0,3 mm/v, sendo que a partir desse ponto verificou-se uma tendência ascendente da rugosidade. Para os corpos de prova usinados com ferramenta convencional, os valores de rugosidade são diretamente proporcionais ao aumento do avanço, numa escala bastante ascendente até 0,30 mm/v. Como visto, com a ferramenta de raio de ponta convencional, somente conseguiu-se acabamento comparável com o de retificação (rugosidade  $R_a$  máxima de 0,60  $\mu\text{m}$ ), segundo Diniz e Matsumoto (1999), para o avanço de 0,08 mm/v, enquanto que para a ferramenta com geometria alisadora todos os pontos ficaram abaixo desse valor, com exceção do avanço de 0,5 mm/v que o excedeu em 0,01  $\mu\text{m}$ .

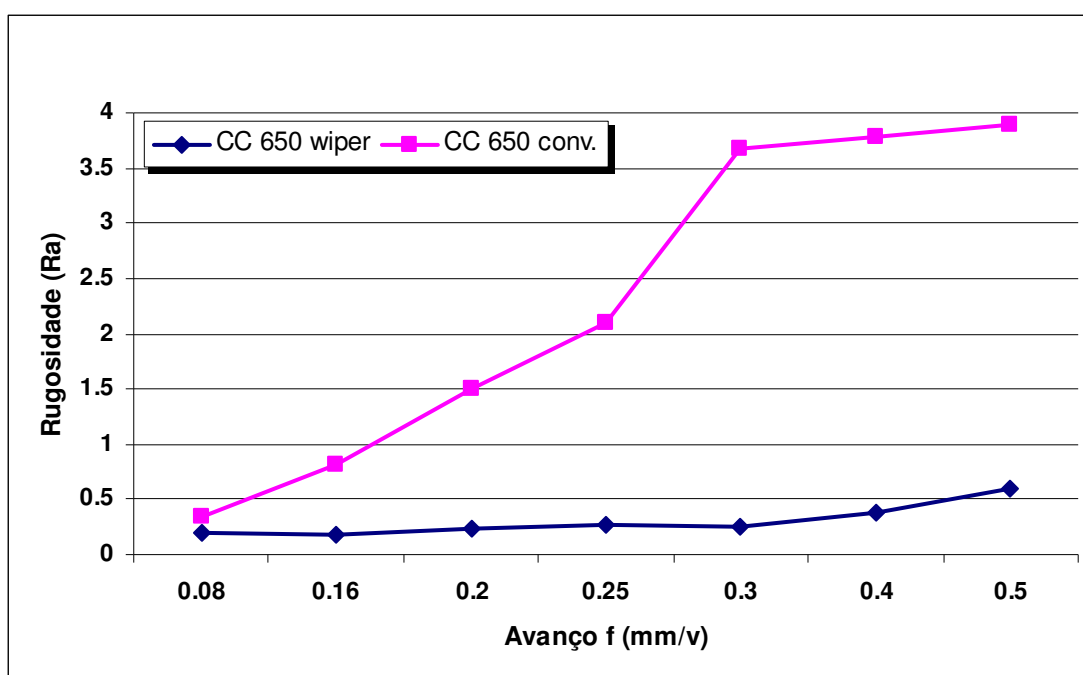


Figura 2.13- Rugosidade  $R_a$  ( $V_c=150$  m/min,  $a_p=0,2$  mm, ferramenta convencional e alisadora), Salles (2004).

Analisando-se a Figura 2.14, que corresponde ao gráfico de rugosidade em função da quantidade de peças usinadas para as ferramentas cerâmicas classe CC 650, notou-se novamente uma grande superioridade das ferramentas de geometria alisadora sobre as ferramentas de geometria convencional para uma velocidade de corte de 150 m/min. A ferramenta de geometria alisadora superou a ferramenta de geometria convencional tanto em número de peças usinadas como em valores de rugosidade obtidos, pois a partir da 19ª peça usinada com a ferramenta de raio de ponta convencional, o limite de rugosidade ficou fora do proposto ( $R_a$  máximo de  $0,60 \mu\text{m}$ ), atingindo um valor de  $0,61 \mu\text{m}$ . Já o resultado obtido com a ferramenta de raio de ponta alisadora, em nenhum momento ultrapassou o limite de rugosidade estabelecido, sendo que para o avanço  $f = 0,3 \text{ mm/v}$  o valor da rugosidade da última peça usinada antes do fim de vida da ferramenta (avaria) foi de  $R_a = 0,44 \mu\text{m}$  e para o avanço  $f = 0,2 \text{ mm/v}$  foi  $R_a = 0,34 \mu\text{m}$ .

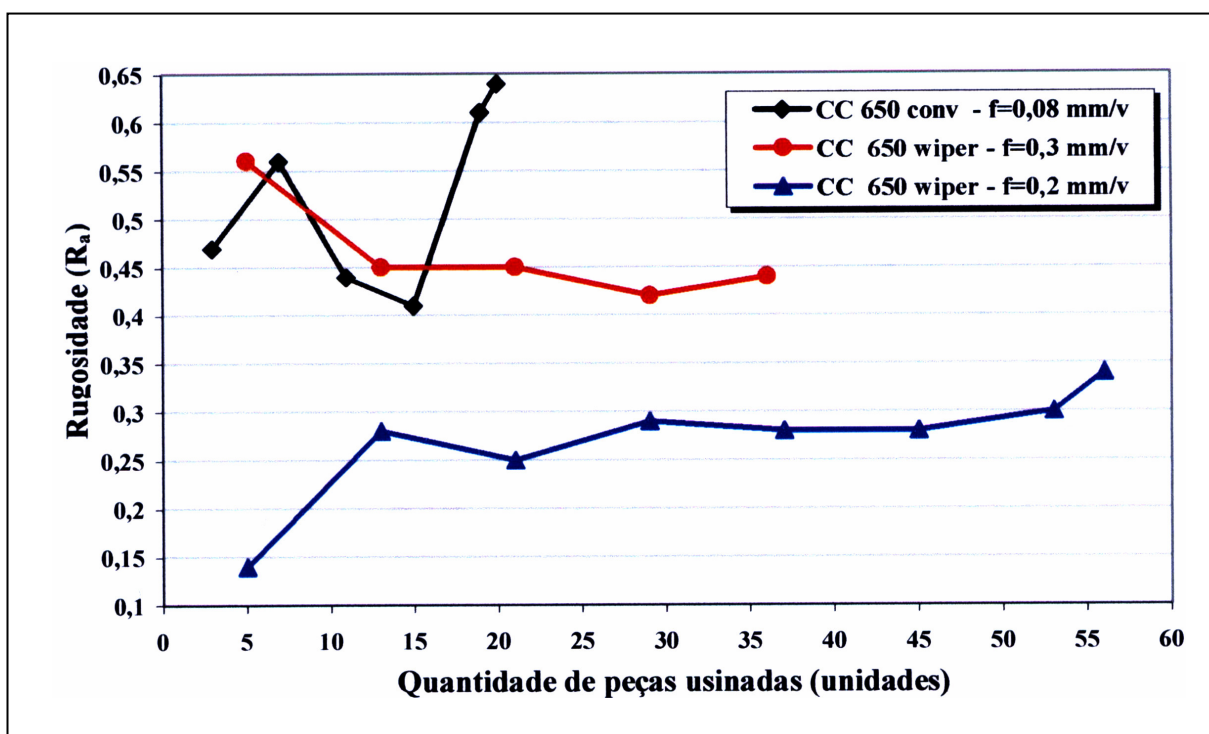


Figura 2.14- Rugosidade  $R_a$  em função do número de peças usinadas, Salles (2004).

Para as ferramentas de PCBN classe 7020, a Figura 2.15 mostra o comportamento da rugosidade  $R_a$  em função do número de peças usinadas por ferramentas de raio de ponta

alisadora e convencional para uma velocidade de corte de 150 m/min (alisadora) e 200 m/min (convencional). A ferramenta alisadora quando adotado avanço  $f=0,15$  mm/v foi muito superior à ela mesma quando comparada à sua condição de corte de avanço  $f=0,20$  mm/v, tanto no aspecto de rugosidade quanto no número de peças usinadas. Já em comparação à ferramenta de geometria convencional, o diferencial imposto pela ferramenta de geometria alisadora para o avanço de usinagem  $f=0,15$  mm/v foi o número de peças usinadas até que fosse atingido a rugosidade  $R_a$  de  $0,60 \mu\text{m}$

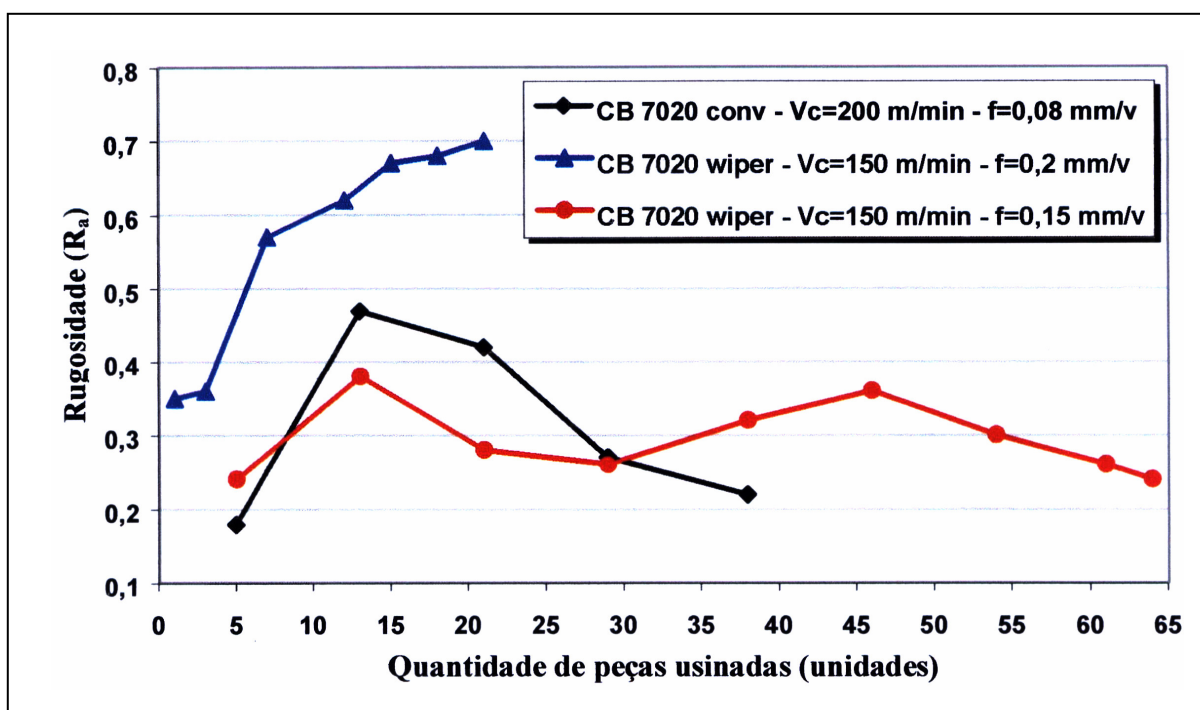


Figura 2.15- Rugosidade  $R_a$  em função do número de peças usinadas, Salles (2004).

## 2.7.2 Vida da ferramenta no torneamento de aço endurecido

Diniz e Matsumoto (1999) verificaram a possibilidade de obter uma qualidade de torneamento compatível com a retificação, onde o critério de fim de vida da ferramenta foi a rugosidade ( $R_a \leq 0,6 \mu\text{m}$ ). Foram analisadas além da vida das ferramentas, a rugosidade da peça usinada e as formas de desgaste das ferramentas. Os corpos de prova torneados foram do aço ABNT 52100 (AISI E52100), temperados e revenidos com dureza na faixa de 58 a 62

HRC, foram utilizadas para o torneamento ferramentas de corte de PCBN classe BZN 8000 (General Electric), com 55% de CBN e de cerâmica mista classe CC 650 (Sandvik), ambas classes com geometria TNGA 160408 T01020. Todos testes foram realizados com profundidade de usinagem ( $a_p$ ) de 0,4 mm, avanço ( $f$ ) de 0,08 mm/v e com velocidades de cortes ( $V_c$ ) de 108, 130 e 150 m/min. Foram obtidas no torneamento, dimensões dentro da tolerância h5 (-13  $\mu\text{m}$  para diâmetro de 50 a 80 mm) com  $R_a$  abaixo de 0,6  $\mu\text{m}$ . A Figura 2.16 faz um comparativo da vida das ferramentas em comprimento de corte ( $L_c$ ) utilizadas, em função de três diferentes velocidades de corte, onde foi observado que para a  $V_c$  de 108 m/min as ferramentas cerâmicas apresentaram melhores resultados do que as de PCBN, já nas velocidades de 130 e 150 m/min, embora ainda com resultados inferiores, as ferramentas de PCBN apresentaram uma menor diferença em relação a vida das ferramentas cerâmicas.

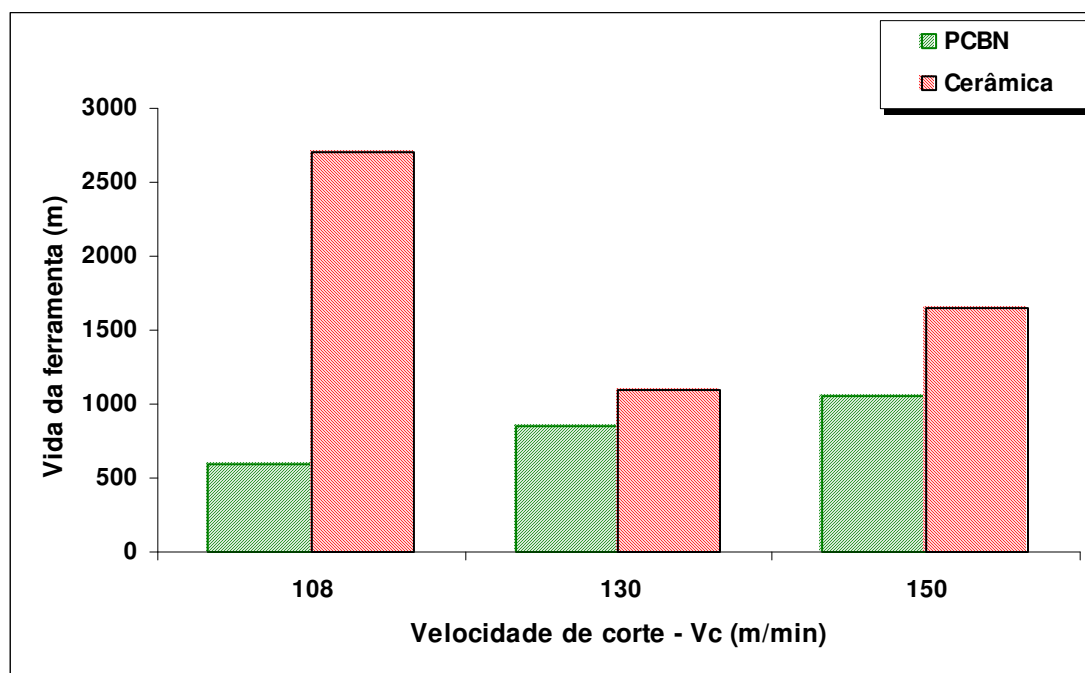


Figura 2.16- Vida das ferramentas em função das velocidades de corte, Diniz e Matsumoto (1999).

Ainda analisando a Figura 2.16, nota-se que houve uma grande variação na vida de ferramentas cerâmicas a medida em que se aumentava a velocidade de corte, dispersão essa que foi muito pequena nas ferramentas de PCBN. O melhor resultado das ferramentas

cerâmicas sobre as de PCBN pode ser explicado pelo fato de que em baixas velocidades de corte a geração de calor é bem menor, com isso uma das principais propriedades das ferramentas de PCBN que é a dureza à quente fica inutilizada. Fica claro na Figura 2.16 que à medida que se aumenta a velocidade de corte, também aumenta a vida das ferramentas de PCBN. A alta temperatura na região de corte facilita a deformação e cisalhamento do cavaco. Foi observado nas ferramentas cerâmicas que o principal agente do fim de vida foi o lascamento, que pode ser causado por choques da ferramenta com partículas duras da peça ou pela vibração momentânea, ocasionada pelo aumento da velocidade de corte devido a menor tenacidade e resistência ao choque mecânico das cerâmicas. Já nas ferramentas de PCBN, os principais agentes do fim de vida foram o desgaste de flanco  $VB_B$  e o desgaste de cratera, ambos bastantes acentuados. O lascamento não foi evidenciado, o que é explicado pelo fato da excelente tenacidade e resistência ao choque mecânico dessa classe. Por outro lado essa classe não possui excelente estabilidade química como as cerâmicas, o que explica o excessivo desgaste de cratera, cujo principal mecanismo de desgaste é a difusão.

### 2.7.3 Refrigeração no torneamento de aço endurecido

Teixeira Filho (2000) realizou um estudo para verificar a influência do tipo de refrigeração no torneamento do aço ABNT 52100 em seu estado endurecido, dureza média de 60 HRC, com ferramentas de PCBN classe CB 7020, Sandvik Coromat – ISO SNGA 120408 S01020, recobertas com Nitreto de Titânio (TiN).

A Figura 2.17 nos mostra a vida da ferramenta de PCBN expressa em comprimento de corte (m), para as condições de usinagem a seco, úmida e com mínima quantidade de lubrificante, para quatro diferentes velocidades de corte, sendo que o avanço e a profundidade de usinagem sempre foram mantidos constantes, com valores de respectivamente 0,08 mm/v e 0,3 mm. O critério de fim de vida adotado foi de rugosidade  $R_a \leq 0,75 \mu\text{m}$ . Foi observado que a condição úmida apresentou o pior resultado em termos de rugosidade  $R_a$ , com uma vida muito curta, para todas as velocidades de corte ensaiadas. A condição à seco apresentou um comportamento sempre bastante superior ao da condição com mínimo volume de lubrificante (MVO), exceto para a condição com velocidade de corte de 150 m/min. Ressaltou-se que na condição à seco para a velocidade de corte de 175 m/min, em nenhum momento dos ensaios a



rugosidade atingiu o valor de  $0,75 \mu\text{m}$ ; fato este, que indica que a alta temperatura na região de corte favorece a obtenção de rugosidades menores, pois facilita a ação da ponta da ferramenta, no sentido de imprimir na peça o raio do inserto.

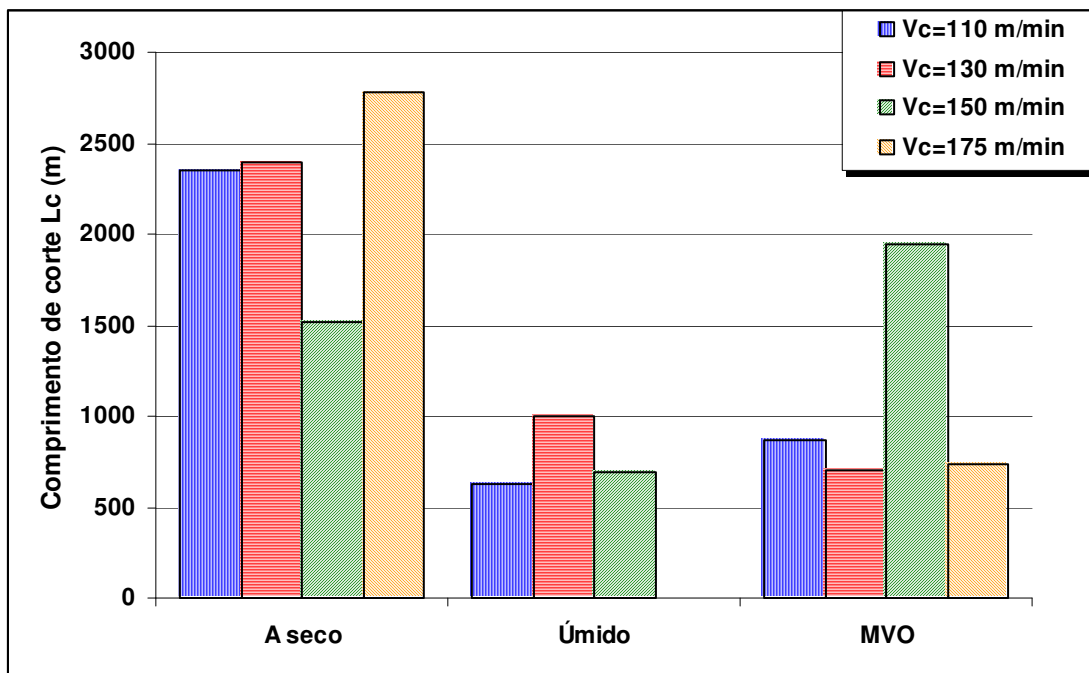


Figura 2.17- Vida da ferramenta de PCBN para o critério  $R_a=0,75 \mu\text{m}$ , Teixeira Filho (2000).

A Figura 2.18 mostra a vida da ferramenta de PCBN, em termos de comprimento de corte  $L_c$  (m) para as três condições ensaiadas, referente ao critério de fim de ensaio  $V_{B_{\max}}=0,15$  mm. Observou-se que a condição a seco apresentou uma vida superior às demais condições em todas as velocidades ensaiadas, exceto para a condição MVO na velocidade de corte de 130 m/min. A condição úmida apresentou as menores vidas de ferramenta em cada velocidade de corte, devido à ação refrigerante do fluido de corte que retira da região de corte o calor gerado no processo.

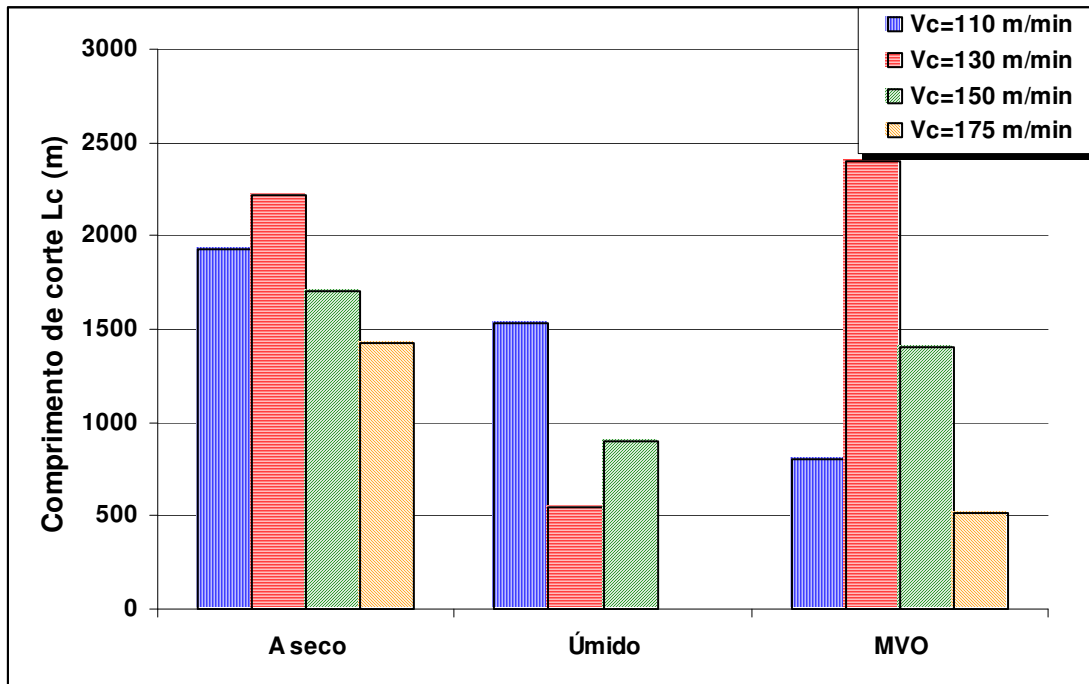


Figura 2.18- Vida da ferramenta de PCBN para o critério  $V_{max}=0,15$  mm, Teixeira Filho (2000).

## **CAPÍTULO 3**

### **PROJETO DE EXPERIMENTOS**

A metodologia do projeto de experimentos (DOE) é um conjunto de técnicas estatísticas que permite a análise de vários fatores de influência de um processo de maneira simultânea. Desta forma, tornou-se possível a obtenção de resultados mais precisos e com um dispêndio de tempo e recursos muito menores que os utilizados com a metodologia tradicional. Neste capítulo será realizada uma breve introdução à metodologia DOE para um melhor entendimento do trabalho aqui apresentado.

#### **3.1 Princípios Básicos de Planejamento e Análise de Experimentos**

Nos processos de fabricação das indústrias existem vários fatores e níveis de regulagens, que influenciam as características de qualidade dos produtos e um problema comum encontrado pelas empresas ao realizar experimentos, é a necessidade de estudar simultaneamente o efeito desses fatores com diferentes níveis de regulagens. Neste caso, observa-se que o número de testes requeridos para a experimentação tende a crescer à

medida que a quantidade de fatores aumenta. Isso torna os experimentos industriais inviáveis nas empresas, porque os custos e o tempo de execução são elevados.

Ao mesmo tempo experimentos industriais são realizados pelas empresas, principalmente, para se resolver os problemas críticos do produto ou processos de fabricação. Com esses testes procura-se reduzir o número de produtos com defeitos fabricados e responder a uma série de questões relacionadas aos níveis e parâmetros que influenciam o desempenho do produto final. Antony et al. (1998), Coleman e Montgomery (1993), Montgomery (1991) e Steinberg e Hunter (1984) sugerem que a solução dos problemas pode ser alcançada com mais facilidade quando os experimentos são planejados e as respostas analisadas com métodos ou técnicas estatísticas.

Nesse sentido, Barker (1985) ressalta que ao realizar as atividades (definição dos objetivos, parâmetros do produto ou processo de fabricação, seleção dos fatores de controle e variáveis de resposta, seleção da matriz experimental, realização do experimento, análise de dados, interpretação dos resultados e elaboração de relatórios) dos experimentos industriais de forma planejada, as informações obtidas dos produtos ou dos processos de fabricação tomam-se mais confiáveis e, com isso ações de melhoria mais eficientes podem ser tomadas pelos funcionários das empresas.

### **3.1.1 Conceitos gerais de experimentação**

A seguir apresentam-se alguns conceitos e termos fundamentais para a aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos industriais, citados por Oliveira (1999); Werkema e Aguiar (1996); Montgomery (1991); Juran et al. (1951).

1. Variáveis de resposta: são as variáveis dependentes que sofrem algum efeito nos testes, quando estímulos são introduzidos propositadamente nos fatores que regulam ou ajustam os processos de fabricação. Nos experimentos podem existir uma ou mais variáveis de resposta ( $y$ ) que são importantes de se avaliar.
2. Fatores de Controle: estes são os fatores alterados deliberadamente no experimento. O objetivo principal de introduzir estímulos nos fatores de controle é avaliar o efeito

produzido nas variáveis de resposta e, com isso poder determinar os principais fatores do processo. Juran et al. (1951) divide os fatores de controle em quantitativos (velocidade de corte, profundidade de usinagem, avanço de usinagem etc) e qualitativos (diferentes máquinas, diferentes operadores, liga / desliga etc.). Nos experimentos, os fatores podem ser representados por números arábicos (1, 2, 3,...) ou por letras (A, B, C,...).

3. Fatores de Ruído: são os fatores, conhecidos ou não, que influenciam nas variáveis de resposta do experimento. Cuidados especiais devem ser tomados na hora de realizar os testes com esses fatores, pois, é importante evitar que os efeitos produzidos pelos fatores de controle fiquem misturados ou mascarados com os efeitos provocados pelos fatores de ruído.
4. Níveis dos fatores: são as condições de operação dos fatores de controle investigados nos experimentos. Os níveis são identificados por nível baixo (-1) e nível alto (+1). Segundo Oliveira (1999), é comum considerar como nível baixo o menor valor, quando os fatores forem ajustados por níveis quantitativos.
5. Tratamentos: é a combinação dos níveis de fatores de controle, isto significa que cada uma das corridas do experimento representará um tratamento.
6. Efeito principal: é a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado.
7. Efeito de interação: é a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator, nos níveis de outro fator.
8. Matriz de experimentos: é o plano formal construído para conduzir os experimentos. Nesta matriz são incluídos os fatores de controle, os níveis e tratamentos do experimento.
9. Aleatorização: é o processo de definir a ordem dos tratamentos da matriz

experimental, através de sorteios ou por limitações específicas dos testes. Esse conceito também se refere ao processo de alocação do material e equipamento às diferentes condições de experimentação. A aleatorização nos experimentos é realizada para balancear os efeitos produzidos pelos fatores não-controláveis nas respostas analisadas e para se atender aos requisitos dos métodos estatísticos, os quais exigem que os componentes do erro experimental sejam variáveis aleatórias independentes; Chew (1957).

10. Repetição: é o processo de repetir cada uma das combinações (linhas) da matriz experimental sob as mesmas condições de experimentação. Segundo Montgomery (1991), este conceito permite encontrar uma estimativa do erro experimental, que é utilizado para determinar se as diferenças observadas entre os dados são estatisticamente significativas.
11. Blocos: é a técnica utilizada para controlar e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores (controláveis ou não-controláveis) dos experimentos. Com esta técnica procura-se criar um experimento (grupo ou unidades experimentais balanceadas) mais homogêneo e aumentar a precisão das respostas que são analisadas.

Nas próximas seções é descrito o procedimento experimental usado para realizar a parte prática do estudo, descrita no capítulo 4. As etapas desse plano ou método de pesquisa são propostas por diversos autores que estudam as técnicas de planejamento e análise de experimentos, dentre os quais, Oliveira (1999); Werkema e Aguiar (1996); Montgomery (1991); Myers et Al. (1995); Box e Draper (1987); Steinberg e Hunter (1984); Juran et al. (1951).

### **3.1.2 Processo para conduzir os experimentos**

Antes de iniciar qualquer experimentação, é importante estabelecer o planejamento dos testes. Werkema e Aguiar (1996); Coleman e Montgomery (1993); Montgomery (1991)

ressaltam a importância do domínio do problema por todas as pessoas envolvidas e recomendam que durante os experimentos, o processo seja cuidadosamente monitorado, para garantir que tudo seja realizado de acordo com os planos, pois erros no procedimento experimental muito provavelmente invalidarão os resultados.

Vários autores, como Antony, et al. (1998); Hoppen, et al. (1996); Werkema e Aguiar (1996); Rey (1993); Coleman e Montgomery (1993); Montgomery (1991); Dane (1990); Gil (1988) recomendam que durante o processo de experimentação seja feito um plano estratégico para coordenar as atividades. A seguir são apresentadas as atividades do procedimento experimental descrito por esses autores:

**1. Definição dos objetivos do experimento:** nesta fase inicial é importante definir os problemas dos produtos e dos processos de fabricação, os objetivos do experimento e principalmente, selecionar uma equipe que seja responsável por todas as atividades do processo experimental. Werkema e Aguiar (1996) lembram que as pessoas envolvidas devem ser conscientizadas sobre a importância de analisar cientificamente os fatores que influenciam no processo de fabricação.

**2. Parâmetros do experimento:** esta fase envolve a coleta de informações técnicas do processo de fabricação, na qual, as pessoas devem listar todos os fatores de controle, fatores de ruído, os níveis de ajustagem e as variáveis de resposta. Nessa fase, segundo Montgomery (1991), as informações técnicas podem resultar de uma combinação entre o conhecimento prático (experiência) e a compreensão teórica do objeto de estudo.

**3. Seleção dos fatores de controle e das variáveis de resposta:** nesta fase a equipe deve selecionar os fatores de controle (variáveis independentes), as faixas de variação dos níveis de ajustagem desses fatores e as respostas do experimento (variáveis dependentes), assim como, definir o método de medição dos fatores de controle e a escala numérica que será utilizada para se avaliar as respostas do experimento definidas nas fases anteriores.

Coleman e Montgomery (1993) sugerem que nesta fase os parâmetros do processo sejam classificados por categorias (grau de influência na resposta, capacidade de se controlar ou capacidade de se medir - precisão), apresentadas na Figura 3.1. Esse esquema pode ajudar a selecionar e a priorizar os fatores críticos que afetam as respostas.

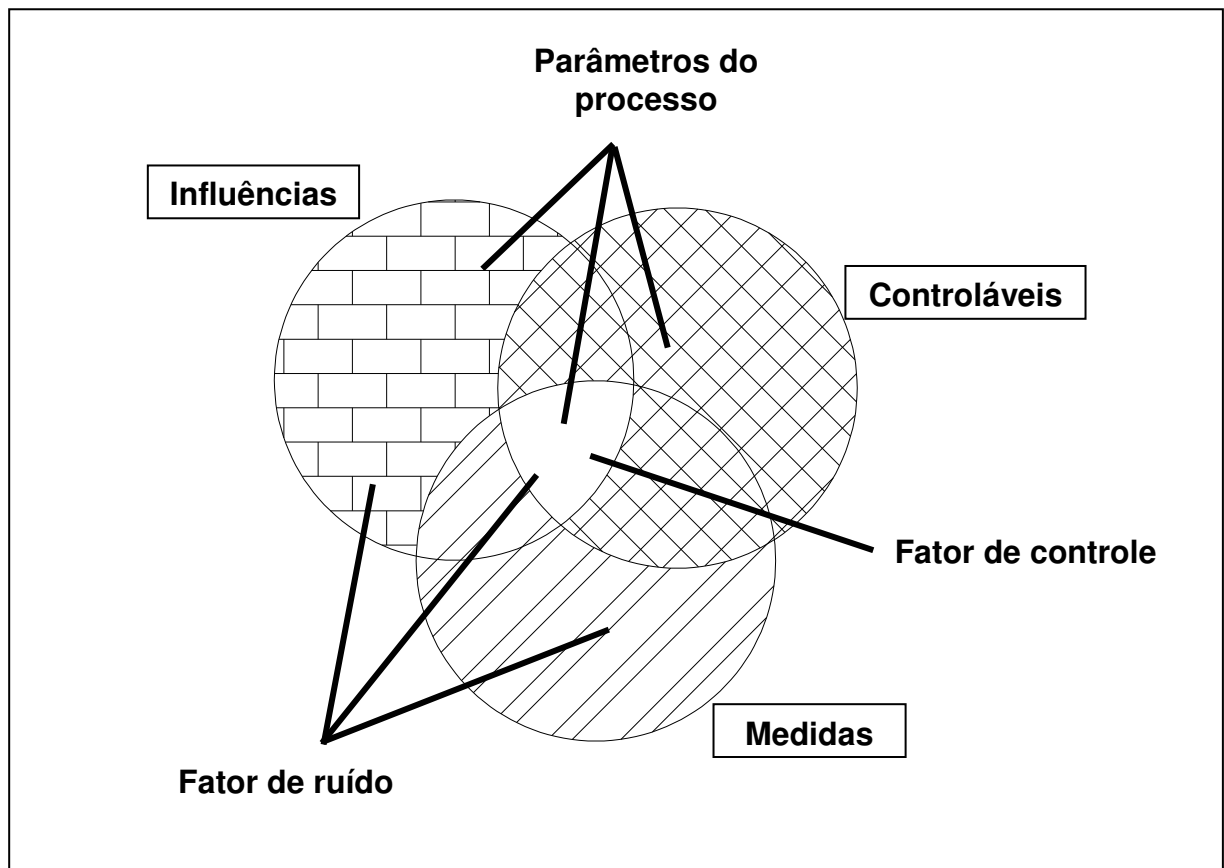


Figura 3.1- Diferentes categorias dos fatores; Coleman e Montgomery (1993).

**4. Seleção da matriz experimental:** segundo Montgomery (1991), se as três etapas anteriores foram seguidas corretamente, esta quarta etapa será relativamente simples de realizar. Ao selecionar ou construir a matriz experimental, devem ser considerados o número de fatores de controle, o número de níveis e os fatores não controláveis do processo. Ainda, nesta fase são definidas as seqüências das corridas (aleatoriamente), o número de replicas, as restrições dos experimentos e as possíveis interações que possam vir a ocorrer entre os fatores que estão sendo avaliados. Algumas das técnicas de planejamento de experimentos que podem ser utilizadas nesta fase são descritas nas próximas seções.

**5. Realização do experimento:** nesta etapa é importante que o processo seja acompanhado pela equipe ou por um responsável, para assegurar-se que todos os procedimentos sejam executados conforme o plano. Hoppen et al. (1996) ressalta que, qualquer mudança no momento em que os experimentos são realizados deve ser registrada



(datas, ensaios adicionais, alteração na seqüência das corridas, etc.) e recomendam que relatórios sejam apresentados no final da experimentação, visto que, essas informações podem enriquecer os resultados obtidos pela análise de dados e verificar se os experimentos foram corretamente executados pelo responsável.

Outro aspecto importante que deve ser considerado durante a realização dos experimentos, é o equilíbrio dos recursos de experimentação disponíveis. Montgomery (1991) considera a pesquisa experimental como um processo iterativo, ou seja, as informações reunidas da primeira rodada de teste são utilizadas como dados de entrada da segunda rodada e por isso, cuidados devem ser tomados para não esgotar todos os recursos na primeira rodada do experimento.

**6. Análise de dados:** nesta etapa podem ser utilizados softwares estatísticos (Minitab, Excel, Statistica), que ajudam a usar as técnicas de planejamento e análise de experimentos, os gráficos lineares e os gráficos de probabilidade normal; Werkema e Aguiar (1996); Montgomery (1991). Os conceitos estatísticos são aplicados nos resultados de um experimento, para descrever o comportamento das variáveis de controle, a relação entre elas e para estimar os efeitos produzidos nas respostas observadas. Ainda, a análise estatística permite tomar decisões quanto a aceitar ou rejeitar as hipóteses formuladas na primeira etapa dos experimentos; Rey (1993).

**7. Interpretação dos resultados:** ao finalizar a etapa anterior, as pessoas responsáveis pelo plano de atividades, devem extrair as conclusões práticas dos resultados e recomendar as ações de melhorias contínua do processo de fabricação. Uma prática comum nesta fase é descrever os resultados através de gráficos, especialmente quando são apresentados às pessoas externas ao projeto. Ainda, as pessoas devem questionar se as respostas satisfazem as questões experimentais definidas na primeira etapa, ou formular novas questões experimentais, revisando as fases anteriores.

**8. Elaboração de relatórios:** Werkema e Aguiar (1996) ressaltam que o trabalho realizado deve ser descrito, identificando-se as limitações práticas e teóricas encontradas, as recomendações para futuros experimentos e as conclusões obtidas. A obtenção desse *feedback* pode ser de grande benefício, para o processo de avaliação do desempenho dos experimentos

industriais, como também, para o processo de revisão; Yukimura (1991). Esta etapa é importante porque demonstra que o estudo desenvolvido é um processo contínuo de aprendizado; Montgomery (1991). Assim, a parte prática desta dissertação é baseada no roteiro apresentado anteriormente, o qual é representado pela Figura 3.2. Segundo Hahn (1993), esse plano experimental ajuda a desenvolver e conduzir efetivamente as atividades já definidas e, principalmente, permite maximizar as respostas das questões formuladas pela equipe de trabalho.

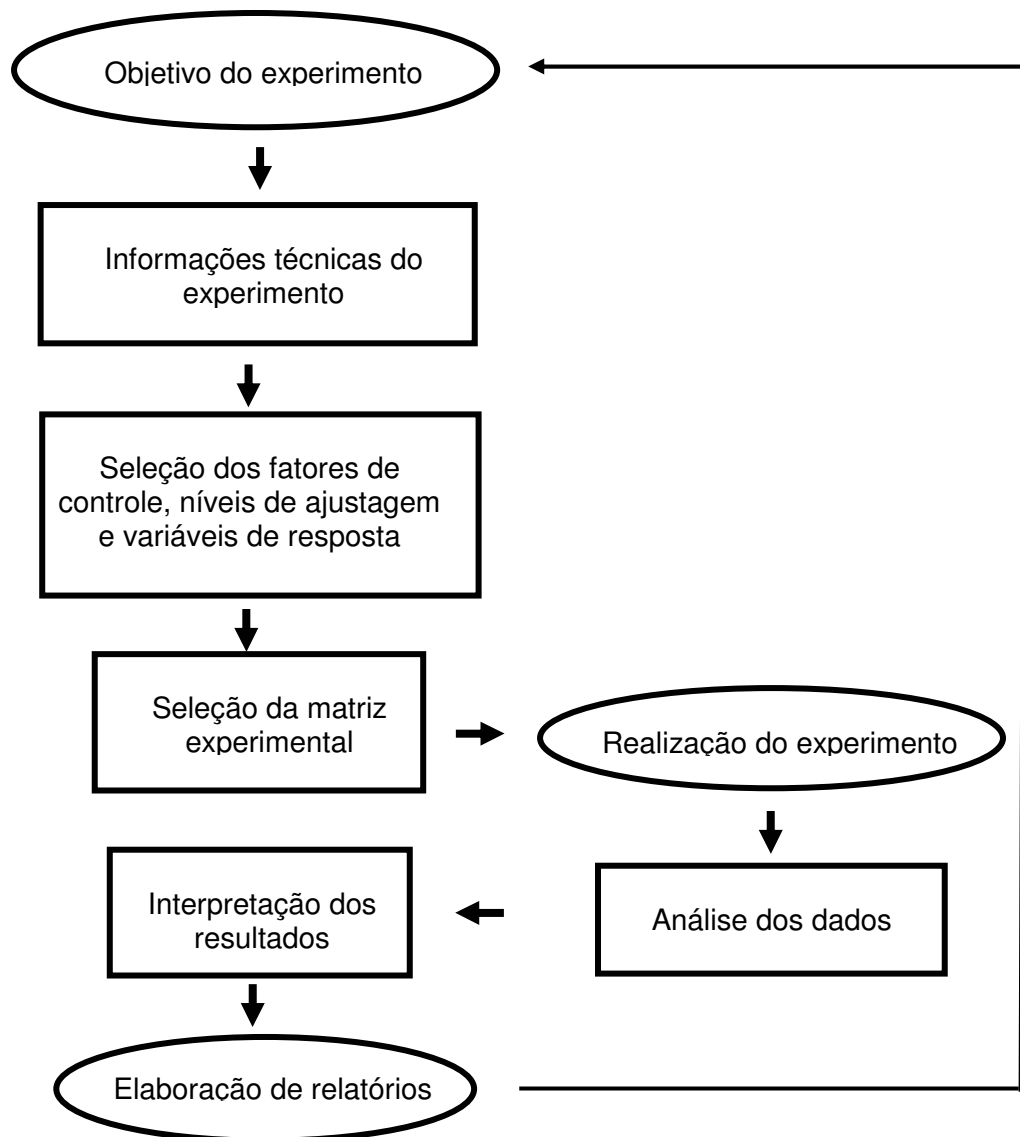


Figura 3.2- Roteiro para condução de experimentos; Haaland e O'Connell (1993).

## 3.2 O Método do Projeto de Experimentos

### 3.2.1 Introdução

Desenvolvido entre 1920 e 1930 por Fisher, sendo posteriormente incrementada por importantes pesquisadores na área de estatística como Box, Hunter e Taguchi, entre outros (Prvan E Street, 2002), o Projeto de Experimentos (DOE) é uma técnica relativamente antiga. Sir Ronald A. Fisher, desenvolvendo pesquisa no *Rothamsted Agricultural Experiment Station*, em Londres, foi o inovador no uso dos métodos estatísticos e da análise de dados. Em 1933, levou seu trabalho para a Universidade de Londres, onde o DOE foi aplicado em experimentos agrícolas e em ciências biológicas, tendo alcançado enorme sucesso. Data de 1930, na *British Têxtil*, a primeira aplicação prática do DOE. Depois da Segunda Guerra mundial, o DOE foi introduzido na indústria química e nos processos industriais de empresas nos Estados Unidos e Europa. O interesse crescente pelo DOE ocorreu também no Brasil e no resto do mundo. Atualmente as organizações aumentam em muito a sua produtividade com a utilização desta ferramenta.

Embora tenha sido utilizado, originariamente, em experimentações agrícolas, este conjunto valoroso de técnicas tem aplicações nos mais diversos campos do conhecimento, tais como a Medicina e a Psicologia; Muller-Gass e Campbell (2002), Mcnamara e Healy (1995); A Toxicologia, Bois (2001), Durig e Fassihi (1993); Neurociências, Stockhorst et. al. (2000), Bischof e Rollenhagen (1999); Física Ganguli (2002); Engenharias, Galdámez (2002), Guanaraj e Murugan (1999), Lin e Chou (2002); Ciências Sociais, Masui e De Corte (1999) entre outras.

Uma característica que é especial das experiências desenvolvidas em agricultura e comum a outras ciências, é a disponibilidade das respostas. Em alguns casos, as respostas levarão meses para serem obtidas, ou, em última instância, só na próxima colheita. Na medicina, por exemplo, só depois de transcorrido um longo período sob o qual o indivíduo está sendo tratado (e testado) é que se obtém as respostas necessárias às conclusões estatísticas. As aplicações em engenharias ou em indústrias são, no entanto diferentes, pois nelas os dados estão disponíveis muito mais rapidamente, além do que as questões de pesquisa são acompanhadas pelo conhecimento acerca do objeto de estudo.

A tardia difusão desta metodologia deve-se à dificuldade em tornar factíveis seus complexos e morosos cálculos; entretanto, com o advento dos modernos programas computacionais voltados para a área, como o MINITAB, STATISTICA, SPSS, SAS, tal metodologia tornou-se acessível para um público em geral, não tão especializado, que a tem utilizado com grande sucesso nas mais diferentes áreas.

Além dos programas computacionais, um outro fator sem precedentes tem despertado o interesse pelo DOE nas mais diferentes organizações. Trata-se da Metodologia 6 Sigma, desenvolvida pela empresa *Motorola* na década de 90 e adotada no mundo inteiro pela *General Electrics*, HOERL (2001). Tal metodologia utiliza um algoritmo de resolução de problemas denominado DMAIC (existem também outras variações); Breyfogle (2000), cujas iniciais significam *Define, Measure, Analysis, Improve e Control*. Tal metodologia consolida o DOE como uma das mais importantes ferramentas da fase de Melhoria. Nesta fase do DMAIC, o DOE é utilizado basicamente de duas formas: como projeto Exploratório, para determinar dentro de um grande número de variáveis (X) que podem influenciar uma ou mais respostas (Y), aquelas variáveis realmente significativas que deveriam ser levadas adiante em um estudo mais complexo; como projetos fatoriais, para determinar a função de transferência entre os poucos X's vitais e a resposta Y, Rasis et al. (2002).

### 3.2.2 Estratégia do DOE

Um dos mais importantes passos para a solução de um problema é organizar o pensamento de maneira sistemática sobre o mesmo. Na maioria das vezes, um mecanismo lógico que auxilie o raciocínio é suficientemente eficaz, para tratar problemas aparentemente muito complexos.

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

- 1) Identificar e seleccionar 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 incontrolável 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 réplica; Anderson e Kraber (1999) e a blocagem; Box e 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.
  - 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 e Kraber (1999).

### 3.3 O Projeto Padrão

Em um bom projeto experimental, alguns elementos necessitam estarem presentes, entre os quais, a réplica, a aleatorização e a blocagem.

Quando um experimento é *repetido*, um conjunto de fatores está sendo aplicado em uma unidade experimental. Portanto, os lançamentos 1, 2 e 3, com respostas  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$  e  $Y_{13}$ , respectivamente, representam o lançamento consecutivo do Protótipo 1, três vezes. A Tabela 3.1 ressalta o conceito de repetição.

Tabela 3.1- Repetição de experimentos

	RÉPLICAS		
	Lançamento 1	Lançamento 2	Lançamento 3
Protótipo 1	$Y_{11}$	$Y_{12}$	$Y_{13}$
Prototipo 2	$Y_{21}$	$Y_{22}$	$Y_{23}$
Prototipo 3	$Y_{31}$	$Y_{32}$	$Y_{33}$

Estatisticamente, há uma grande diferença entre realizar os experimentos com a mesma unidade experimental ou com unidades diferentes; Montgomery (1997). Uma variação no resultado dos experimentos pode ser avaliada quando se replica um teste com unidades experimentais diferentes, e o erro, se existir, identificado. Ao se compor uma tabela de respostas para o experimento, se a mesma unidade experimental for utilizada para se obter as réplicas, a resposta de análise será a média das respostas obtidas; caso se utilizem unidades

diferentes, cada réplica originará um experimento, podendo assim, ser detectada a variação dentro do respectivo tratamento. 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. Uma adequada rotulação das unidades experimentais também favorece a precisão do experimento, uma vez que concorre o correto registro dos dados.

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 e Kraber (1999); Montgomery (1997). Conhecendo-se previamente a configuração de um experimento, pode-se contribuir para a ocorrência de seu resultado. Através da aleatorização pode-se garantir que o resultado do experimento seja independente da ordem na qual ele foi executado.

Segundo Gunst (2000), há três razões para se empregar a aleatorização: a primeira é que, se a simultânea mudança de fatores e a apropriada aleatorização não forem incluídas no projeto, os efeitos conjuntos não poderão ser detectados. E segundo, quando os fatores são alterados simultaneamente e em ordem aleatória, há grande chance dos efeitos desconhecidos serem distribuídos através dos níveis dos fatores. Isto porque tais efeitos tendem a serem cancelados, quando os efeitos dos fatores são estimados pelas diferenças entre as respostas médias do experimento. Em terceiro, a análise estatística tende a ser mais simples.

Uma característica também desejável aplica-se às condições *não homogêneas* de experimentação, tais como: insuficiência de material para realizar a experimentação de maneira completa; Box e Behnken (1960); materiais com diferentes procedências (fornecedores, lotes ou fontes); Montgomery (1997); descontinuidade na execução (dias ou horários distintos). Para avaliar a influência desses fatores externos, deve-se empregar a blocagem; Gunst (2000).

Uma técnica que considera a influência de fatores externos ao experimento, a *blocagem*, é utilizada com o objetivo de reduzir o efeito da variação indesejável. Um bloco consiste numa parte do experimento completo, que se presume ser mais uniforme do que o todo, devido a condições mais controladas do que se fosse aleatorizadas; ROSS (1991). Um bloco estatisticamente significativo demonstra que uma condição experimental é heterogênea.

Após selecionar os fatores e seus respectivos níveis, tem início a fase de execução dos experimentos. Como todos os fatores podem ser alterados simultaneamente, existem diversas maneiras de combiná-los. Montgomery (1997) cita alguns tipos inadequados de

experimentação tais como a Estratégia de “Um Fator por Vez” (*OFAT – One-factor-at-a-Time*), onde o nível de um único fator será trocado em cada ensaio. A desvantagem dessa estratégia é que não há garantia de que seja encontrada uma solução ótima para o modelo. Estas estratégias são ineficientes em determinar que fatores agregam mais informação e que afetam com maior intensidade a resposta. Em tais estratégias nunca serão reveladas *interações*; Anderson e Kraber (1999).

Nota-se na Tabela 3.2 que os experimentos estão balanceados, ou seja, os dois níveis dos três fatores se repetem um igual número de vezes, isto é um exemplo da ordem-padrão utilizada pelo DOE. 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.

Tabela 3.2- Ordem padrão para um experimento com três fatores em dois níveis; Paiva (2002).

EXPERIMENTO	TEMPO		PRESSÃO		TEMPERATURA	
1	-	2,5 h	-	60 Psi	-	225 °C
2	+	3,0 h	-	60 Psi	-	225 °C
3	-	2,5 h	+	80 Psi	-	225 °C
4	+	3,0 h	+	80 Psi	-	225 °C
5	-	2,5 h	-	60 Psi	+	250 °C
6	+	3,0 h	-	60 Psi	+	250 °C
7	-	2,5 h	+	80 Psi	+	250 °C
8	+	3,0 h	+	80 Psi	+	250 °C

Os arranjos fatoriais completos (*Full Fatorial Designs*), nos quais os níveis se alternam nas colunas segundo uma mesma ordem (Devor et al, 1992), podem ser gerados para qualquer quantidade de fatores:

- Para a primeira coluna, os níveis se alteram a cada  $2^0 = 1$  experimento;
- Para a segunda coluna, os níveis se alteram a cada  $2^1 = 2$  experimentos;
- Para a terceira coluna, os níveis se alteram a cada  $2^2 = 4$  experimentos;



O procedimento se repete para tantas colunas quantas forem os fatores até a  $k$ -ésima coluna, na qual os sinais se alterarão em grupos de  $2^{(k-1)}$  experimentos cada.

Projetos Fatoriais Completos (*Full Factorial Designs*) cobrem todo o espaço experimental; porém, enquanto o número de fatores cresce linearmente, o número de experimentos para esses fatores cresce exponencialmente. Uma quantidade muito grande de fatores pode tornar um processo de experimentação inviável.

### 3.4 Fatoriais Fracionários

A estratégia do fatorial completo, embora seja bastante eficiente, pode resultar em um grande número de experimentos, mesmo com um número relativamente pequeno de fatores. O número de experimentos requeridos para um planejamento fatorial em dois níveis com, por exemplo, 5 fatores é 32. Nesse arranjo, somente 5 graus de liberdade correspondem aos efeitos principais, 10 correspondem às interações duplas e 16 às triplas. Aproximadamente 50% dos graus de liberdade estão sendo usados para estimar interações de alta ordem. Se houver pouco interesse em tais interações, ou se o conhecimento sobre o processo for ainda insipiente, tais interações podem ser negligenciáveis; Montgomery e Runger (2003); Lawson et al. (1998).

Em um primeiro estágio da investigação experimental, é sempre assumida a hipótese da *esparsidade* dos fatores. Isto quer dizer que, entre um certo número de fatores sendo estudados, espera-se que apenas alguns sejam realmente importantes. Os experimentos exploratórios são necessários neste estágio preliminar para identificar tais fatores; Acodeji (2003). Uma vez que envolve menos experimentos, poderá ser utilizado para avaliar efeitos principais e interações de baixa ordem.

#### 3.4.1 Meia-fração de um planejamento $2^k$

Uma meia-fração de um experimento  $2^k$  contém  $2^{k-1}$  experimentos; Draper e Lin (1990). Para compor o planejamento balanceado com a metade do número total de experimentos, constrói-se um fatorial completo com  $2^{k-1}$  experimentos, adotando-se uma

identidade entre a coluna representativa do fator restante e os fatores que fazem parte do fatorial completo  $2^{k-1}$ ; Box, Hunter e Hunter (1978). Considerando-se, por exemplo, um planejamento do tipo  $2^{3-1}$ . Este fatorial possui um  $2^{3-1} = 2^2$  completo. Assim, para três fatores originais A, B e C, apenas A e B compõem um fatorial completo. Para se determinar C, constrói-se uma coluna baseada na identidade gerada entre C, A e B. Tal relação é chamada de gerador; Dong (1993); Draper e Lin (1990); Box e Draper (1987).

Tabela 3.3- Tabela de sinais para o fatorial fracionário  $2^{3-1}$

Experimento	A	B	C = A x B
1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1

De maneira composta, a *relação de definição (I)* para o planejamento será  $I = ABC$ .

O problema com os fatoriais fracionários é que, ao utilizar-se a identidade  $C=AB$ , gera-se um confundimento, ou seja, com a metade do número de experimento não é mais possível estimar-se o fator C isoladamente. O que é possível estimar é uma combinação linear das observações na coluna C,  $l_c$ . A combinação linear ( $l_c$ ) estima  $C + AB$ . Dois ou mais efeitos que tenham essa propriedade são chamados de pares associados (*aliases*); Montgomery e Runger (2003); Box e Draper (1987). O mesmo se aplica a todas as outras combinações (interações) entre A, B e C.

De acordo com Box, Hunter e Hunter (1978), qualquer estrutura associada pode ser encontrada aplicando-se a relação de definição I. Se a relação de definição for multiplicada por qualquer efeito, será encontrado o par associado para aquele efeito. Como pode ser visto em Draper e Lin (1990) e Box e Draper (1987):

$$I = I \text{ e } A^2 = B^2 = C^2 = I$$

Assim, para encontrar com qual efeito a interação BC está confundida, basta multiplicar a relação de definição por BC, tal que:

$$I = ABC \Rightarrow BC(I) = (ABC)BC \Rightarrow BC = A B^2 C^2 \Rightarrow BC = A$$

Isto se aplica a qualquer confundimento.

Uma característica importante de um projeto  $2^{k-p}$  é sua *Resolução*. A resolução  $R$  de um projeto é uma propriedade dos fatoriais fracionários segundo a qual um efeito  $p$  de um fator está confundido com qualquer outro efeito que contenha menos do que  $R-p$  fatores; Box et al (1978). Em um projeto de Resolução III, por exemplo, 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 (1997), deve-se sempre utilizar o projeto que possua a resolução mais alta.

O maior uso dos fatoriais fracionários em dois níveis é para experimentos exploratórios, nos quais muitos fatores são examinados em uma quantidade relativamente pequena de experimentos, para que seja possível identificar os (poucos) fatores que exercem grandes efeitos em uma ou mais variáveis de resposta; Draper e Lin (1990).

### 3.5 A Metodologia de Superfície de Resposta

De acordo com Myers e Montgomery (1995), a Metodologia de Superfície de Resposta (*RSM – Response Surface Methodology*) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são utilizadas para modelar e analisar problemas nos quais a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis e nos quais a resposta deva alcançar um valor ótimo. Por exemplo, suponha que se deseje descobrir quais os níveis de temperatura ( $x_1$ ) e pressão ( $x_2$ ) maximizam o rendimento ( $y$ ) de um processo. Pode-se escrever o rendimento ( $y$ ) como função dos níveis de temperatura e pressão, tal que:

$$Y = f(X_1, X_2) + e \quad (3.1)$$

Onde  $e$  representa o erro observado na resposta. A superfície representada pela equação  $Y = f(X_1, X_2)$  é denominada de *Superfície de Resposta*.

Em muitos problemas de superfície de resposta, a forma de relacionamento entre a variável de resposta e as variáveis independentes, é desconhecida. Portanto, o primeiro passo dentro da metodologia RSM é encontrar uma aproximação razoável para o verdadeiro relacionamento entre  $y$  e o conjunto de variáveis. Usualmente, emprega-se um polinômio de baixa ordem.

Supondo que a resposta esperada  $E(Y)$  seja função de  $K$  variáveis preditoras  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , codificadas de tal maneira que o centro da região de interesse é a origem  $(0, 0, \dots, 0)$ , o relacionamento entre  $y$  e as variáveis preditoras pode ser expresso segundo uma expansão em Série de Taylor; Box e Draper (1987), tal que:

$$E(Y) = \eta = \eta_0 + \sum_{i=1}^k \left[ \frac{\partial \eta}{\partial x_i} \right]_0 x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \left[ \frac{\partial^2 \eta}{\partial x_i \partial x_j} \right] + \dots \quad (3.2)$$

Onde o subscrito zero indica a avaliação na origem.

Se os termos de alta ordem forem ignorados, a expansão produzirá:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad (3.3)$$

Se, em adição, forem mantidos os termos de segunda ordem, a aproximação se tornará:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

Assim, a função aproximada de um *modelo de primeira ordem* pode ser representada:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3.4)$$

Se houver curvatura no processo, então um polinômio de ordem mais alta deve ser utilizado, tal como um *modelo de segunda ordem*, por exemplo.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.5)$$

Segundo Box e Draper (1987) quase todos os problemas de superfície de resposta utilizam um desses dois modelos, ou, em alguns casos, ambos. Contudo, é improvável que um modelo polinomial seja uma aproximação razoável do modelo real em todo o espaço experimental coberto pelas variáveis independentes, mas, pelo menos para uma determinada região, ele funcionará muito bem; Montgomery (1997).

Para estimar os parâmetros ( $\beta$ ) do modelo polinomial emprega-se o método dos mínimos quadrados, que também pode ser escrito em forma matricial; Ganguli (2002); Box e Draper (1987).

A análise de uma superfície de resposta é feita em termos de uma superfície ajustada. Se tal superfície é adequada, sua análise será aproximadamente equivalente a análise da superfície real. Evidentemente, usando-se um projeto de experimentos adequado para coletar os dados da resposta  $y$ , os parâmetros do modelo serão estimados eficazmente. Estes projetos são chamados *Response Surface Designs*.

Geralmente, quando se está em um ponto da superfície de resposta que está distante do ponto de ótimo, a curvatura do sistema é bem pequena, de onde decorre que um modelo de primeira ordem seja adequado para modelar a resposta. O objetivo experimental é, então, caminhar rápida e eficazmente em direção às proximidades da região de ótimo. Uma vez que tal região é encontrada, um modelo mais elaborado deve ser utilizado, tal como o de segunda ordem. Neste estágio, deve-se localizar o ponto ótimo.

Portanto, o objetivo da RSM é determinar as condições ótimas de operação para um sistema ou determinar a região do espaço fatorial na qual as necessidades operacionais sejam satisfeitas.

Sob algumas circunstâncias, um modelo envolvendo apenas efeitos principais e algumas interações pode ser apropriado para descrever a superfície de resposta, principalmente quando a análise dos resultados revelar não haver evidência de curvatura. Em outras circunstâncias, a completa descrição do comportamento do processo poderá requerer um modelo quadrático ou cúbico. Se os limites para os fatores forem definidos

apropriadamente será muito improvável se encontrar um processo que necessite de modelos de terceira ordem.

### 3.6 Center Points

De maneira geral, um modelo de primeira ordem pode ser representado por:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.6)$$

E, como  $i \neq j$ , a equação anterior representa realmente um modelo linear; todavia, em muitos casos, essa equação pode não representar um bom ajuste para o modelo de regressão do experimento. Quando o ajuste de um modelo não é bom, significa que um modelo de ordem mais alta deve ser empregado, como, por exemplo, o *quadrático*; Lin e Chou (2002); Montgomery (1997); Box e Draper (1987). De acordo com essa consideração, um novo modelo para o experimento seria:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon \quad (3.7)$$

Esta equação representa um modelo de *superfície de resposta de segunda ordem*.

Na maioria dos experimentos, assume-se que o modelo linear é adequado; entretanto, para se confirmar se existe ou não falta de ajuste deve-se utilizar os *Center Points*. De acordo com Box et al (1978), tal procedimento consiste em adicionar ao fatorial completo, pontos que sejam intermediários. No caso dos níveis +1 e -1, o *center point* é 0 (zero). Serão adicionados tantos níveis ZERO quantos forem os K fatores do experimento. Evidentemente, quando se acrescentar o nível ZERO, estará se assumindo que o fator K é uma variável quantitativa. Se a variável for qualitativa, como tipo de Material (A ou B), por exemplo, seu emprego será inadequado. Se em um fatorial  $2^2$ , com uma réplica apenas ( $n_f=4$ ), e com 5 *Center Points* ( $n_c=5$ ), a diferença entre a média das respostas entre os fatoriais e os *Center*

*Points* for pequena, então o *center point* cai dentro ou próximo ao plano que passa através dos pontos do fatorial, e nesse caso, não existirá curvatura. Se, ao contrário, esta diferença for grande, haverá curvatura presente. Comparando-se a soma de quadrados para a curvatura quadrática pura com o erro médio quadrático pode-se verificar a existência de termos de segunda ordem. Segundo Montgomery (1997) a soma de quadrados para curvatura é dada por:

$$SS_{QP} = \frac{nf \cdot nc (\bar{y}_f - \bar{y}_c)^2}{nf + nc} \quad (3.8)$$

O Erro médio Quadrático e o teste de hipótese pertinente são, respectivamente:

$$MSe = \frac{SSe}{nc - 1} = \frac{\sum_{Center-point} (y - \bar{y})^2}{nc - 1} \quad (3.9)$$

com:

$$H_0 : \sum_{j=1}^k \beta_{jj} = 0 \quad \text{e} \quad H_a : \beta \neq 0$$

Se  $SS_{QP}$  for muito menor do que  $MSe$ , não haverá evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula; dessa maneira, os coeficientes quadráticos são nulos e o modelo só conterà fatores de primeiro grau. Caso contrário, um modelo quadrático será mais apropriado.

### 3.7 “Central Composite Designs”

O projeto quadrático denominado *Box-Wilson Central Composite Design*, ou, simplesmente, *Central Composite Design (CCD)*, é formado por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo ou um fatorial fracionário, um conjunto de *Center Points* e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados “*Axial points*” ou *StarPoints*. Se a distância entre o centro do projeto e ponto fatorial (+1;-1) for

aproximadamente 1 (em módulo), a distância do centro ao *Axial Point* será maior que a unidade. Esta distância, comumente representada por  $\alpha$ , depende de certas propriedades desejadas para o experimento e do número de fatores envolvidos; Montgomery (1997).

Um CCD é recomendado quando o planejamento fatorial necessitar de experimentação seqüencial. Isto porque estes *projetos* podem incorporar informações de um experimento fatorial apropriadamente planejado; Ganguli (2002).

O número de *Axial Points* em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam os valores extremos de cada fator. Em função de sua localização, podem ser Circunscritos, Inscritos ou de Face Centrada. O *Circunscrito* (CCC) é o CCD original. Nele, os *Axial Points* estão a uma distância  $\alpha$  do centro, baseado nas propriedades desejadas do projeto. Requerem 5 níveis para cada fator.

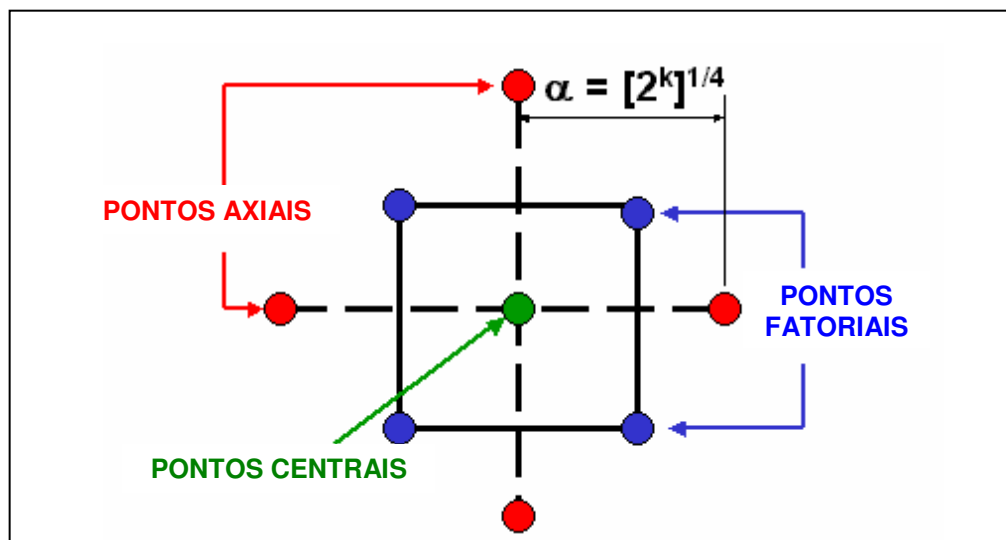


Figura 3.3- Representação gráfica de um Central Composite Design; Paiva (2002).

Aumentando-se um fatorial existente com pontos axiais se obtém este *arranjo*.

O *Arranjo Inscrito* (CCI) é adequado às situações nas quais os limites especificados para o conjunto de fatores são os “Limites Reais”, ou seja, não podem ser extrapolados, quer por medida de segurança, quer por incapacidade física de realização. Neste caso, o CCI utiliza os níveis dos fatores como *Axial Points* e cria um fatorial completo ou fracionário dentro



desses limites. Um CCI é um CCC no qual os níveis dos fatores são divididos por  $\alpha$ . Este arranjo também requer 5 níveis para cada fator.

O arranjo de *Face Centrada* (CCF) caracteriza-se por dispor os *Axial Points* sobre o centro de cada face do espaço fatorial, ou seja,  $\alpha = +1$  ou  $-1$ . Requer 3 níveis para cada fator. Acrescentando os *Axial Points* a um fatorial completo ou a um fracionário de resolução V, obtém-se este arranjo. Um CCC explora o maior espaço fatorial possível, enquanto que um CCI, explora o menor. Ambos, CCC e CCI são rotacionáveis. O mesmo não se aplica ao CCF.

Para manter a rotacionalidade de um arranjo, o valor de  $\alpha$  depende do número de experimentos ( $k$ ) da porção fatorial do CCD. Segundo Box e Draper (1987):

$$\alpha = (\text{número de experimentos})^{1/4} = (2^k)^{1/4} \quad (3.10)$$

Quando se emprega um arranjo em blocos,  $\alpha$  é dado por:

$$\alpha = \left[ k \left( 1 + \frac{n_{s0}}{n_s} \right) / \left( 1 + \frac{n_{c0}}{n_c} \right) \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

Na equação 3.11,  $n_{s0}$  é o número de *center points* presentes na porção axial do arranjo;  $n_s$  é a quantidade restante de pontos da porção axial;  $n_{c0}$  é o número de *center points* da porção cúbica do arranjo (Fatorial Completo) e  $n_c$  é a quantidade restante de pontos da porção cúbica, segundo Box e Draper (1987).

### 3.8 Teste para a Significância do Modelo

Este teste é realizado como um procedimento de análise de variância (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 da distribuição  $F$ , obtido a partir do nível de significância desejado, conclui-se sobre a

significância do modelo. Se  $F$  for maior que  $F_{crítico}$  (o que equivale a um  $P$ -Value menor que o nível de significância), então o modelo é adequado; Montgomery (1997).

### 3.9 Teste para a 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. Do mesmo modo que no item anterior, se o  $P$ -Value do teste individual para os termos for inferior ao nível de significância, então, o termo é adequado ao modelo e deve, portanto, ser mantido. Se, entretanto, ocorrer o contrário, conforme citado por Montgomery (1997); Box et al (1978); Box e Draper (1987), o termo deve ser excluído se tal procedimento conduzir a um aumento do coeficiente de determinação  $R^2$  conjuntamente com a diminuição do termo de erro  $S$  (este termo é a raiz quadrada do erro médio quadrático). O teste para falta de ajuste do modelo reduzido deve ter um  $P$ -value superior ao nível de significância, caso contrário, a eliminação do termo não se justifica. Além disso, a retirada de qualquer termo deve obedecer ao princípio da Hierarquia, segundo Montgomery (1997), ou seja, se um termo de ordem alta é mantido no modelo, o de ordem baixa 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.

### 3.10 Teste para a Falta de Ajuste (*Lack-of-Fit*)

A presença de réplicas em um experimento permite que a soma de quadrados do erro seja dividida em duas partes: o erro puro e a falta de ajuste. Quando o  $P$ -value do teste de falta de ajuste é superior ao nível de significância, então, não há evidência de que o modelo não explique adequadamente a variação da resposta; Montgomery (1997).

### 3.11 Ponto Estacionário

Otimizar uma resposta significa encontrar o melhor conjunto de soluções para as variáveis independentes  $x_1, x_2, \dots, x_k$  que atendam uma determinada condição de  $Y$ . Se uma função possui ponto de máximo ou de mínimo, a derivada primeira dessa função é igual a zero. No caso da função ser composta por um conjunto de variáveis independentes, as derivadas parciais da função em relação a cada uma das variáveis independentes também devem ser zero, para que haja um ponto de máximo ou de mínimo. Este é o *Ponto Estacionário*. Em notação matemática, pode-se escrever:

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} = \dots = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_k} = 0 \tag{3.12}$$

Segundo Box e Draper (1987), escrevendo-se um modelo de segunda ordem em notação matricial (Forma Canônica) tem-se:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + x'b + x'Bx \tag{3.13}$$

$$\text{Onde: } x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_k \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad \text{e } B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 & \dots & \hat{\beta}_{1k}/2 \\ & \hat{\beta}_{22} & \dots & \hat{\beta}_{2k}/2 \\ & & \dots & \\ \text{Simétrico} & & & \hat{\beta}_{kk} \end{bmatrix}$$

Na equação 3.13,  $b$  representa o vetor dos coeficientes de regressão de primeira ordem e  $B$  é uma matriz simétrica, com a diagonal principal formada pelos coeficientes dos termos quadráticos puros. Os demais coeficientes de  $B$  são representados pela metade do valor dos

coeficientes mistos (interações). Como a matriz é simétrica, os mesmos coeficientes estarão presentes na parte de baixo da diagonal principal.

Igualando-se a zero a derivada de  $y$  em relação aos elementos do vetor  $x$ , tem-se que:

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x} = b + 2Bx = 0 \Rightarrow x_s = -\frac{1}{2} B^{-1}b \quad (3.14)$$

Para se conhecer a natureza da superfície de resposta, deve-se examinar o sinal e a magnitude dos autovalores da matriz característica  $[B]$ . Segundo Montgomery (1997), se todos os autovalores de  $[B]$  forem positivos, então,  $x_s$  é ponto de mínimo; se todos forem negativos,  $x_s$  é ponto de máximo; se os autovalores tiverem sinais opostos,  $x_s$  é um ponto de inflexão (*saddle point*). De acordo com Jonhson e Wichern (1982), os autovalores de uma matriz simétrica  $[B]$  podem ser encontrados aplicando-se a seguinte equação:

$$|B - \lambda I| = 0 \quad (3.15)$$

Onde  $I$  é a matriz identidade.

### 3.12 Otimização Irrestrita de Uma Única Resposta

De acordo com Box e Wilson (1951), a otimização experimental de sistemas com uma única variável de resposta, deve ser conduzida em duas fases. A primeira consiste numa seqüência de procura linear na direção da máxima otimização. Esta procura é realizada até que haja evidência de que a direção escolhida não resulta em melhorias adicionais para o modelo, ou, enquanto não houver evidências de falta de ajuste para o modelo de primeira ordem; Lin e Chou (2002).

A segunda fase só é realizada se for detectada falta de ajuste no modelo de primeira ordem. Evidentemente, nem todas as respostas requererão ajustes dessa natureza, e, em tais casos, o modelo da primeira fase será suficiente quando não mais se experimentar melhorias adicionais; Lin e Chou (2002).

Segundo Montgomery (1997), “o primeiro passo da metodologia de Superfície de Resposta (RSM) é o de encontrar uma aproximação razoável para o verdadeiro relacionamento funcional entre Y e o conjunto de variáveis independentes. Usualmente, um polinômio de baixa ordem em alguma região das variáveis independentes é empregado”.

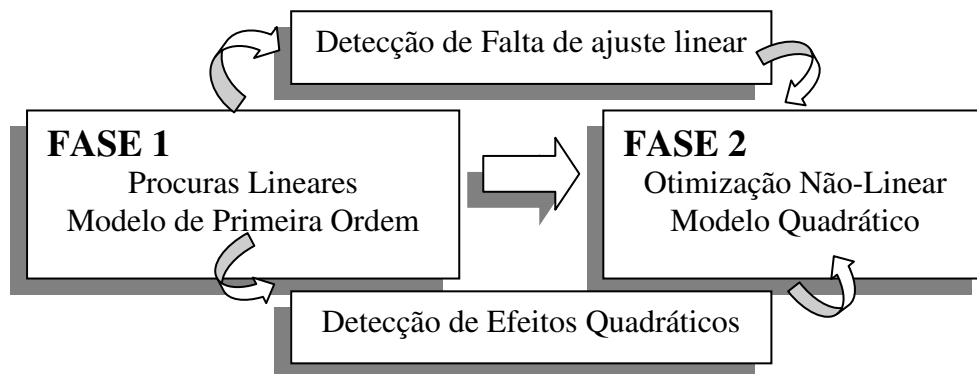


Figura 3.4- Estratégia de otimização experimental

Se a resposta for bem modelada por uma função linear, então, a função de aproximação é um modelo de primeira ordem. Caso contrário, adota-se um modelo de segunda ordem, como pode ser observado na Figura 3.4.

## **CAPÍTULO 4**

### **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

#### **4.1 Máquina-Ferramenta**

Os experimentos constantes do presente trabalho foram desenvolvidos no Laboratório da Automação da Manufatura (LAM) da Universidade Federal de Itajubá. A preparação dos corpos de prova ocorreu nas instalações do Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM). Os ensaios foram realizados em um Torno CNC Nardini Logic 175, com projeto mecânico convencional, ou seja, com mancais de rolamento e guias de escorregamento, potência máxima de eixo de 7,5 CV; rotação máxima de 4000 rpm; torre com oito posições e torque máximo de 200 Kgf.m.

## 4.2 Ferramentas de Corte

O suporte e o inserto (Figura 4.1) utilizados para a usinagem dos corpos de prova durante todos os ensaios estão descritos a seguir:

- Insertos: insertos intercambiáveis de cerâmica mista ( $Al_2O_3 + TiC$ ), Sandvik, classe GC 6050, recoberta com uma camada de Nitreto de Titânio (TiN), com geometria ISO CNGA 12 04 08 S01525, chanfrado para evitar grandes choques e quebra de ferramenta.

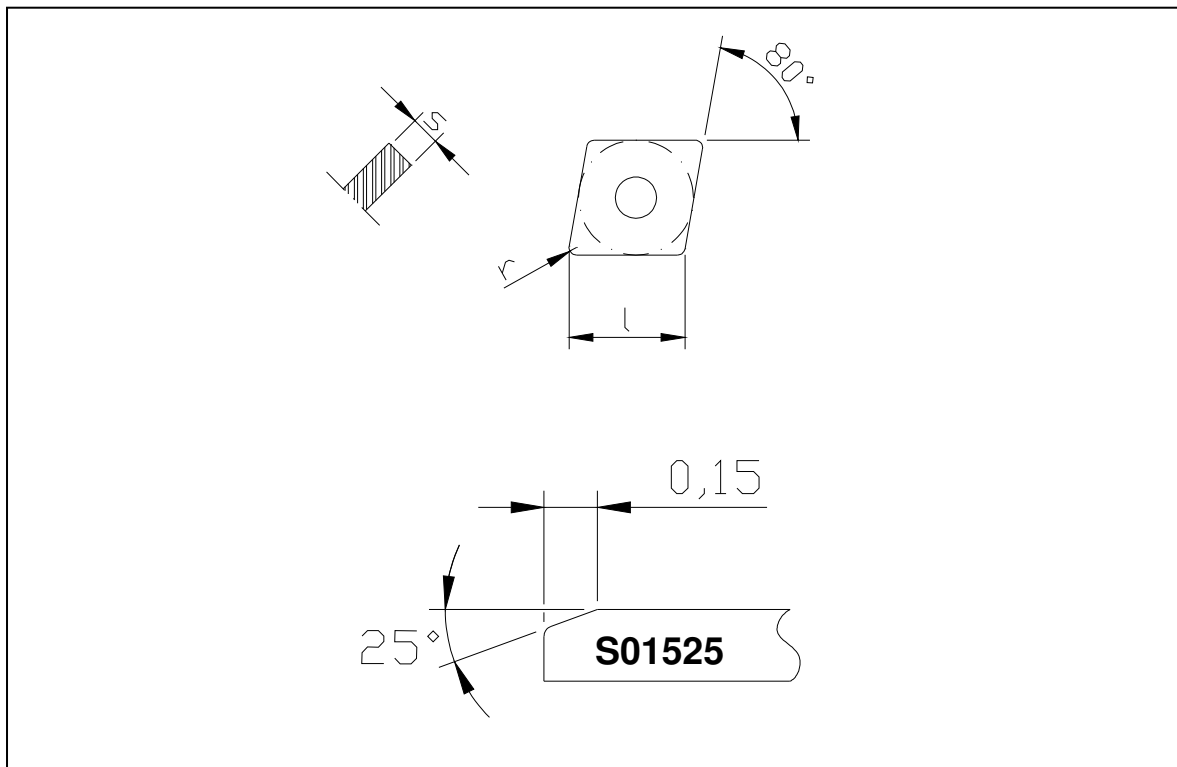
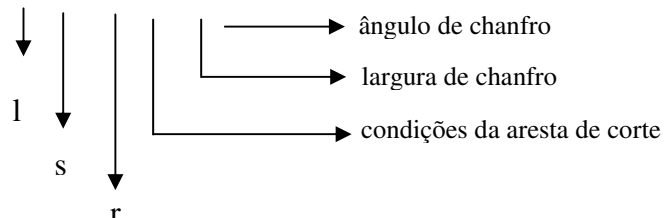


Figura 4.1- Geometria ISO CNGA da pastilha de cerâmica.

onde:

CNGA 12 04 08 S01525



- Suporte: utilizou-se o modelo ISO DCLNL 1616H12, com ângulo de posição de 95°, ângulo de saída de -6° e ângulo de inclinação de -6°.

### 4.3 Material Usinado

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram confeccionados a partir do aço ABNT 52100 (Villares), utilizando-se um torno mecânico Romi modelo S40 e posteriormente, tratados termicamente para aumento de dureza, nas instalações da Imbel – Indústria Bélica. A Tabela 4.1 apresenta a composição química do aço ABNT 52100.

Tabela 4.1- Composição química do aço ABNT 52100

Composição Química (% em peso)								
Elemento	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
<b>Teor</b>	1,03	0,23	0,35	1,40	0,04	0,11	0,001	0,01

O tratamento térmico realizado nos corpos de prova para que os mesmos, por ocasião da usinagem, estivessem no seu estado temperado e revenido, foi executado de acordo com as fases a seguir:

- Pré-aquecimento por duas horas, à temperatura de 500 °C,
- Aquecimento por quarenta minutos, a 830 °C,
- Resfriamento por trinta minutos (martêmpera a 180 °C),
- Resfriamento ao ar até 80 °C,
- Revenimento por duas horas a 200 °C,
- Resfriamento ao ar até aproximadamente 30°C,
- Revenimento por duas horas a 200 °C,
- Resfriamento ao ar.



Após o tratamento térmico, os corpos de prova apresentavam dureza média de 55 HRC, até uma profundidade aproximada de 3,0 mm. Na Figura 4.2 são mostradas as dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

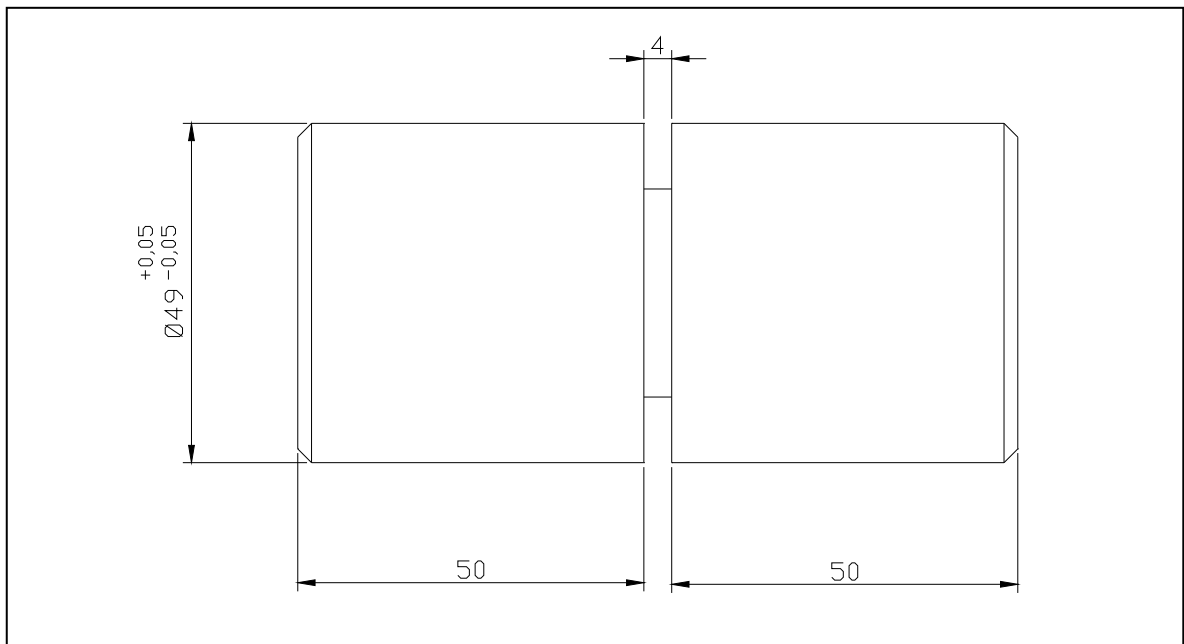


Figura 4.2- Dimensões dos corpos de prova do aço ABNT 52100 com dureza 55 HRC.

#### 4.4 Instrumentos de Medição

As medições de rugosidade ( $R_a$  e  $R_t$ ) dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Metrologia Dimensional da Universidade Federal de Itajubá, utilizando-se de um rugosímetro Taylor Hobson, modelo Surtronic 3<sup>+</sup>, aferido e calibrado antes do início das medições. O desgaste de flanco ( $VB_{max}$ ) na superfície de folga das ferramentas foi monitorado ao fim de cada cinco passes de usinagem, utilizando-se lupa Sandvik graduada em décimos de milímetro, específica para este tipo de medição.

Durante os ensaios monitorou-se a corrente elétrica consumida pelo motor principal da máquina-ferramenta, através de um sistema de aquisição de dados e os mesmos foram armazenados em um microcomputador (sistema Monitek). Os valores da corrente elétrica

foram utilizados para observar-se a variação da potência de corte, com relação ao desgaste da ferramenta. Os valores obtidos não foram considerados significativos, devido à variação de corrente mostrar-se mínima e optou-se por descartá-los. As fotografias dos desgastes de flanco máximo ( $VB_{max}$ ) na superfície de folga das pastilhas, foram realizadas em um analisador de imagem, o qual constitui-se de um microscópio ótico com ampliação de 25 a 50 vezes, acoplado a uma câmera fotográfica e um microcomputador.

Para a montagem da planilha aleatorizada dos experimentos e para fazer análise dos resultados, utilizou-se o software estatístico MINITAB<sup>®</sup> versão 14.

## 4.5 Parâmetros de Usinagem

Nos ensaios realizados foram adotados dois níveis de variação para cada um dos parâmetros de usinagem estudados. A Tabela 4.2 apresenta os três fatores: velocidade corte, avanço e profundidade de usinagem e seus respectivos níveis de variação. Os níveis foram especificados em função de dados recomendados pelo catálogo do fabricante das ferramentas (Sandvik, 2003).

Tabela 4.2- Parâmetros de usinagem utilizados

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Nível Inferior	Nível Superior
Velocidade de Corte	Vc	m/min	200	240
Avanço	f	mm/rotação	0,05	0,10
Profundidade de Corte	ap	mm	0,15	0,30

## 4.6 Metodologia de Ensaios

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 profundidade de

usinagem na vida da ferramenta de cerâmica mista e no acabamento da peça usinada, através da aplicação da metodologia de projeto de experimentos (DOE).

Foi adotado como critério de fim de vida da ferramenta, o desgaste de flanco  $VB_{\max} = 0,3$  mm. Tal critério foi adotado porque, acima deste valor, correria-se o risco de quebra do inserto de cerâmica, além de representar um valor bastante acentuado, no qual, a aresta de corte se encontrava bastante danificada. Após cada cinco passes de usinagem no corpo de prova, o mesmo era retirado da máquina para monitoramento das rugosidades  $R_a$  e  $R_t$ . Neste momento o inserto também era retirado do suporte para monitoramento do desgaste de flanco ( $VB_{\max}$ ).

As medições de rugosidade foram realizadas sempre em três pontos (A, B, C) de uma reta paralela ao eixo longitudinal do corpo de prova, conforme esquema ilustrado na Figura 4.3; após as medições de rugosidade era realizada a média aritmética dos valores encontrados para os fatores  $R_a$  e  $R_t$ .

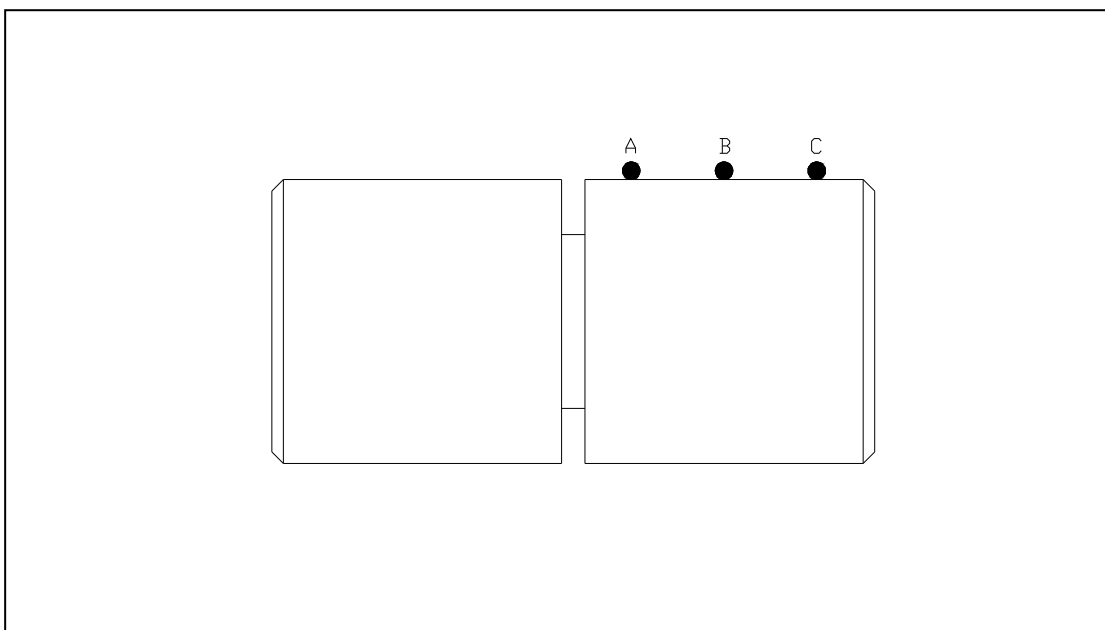


Figura 4.3- Posições de leitura da rugosidade nos corpos de prova.

A montagem esquemática dos equipamentos para os ensaios e medição dos valores de corrente elétrica consumida está mostrada na Figura 4.4:

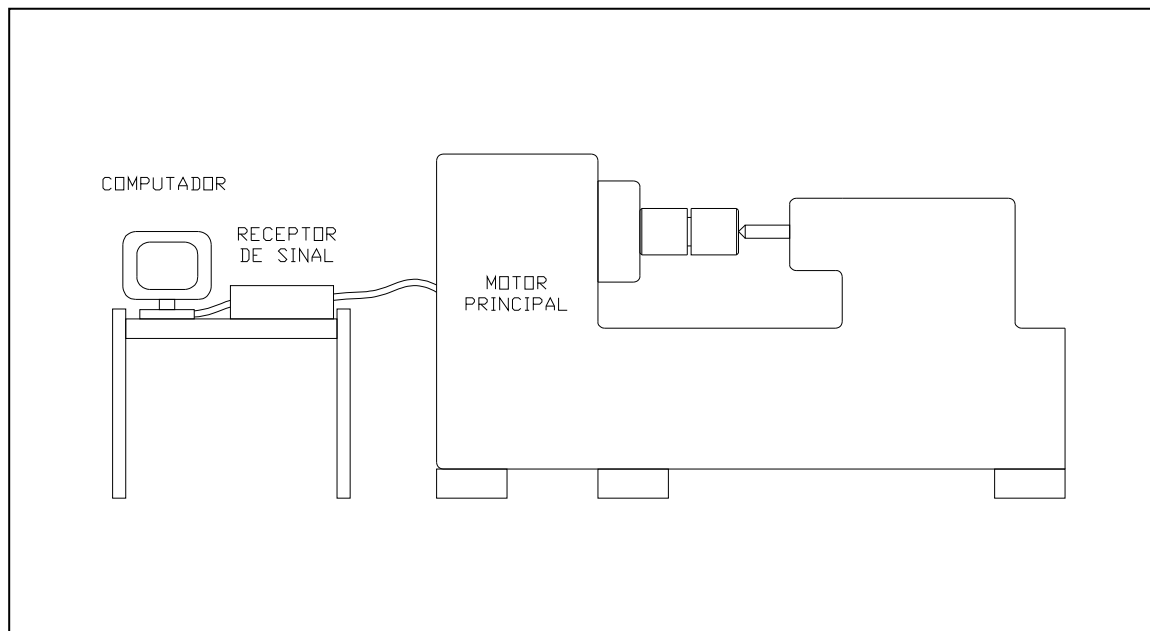


Figura 4.4- Esquema do banco de ensaios.

Utilizando-se a metodologia de projeto de experimentos, os ensaios seguiram uma ordem pré-estabelecida designada pela própria metodologia em questão. Foram inicialmente ensaiadas oito combinações diferentes de parâmetros de usinagem e uma réplica, para a obtenção de um fatorial completo (*Full Factorial*), que vieram a determinar os vértices do arranjo denominado *Box-Wilson Central Composite Design* ou simplesmente, *Central Composite Design (CCD)*. A seguir foram realizados quatro ensaios para a determinação dos *Center Points* e adicionalmente seis ensaios para a determinação dos *Axial Points* ou *Star Points*. Estes pontos irão compor o cubo representado na Figura 4.5. Após todos os ensaios realizados, foram executados cinco experimentos com os parâmetros de usinagem configurados para os níveis ótimos encontrados, para a obtenção da confirmação dos resultados.

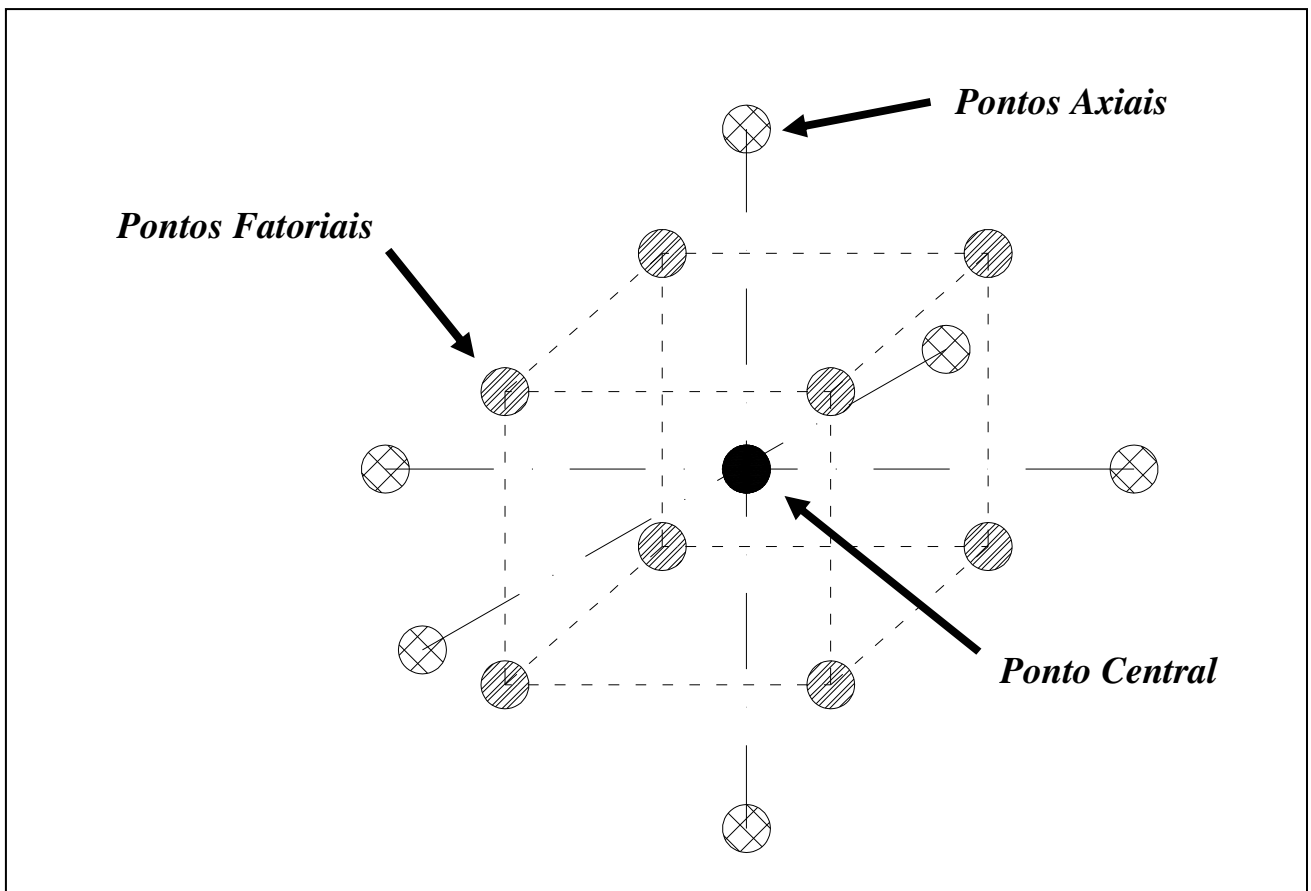


Figura 4.5- Representação gráfica de um *Central Composite Design* (CCD).

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho tem por objetivo estudar no processo de torneamento do aço ABNT 52100 endurecido, a influência da variação dos parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem na vida da ferramenta de cerâmica mista e na rugosidade da peça. Para atingir este objetivo, foi utilizada a metodologia de projeto de experimentos, através da qual foram gerados modelos matemáticos para a vida da ferramenta e para a rugosidade média da peça.

#### 5.1 Modelo de Vida da Ferramenta

Através da elaboração de um arranjo fatorial completo com quatro *center points* proceder-se-á à análise dos dados obtidos experimentalmente. A Tabela 5.1 apresenta os resultados da vida (T) em minutos da ferramenta de cerâmica mista para as oito condições ensaiadas necessárias à obtenção dos *factorial points*, seguidos de suas respectivas réplicas mais os *center points*.

Nestes ensaios foram variados os parâmetros de usinagem, adotando-se a velocidade de corte ( $V_c$ ) entre os níveis 200 m/min e 240 m/min, avanço de usinagem ( $f$ ) entre os níveis 0,05 mm/v e 0,10 mm/v e profundidade de usinagem ( $a_p$ ) entre os níveis 0,15 mm e 0,30 mm. Em todos os ensaios foram utilizadas pastilhas cerâmicas mistas recobertas com Nitreto de Titânio.

Tabela 5.1– Fatorial completo  $2^3$  com *center points*, para a resposta vida de ferramenta T (min).

<i>Nº do ensaio</i>	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/v)	$a_p$ (mm)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$T$ (min)
1	200	0,05	0,15	-1	-1	-1	15,8
2	240	0,05	0,15	1	-1	-1	10,9
3	200	0,10	0,15	-1	1	-1	9,2
4	240	0,10	0,15	1	1	-1	8,5
5	200	0,05	0,30	-1	-1	1	12,4
6	240	0,05	0,30	1	-1	1	7,2
7	200	0,10	0,30	-1	1	1	7,9
8	240	0,10	0,30	1	1	1	6,8
9	200	0,05	0,15	-1	-1	-1	17,7
10	240	0,05	0,15	1	-1	-1	12,1
11	200	0,10	0,15	-1	1	-1	10,5
12	240	0,10	0,15	1	1	-1	8,5
13	200	0,05	0,30	-1	-1	1	10,6
14	240	0,05	0,30	1	-1	1	7,7
15	200	0,10	0,30	-1	1	1	8,5
16	240	0,10	0,30	1	1	1	5,7
17	220	0,075	0,225	0	0	0	8,6
18	220	0,075	0,225	0	0	0	6,8
19	220	0,075	0,225	0	0	0	7,2
20	220	0,075	0,225	0	0	0	9,1

A Figura 5.1 apresenta a vida em minutos da ferramenta cerâmica para cada uma das condições ensaiadas e suas respectivas réplicas. Sua análise mostra que os experimentos foram coerentes, principalmente no tocante à repetitividade, visto que o tempo de vida da ferramenta de cerâmica mista no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido, apresentou 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.

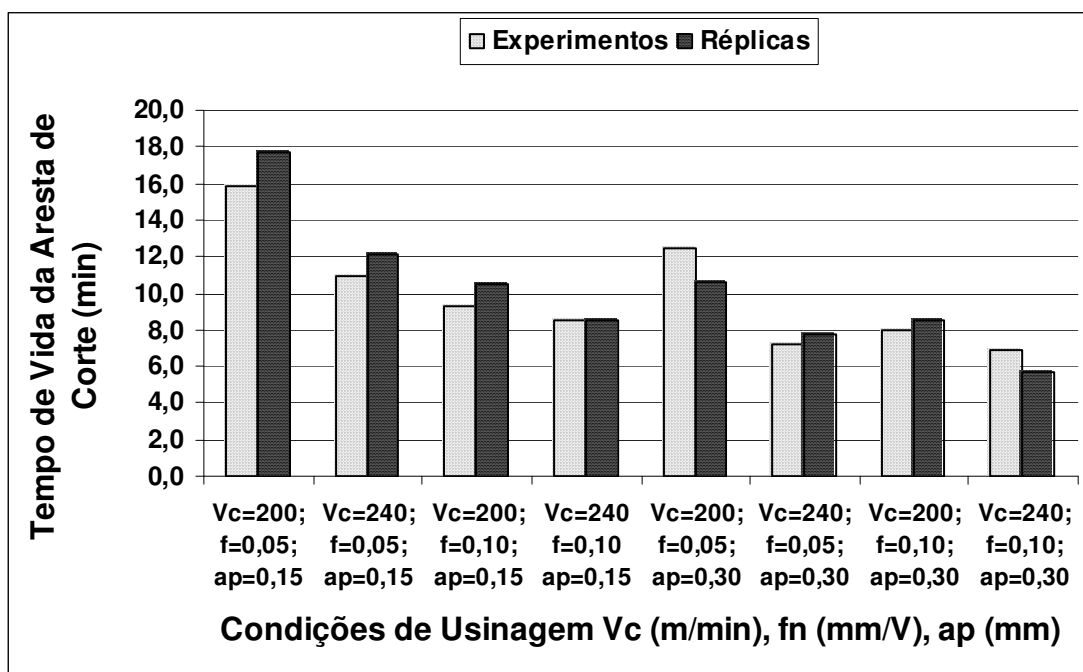


Figura 5.1- Vida das ferramentas de corte nos ensaios e respectivas réplicas para os pontos fatoriais.

A partir dos dados da Tabela 5.1 realizou-se a análise de variância (ANOVA) - que consiste de um teste para comparar-se médias, do fatorial completo para os três fatores e dois níveis ( $2^3$ ), com *center points*, para a resposta vida da ferramenta.

A análise dos dados da Tabela 5.2 permite concluir que os níveis adotados para os fatores no arranjo encontram-se nas proximidades da região de ótimo, uma vez que o *P-value* da curvatura apresenta um valor inferior ao nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%, o que sinaliza a existência de curvatura. Desta forma, pode-se utilizar um *Central Composite Design (CCD)*.



O CCD é um arranjo experimental do tipo “Superfície de Resposta” (RSM - *Response Surface Methodology*) capaz de gerar modelos quadráticos e é formado por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo, um conjunto de *Center Points* e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados “*Axial points*”.

Tabela 5.2– ANOVA do fatorial completo  $2^3$  com *center points* para resposta Vida

<i>TERMO</i>	<i>EFEITO</i>	<i>COEF</i>	<i>SE COEF</i>	<i>T</i>	<i>P</i>	
Constante		10,000	0,2327	42,98	0,000	
V <sub>c</sub>	-3,150	-1,575	0,2327	-6,77	0,000	
f	-3,600	-1,800	0,2327	-7,74	0,000	
a <sub>p</sub>	-3,300	-1,650	0,2327	-7,09	0,000	
V <sub>c</sub> x f	1,500	0,750	0,2327	3,22	0,008	
V <sub>c</sub> x a <sub>p</sub>	0,150	0,075	0,2327	0,32	0,753	
f x a <sub>p</sub>	1,350	0,675	0,2327	2,90	0,014	
V <sub>c</sub> x f x a <sub>p</sub>	-0,450	-0,225	0,2327	-0,97	0,354	
<i>Center Point</i>		-2,075	0,5203	-3,99	0,002	
<i>FONTE</i>	<i>DF</i>	<i>SEQ SS</i>	<i>ADJ SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeitos Principais	3	135,090	135,090	45,0300	51,99	0,000
Interações 2 <sup>a</sup> .Ordem	3	16,380	16,380	5,4600	6,30	0,010
Interações 3 <sup>a</sup> .Ordem	1	0,810	0,810	0,8100	0,94	0,354
Curvatura	1	13,778	13,778	13,7780	15,91	0,002
Erro Residual	11	9,527	9,527	0,8661		
Erro Puro	11	9,527	9,527	0,8661		
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>175,585</b>				

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos e suas interações no comportamento da vida da ferramenta, pode ser obtida avaliando-se os resultados dispostos na Figura 5.2. Observa-se que os elementos que exercem maior influência na vida da ferramenta são os efeitos principais. 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 vida da ferramenta, seguidos da profundidade de corte e da velocidade de corte, além das

interações entre velocidade de corte e avanço de usinagem e entre avanço e profundidade de usinagem. Conforme pode ser observado na Figura 5.2, a interação tripla, assim como a interação entre velocidade de corte e profundidade de usinagem não possuem influência significativa para a vida da ferramenta.

Deve-se atentar, entretanto, para o fato de que estes resultados são válidos apenas para o torneamento do aço ABNT 52100 temperado, usinado com ferramentas de cerâmica mista ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ ), recoberta com TiN (geometria: ISO CNGA 120408 S01525) e com os parâmetros de corte variando nos níveis já mencionados neste trabalho.

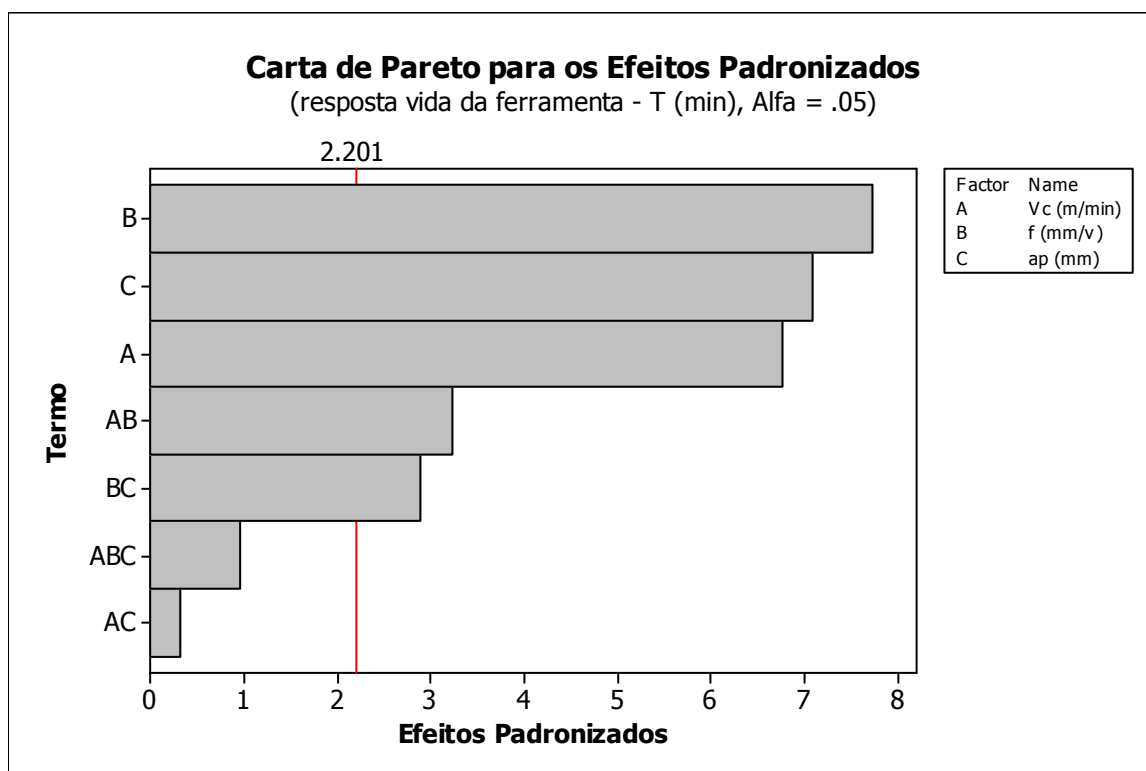


Figura 5.2 – Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados.

A Figura 5.3 fornece o gráfico dos efeitos principais  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  na vida da ferramenta. Nota-se que todos os efeitos principais concorrem para a redução da vida da ferramenta quando estão em seu nível superior, ou seja, o aumento da velocidade de corte ( $V_c$ ), do avanço ( $f$ ) ou da profundidade de usinagem ( $a_p$ ), reduzem a vida da ferramenta.

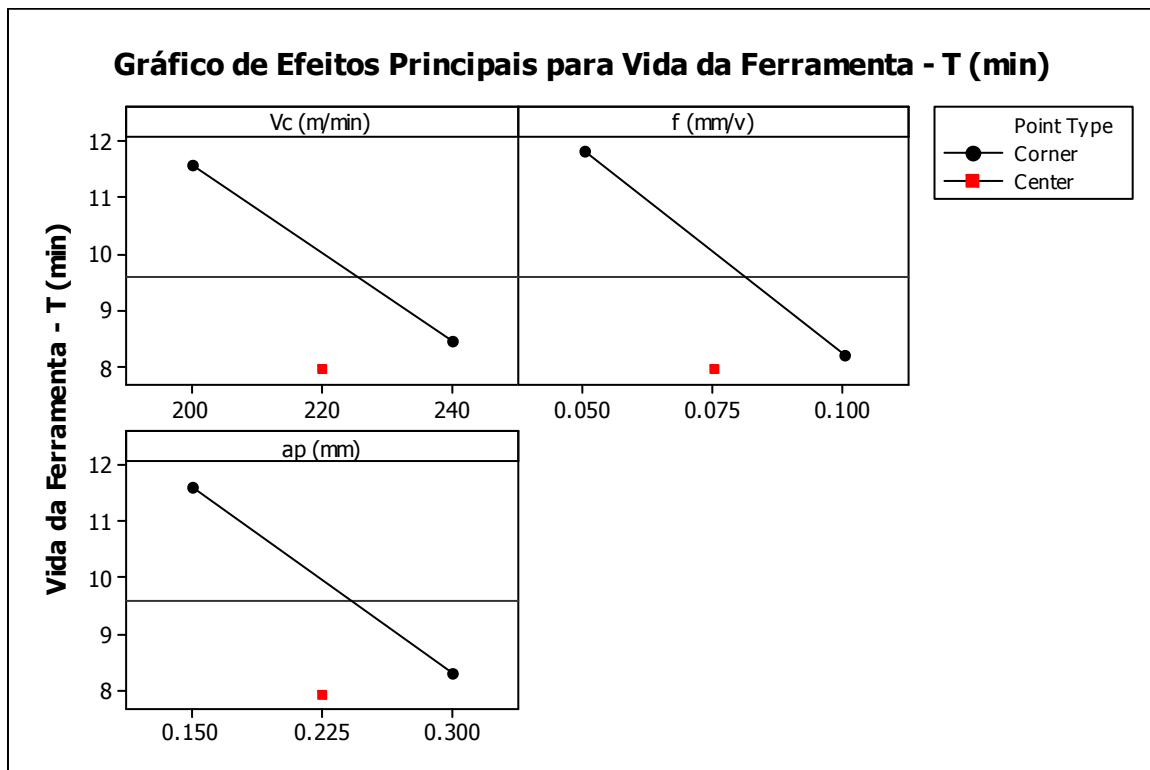


Figura 5.3– Gráficos dos efeitos principais de  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  na vida da ferramenta.

Através do gráfico das interações dos fatores, que pode ser visualizado na Figura 5.4, pode-se verificar a influência da variação de mais de um parâmetro simultaneamente e seu efeito na vida da ferramenta. Observa-se que os fatores  $V_c$  e  $f$  apresentam uma interação significativa no que tange a vida da ferramenta, já que uma mudança de nível do fator avanço de usinagem ( $f$ ) causa uma alteração mais acentuada na vida da ferramenta quando a velocidade de corte é de 200 m/min do que quando ela é de 240 m/min. O mesmo ocorre para os fatores  $f$  e  $a_p$  conforme nos mostra o gráfico de interações, onde uma alteração de nível do fator profundidade de usinagem ( $a_p$ ) provoca uma alteração mais acentuada na vida da ferramenta quando o avanço de usinagem está em seu nível menos elevado.

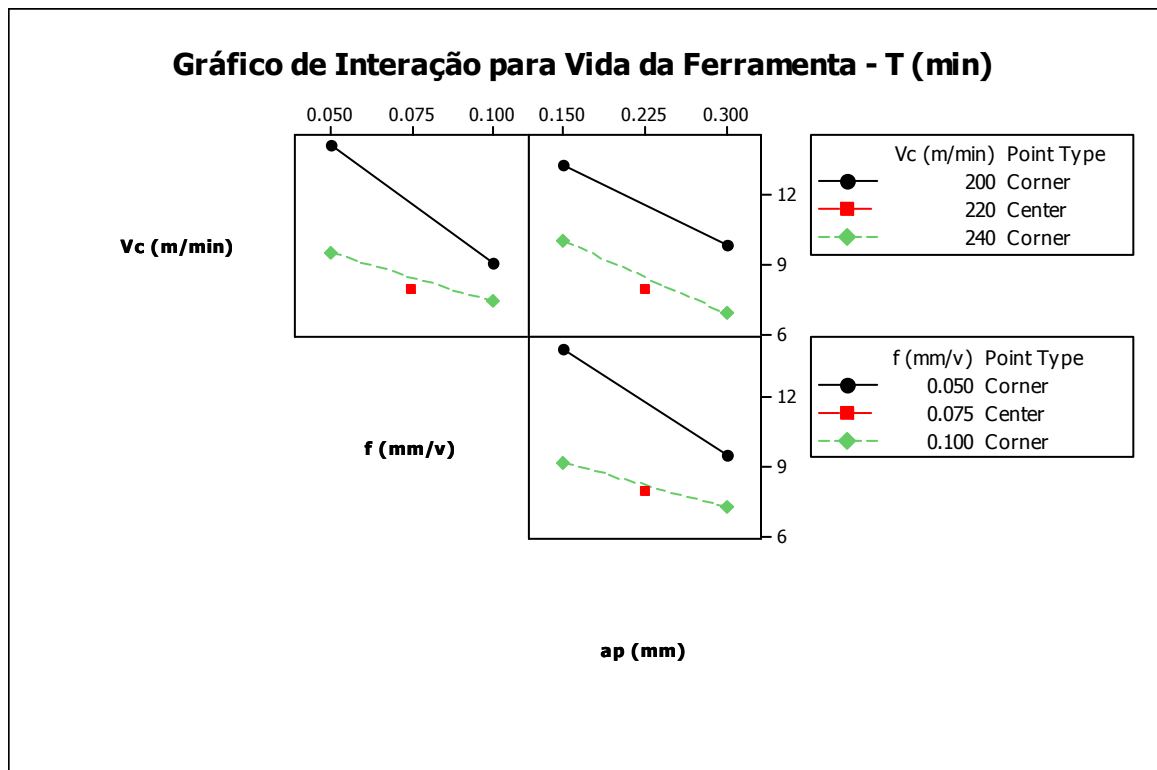


Figura 5.4– Gráfico das interações dos efeitos na vida da ferramenta.

Para a obtenção do *Central Composite Design*, anteriormente mencionado, serão utilizados os resultados do fatorial da Tabela 5.1, executando-se complementarmente apenas os pontos axiais do arranjo. Como o fatorial da Tabela 5.1 possui uma réplica, serão adotadas as médias das respostas para cada experimento. Para se evitar uma possível tendenciosidade na condução do experimento, originada pelo aproveitamento de experimentos realizados na etapa anterior, deve-se bloquear o experimento. Desse modo, os resultados já obtidos mais dois pontos centrais formarão o bloco 1, enquanto que os pontos axiais, seguidos também de dois pontos centrais, formarão o bloco 2, como pode ser observado na Tabela 5.3. Caso não haja diferença entre os blocos, tal termo será excluído do modelo.

Tabela 5.3– Parâmetros de corte e resultados para o RSM da resposta Vida, considerando-se a blocagem.

<i>Nº do ensaio</i>	<i>Bloco</i>	<i>V<sub>c</sub></i> ( <i>m/min</i> )	<i>f</i> ( <i>mm/v</i> )	<i>a<sub>p</sub></i> ( <i>mm</i> )	<i>x<sub>1</sub></i>	<i>x<sub>2</sub></i>	<i>x<sub>3</sub></i>	<i>T</i> ( <i>min</i> )
1	1	200	0,05	0,15	-1	-1	-1	16,75
2	1	240	0,05	0,15	1	-1	-1	11,50
3	1	200	0,10	0,15	-1	1	-1	9,85
4	1	240	0,10	0,15	1	1	-1	8,50
5	1	200	0,05	0,30	-1	-1	1	11,50
6	1	240	0,05	0,30	1	-1	1	7,45
7	1	200	0,10	0,30	-1	1	1	8,20
8	1	240	0,10	0,30	1	1	1	6,25
9	1	220	0,075	0,225	0	0	0	8,60
10	1	220	0,075	0,225	0	0	0	6,80
11	2	187,34	0,075	0,225	-1,633	0	0	10,10
12	2	252,66	0,075	0,225	1,633	0	0	7,60
13	2	220	0,03418	0,225	0	-1,633	0	17,50
14	2	220	0,11583	0,225	0	1,633	0	7,20
15	2	220	0,075	0,102525	0	0	-1,633	12,00
16	2	220	0,075	0,347475	0	0	1,633	6,70
17	2	220	0,075	0,225	0	0	0	7,20
18	2	220	0,075	0,225	0	0	0	9,10

Realizando-se uma análise de variância para os dados do CCD disposto na Tabela 5.3, para a resposta vida da ferramenta e utilizando-se blocagem, obtém-se os resultados da Tabela 5.4. O *P-value* da análise dos blocos (0,503), observado na Tabela 5.4, revela um valor acima do nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05. Com isto, conclui-se não haver diferença entre os experimentos executados na primeira rodada e os pontos axiais, sendo, portanto, os blocos eliminados do modelo.

Tabela 5.4– ANOVA da superfície de resposta, para a resposta vida da ferramenta, considerando-se a blocagem.

<i>TERMO</i>	<i>COEF</i>	<i>SE COEF</i>	<i>T</i>	<i>P</i>
Constante	7,925	0,6481	12,227	0,000
Bloco	-0,220	0,3122	-0,706	0,503
V <sub>c</sub>	-1,251	0,3555	-3,520	0,010
f	-2,341	0,3555	-6,587	0,000
a <sub>p</sub>	-1,639	0,3555	-4,611	0,002
V <sub>c</sub> x V <sub>c</sub>	0,265	0,3823	0,693	0,511
f x f	1,577	0,3823	4,126	0,004
a <sub>p</sub> x a <sub>p</sub>	0,452	0,3823	1,183	0,275
V <sub>c</sub> x f	0,750	0,4589	1,634	0,146
V <sub>c</sub> x a <sub>p</sub>	0,075	0,4589	0,163	0,875
f x a <sub>p</sub>	0,675	0,4589	1,471	0,185

S = 1,298                      R-Sq = 93,4 %                      R-Sq (adj) = 84,0 %

<i>FONTE</i>	<i>DF</i>	<i>SEQ SS</i>	<i>ADJ SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Bloco	1	0,081	0,840	0,8403	0,50	0,503
Regressão	9	166,985	166,985	18,554	11,01	0,002
Linear	3	129,796	129,796	43,266	25,68	0,000
Quadrático	3	28,999	28,999	9,666	5,74	0,027
Interação	3	8,190	8,190	2,730	1,62	0,269
Erro Residual	7	11,794	11,794	1,685		
Falta de Ajuste	5	8,369	8,369	1,674	0,98	0,576
Erro Puro	2	3,425	3,425	1,713		
Total	17	178,860				

## 5.2 Ajuste de Modelos

Procedendo-se à análise dos dados da Tabela 5.3, pode-se obter o modelo linear para vida da ferramenta, conforme Tabela 5.5. Entretanto, o coeficiente de determinação do modelo ( $R^2$  adj) apresenta um valor de 66,9%, o que significa que o modelo não explica adequadamente o fenômeno. 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.

Tabela 5.5– Modelo linear para vida da ferramenta.

<i>TERMO</i>	<i>COEF</i>	<i>SE COEF</i>	<i>T</i>	<i>P</i>
Constante	9,600	0,4396	21,840	0,000
$V_c$	-1,230	0,5046	-2,438	0,029
$f$	-2,323	0,5046	-4,603	0,000
$a_p$	-1,619	0,5046	-3,209	0,006
$S = 1,865$	$R-Sq = 72,8 \%$		$R-Sq (adj) = 66,9 \%$	

Desse modo, deve-se tentar um modelo de ordem mais alta.

A Tabela 5.6 apresenta a análise de variância de um modelo de segunda ordem (modelo quadrático completo), obtido a partir dos resultados do *Central Composite Design* sem a presença de blocos no modelo e percebe-se um excelente ajuste ( $R^2$  adj = 85,8%). Entretanto, as interações não são significativas. Portanto, deve-se tentar um ajuste a partir de um modelo reduzido (Tabela 5.7), respeitando-se, porém, o princípio da hierarquia.

Tabela 5.6– ANOVA da superfície de resposta sem blocagem.

<i>TERMO</i>	<i>COEF</i>	<i>SE COEF</i>	<i>T</i>	<i>P</i>
Constante	7,941	0,6102	13,013	0,000
V <sub>c</sub>	-1,230	0,3307	-3,721	0,006
f	-2,323	0,3307	-7,024	0,000
a <sub>p</sub>	-1,619	0,3307	-4,896	0,001
V <sub>c</sub> x V <sub>c</sub>	0,257	0,3436	0,750	0,475
f x f	1,495	0,3436	4,351	0,002
a <sub>p</sub> x a <sub>p</sub>	0,434	0,3436	1,264	0,242
V <sub>c</sub> x f	0,750	0,4321	1,736	0,121
V <sub>c</sub> x a <sub>p</sub>	0,075	0,4321	0,174	0,867
f x a <sub>p</sub>	0,675	0,4321	1,562	0,157

S = 1,222                      R-Sq = 93,3 %                      R-Sq (adj) = 85,8 %

<i>FONTE</i>	<i>DF</i>	<i>SEQ SS</i>	<i>ADJ SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Regressão	9	166,910	166,910	18,546	12,42	0,001
Linear	3	130,170	130,170	43,390	29,05	0,000
Quadrático	3	28,550	28,550	9,517	6,37	0,016
Interação	3	8,190	8,190	2,730	1,83	0,220
Erro Residual	8	11,950	11,950	1,494		
Falta de Ajuste	5	8,322	8,322	1,664	1,38	0,421
Erro Puro	3	3,627	3,627	1,209		
Total	17	178,860				



Tabela 5.7– ANOVA de modelo reduzido.

<b>TERMO</b>	<b>COEF</b>	<b>SE COEF</b>	<b>T</b>	<b>P</b>
Constante	8,557	0,4149	20,621	0,000
V <sub>c</sub>	-1,230	0,3591	-3,426	0,005
f	-2,323	0,3591	-6,468	0,000
a <sub>p</sub>	-1,619	0,3591	-4,509	0,001
f x f	1,375	0,3594	3,827	0,002

S = 1,327

R-Sq = 87,2%

R-Sq (adj) = 83,3 %

<b>FONTE</b>	<b>DF</b>	<b>SEQ SS</b>	<b>ADJ SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regressão	4	155,965	155,965	38,9912	22,14	0,000
Linear	3	130,170	130,170	43,3900	24,64	0,000
Quadrático	1	25,795	25,795	25,7950	14,65	0,002
Erro Residual	13	22,895	22,895	1,7612		
Falta de Ajuste	10	19,268	19,268	1,9268	1,59	0,386
Erro Puro	3	3,267	3,267	1,2092		
Total	17	178,860				

O modelo reduzido, no entanto, apresenta um ajuste pior ( $R^2$  adj = 83,3%), com um termo de erro  $S$  maior (1,327), embora 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 pela equação 5.1-a:

$$T = 7,941 - 1,230V_c - 2,323fn - 1,619ap + 0,257V_c^2 + 1,495fn^2 + 0,434ap^2 + 0,750V_cfn + 0,075V_c.ap + 0,675fn.ap \quad (5.1-a)$$

A forma decodificada para o modelo de vida da ferramenta, é dada pela equação 5.1-b:

$$T = 115,1474 - 0,4687 Vc - 862,7411 fn - 94,3462 ap + 0,0006 Vc^2 + 2392,1875 fn^2 + 77,2368 ap^2 + 1,5 Vc fn + 0,05 Vc.ap + 360 fn.ap \quad (5.1-b)$$

Com a equação 5.1-a pode-se analisar a superfície de resposta gerada para a variável Vida da ferramenta, empregando-se a avaliação do ponto estacionário. Conforme os coeficientes do modelo, o ponto estacionário será dado por:

$$b = \begin{bmatrix} -1,251 \\ -2,341 \\ -1,639 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,265 & (0,750/2) & (0,075/2) \\ (0,750/2) & 1,577 & (0,675/2) \\ (0,075/2) & (0,675/2) & 0,452 \end{bmatrix} \Rightarrow x_s = \begin{bmatrix} 3,0083 \\ -0,4094 \\ 2,0020 \end{bmatrix}$$

Esta é a solução em unidades codificadas. Decodificando-a, tem-se que:

$$V_c = \frac{x - 220}{20} = 3,0083 \therefore V_c = 280,2 \text{ m/min}$$

$$f = \frac{x - 0,075}{0,025} = -0,4094 \therefore f = 0,0647 \text{ mm/v}$$

$$a_p = \frac{x - 0,225}{0,075} = 2,0020 \therefore a_p = 0,375 \text{ mm}$$

Calculando-se os autovalores da matriz  $[B]$  tem-se, respectivamente:

$$\lambda_1 = 0,1232;$$

$$\lambda_2 = 0,3471; \quad (5.2)$$

$$\lambda_3 = 1,7327$$

Logo, como todos os autovalores são positivos, conclui-se que o ponto estacionário é um ponto de mínimo. É exatamente o que retratam as Figuras 5.5 (a) e 5.5 (b) a seguir.

A Figura 5.5 (a) mostra a superfície de resposta para a resposta vida da ferramenta, considerando-se a profundidade de usinagem constante e igual a 0,225 mm. Observando a mesma nota-se que para valores crescentes da velocidade de corte ( $V_c$ ) e do avanço de usinagem ( $f$ ), a vida da ferramenta diminui.

O mesmo fato pode ser observado na Figura 5.5 (b), porém agora para velocidade de corte constante e igual a 220 m/min e variando-se os parâmetros de avanço ( $f$ ) e profundidade de usinagem ( $a_p$ ). À medida que é aumentado o valor do avanço ou da profundidade de usinagem, a vida da ferramenta, representada pela superfície, diminui.

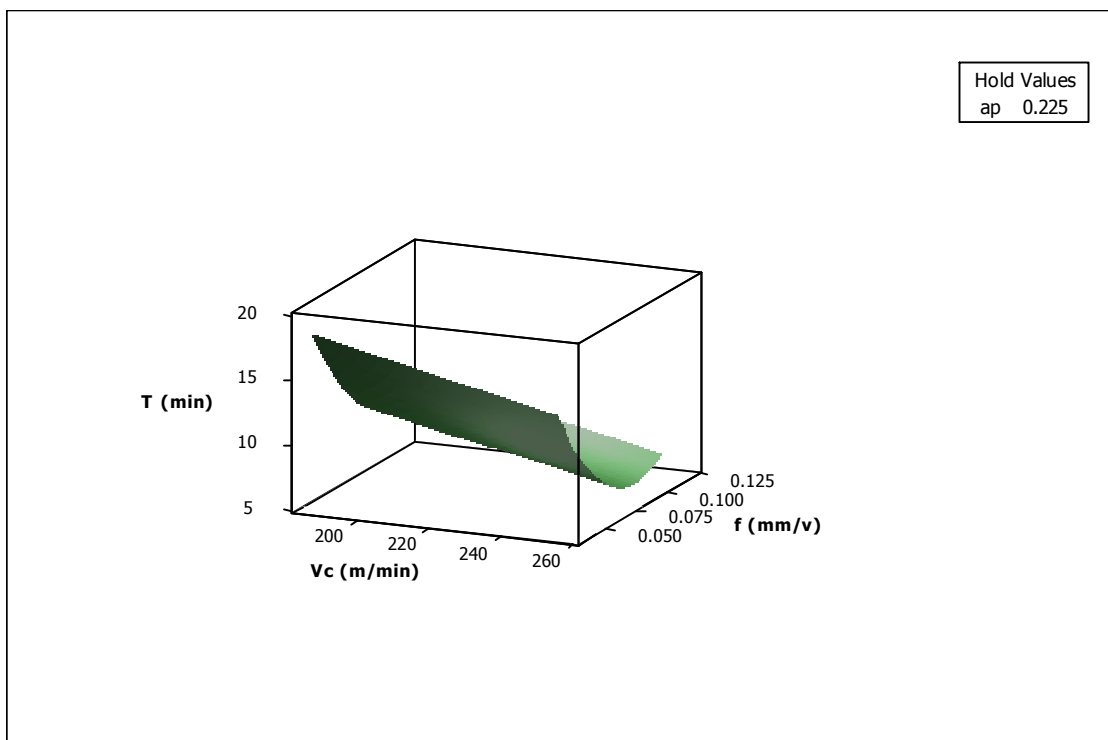


Figura 5.5 (a) – Superfície de respostas do tempo de vida da ferramenta  $T$  (min) para  $a_p = 0,225$  mm.

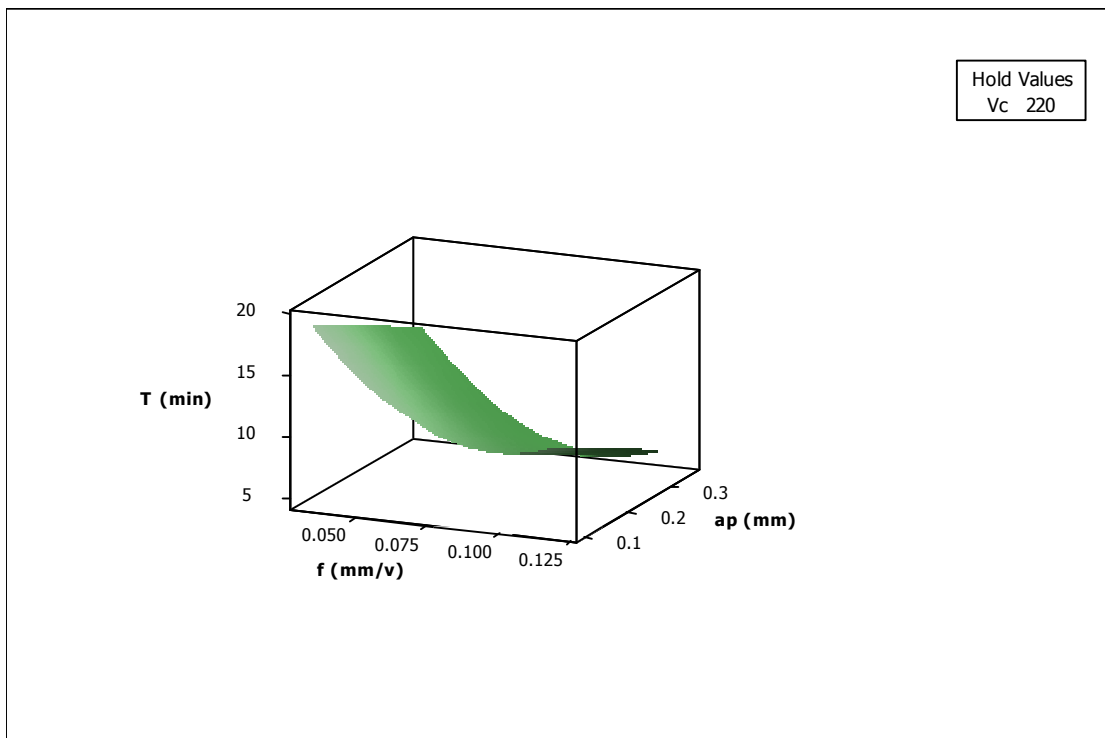


Figura 5.5 (b) – Superfície de respostas do tempo de vida da ferramenta  $T$  (min) para  $V_c = 220$  m/min.

Conforme demonstrado pelo gráfico da Figura 5.3, a vida da ferramenta aumenta quando são utilizados os níveis inferiores adotados para as variáveis de controle.

A Figura 5.6 mostra o comportamento da vida da ferramenta, separando-a em diferentes faixas de vida para diversos valores de velocidade de corte e avanço de usinagem, considerando-se a profundidade de usinagem constante e igual a 0,225 mm. Na Figura 5.6 nota-se que um aumento nos valores da velocidade de corte ou do avanço de usinagem, ou mesmo nos dois fatores simultaneamente, acarreta uma redução da vida da ferramenta. Este fato pode ser claramente visualizado na Figura 5.6, onde se observa que um aumento de nível nos valores do avanço de usinagem produz efeito mais acentuado na vida da ferramenta, que um aumento de nível da velocidade de corte.

Para o material em questão, com profundidades de corte da ordem de 0,15 mm, velocidades de corte inferiores a 200 m/min e avanços inferiores a 0,05, obtém-se vidas superiores a 20 min. Estes níveis para os parâmetros de corte otimizam, portanto, a duração da ferramenta de cerâmica mista ( $Al_2O_3 + TiC$ ), recoberta com TiN (geometria: ISO CNGA

120408 S01525) empregada na operação de torneamento do Aço SAE 52100 – 55 HRC. Cabe ressaltar que, embora as conclusões estatísticas sejam fortes, elas só podem ser empregadas para este caso específico. Não é correto fazer generalizações ou extrapolações a partir destas conclusões para outros materiais e ferramentas; entretanto, o procedimento experimental empregado nesse trabalho pode ser utilizado para qualquer operação de usinagem ou material desejado. Não obstante, deve-se ressaltar que a experiência do pesquisador no processo de escolha dos níveis para os parâmetros concorre para a eficácia dos resultados obtidos, além de proporcionar uma convergência de resultados mais rápida e sem uma quantidade grande de testes.

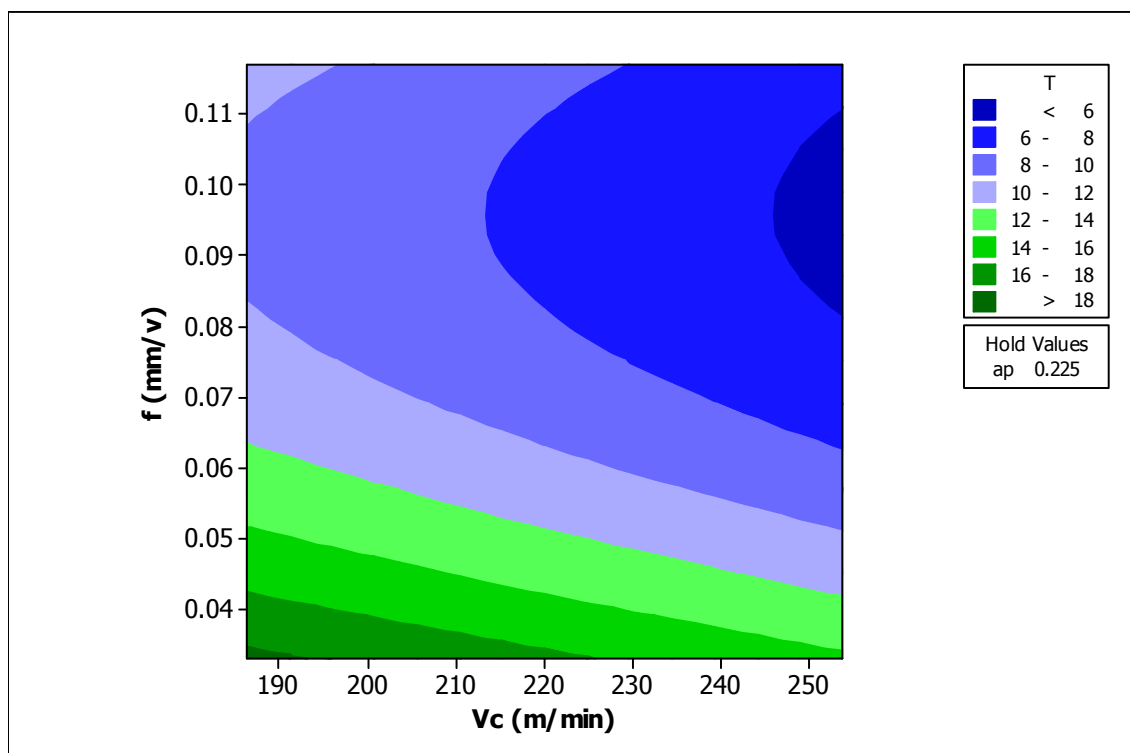


Figura 5.6– Gráfico de contorno da vida da ferramenta.

De acordo com as recomendações de vários autores; Montgomery (1997), Box e Hunter (1957), Noordin et. al. (2004), em todo DOE deve-se realizar uma análise dos resíduos das respostas. Resíduos são as diferenças entre duas ou mais observações e a média formada por

estas observações, segundo Montgomery (1997). Portanto, toda vez que o arranjo escolhido utilizar réplicas dos experimentos, originar-se-ão resíduos.

A análise de resíduos tem a finalidade de avaliar a qualidade dos resultados; em outras palavras, demonstrar se os resultados são reais ou se não passam de mera coincidência. Além disso, servem para identificar discrepâncias ou erros, tais como: inversão de valores, digitação incorreta, inadequação do resultado ao experimento, etc.

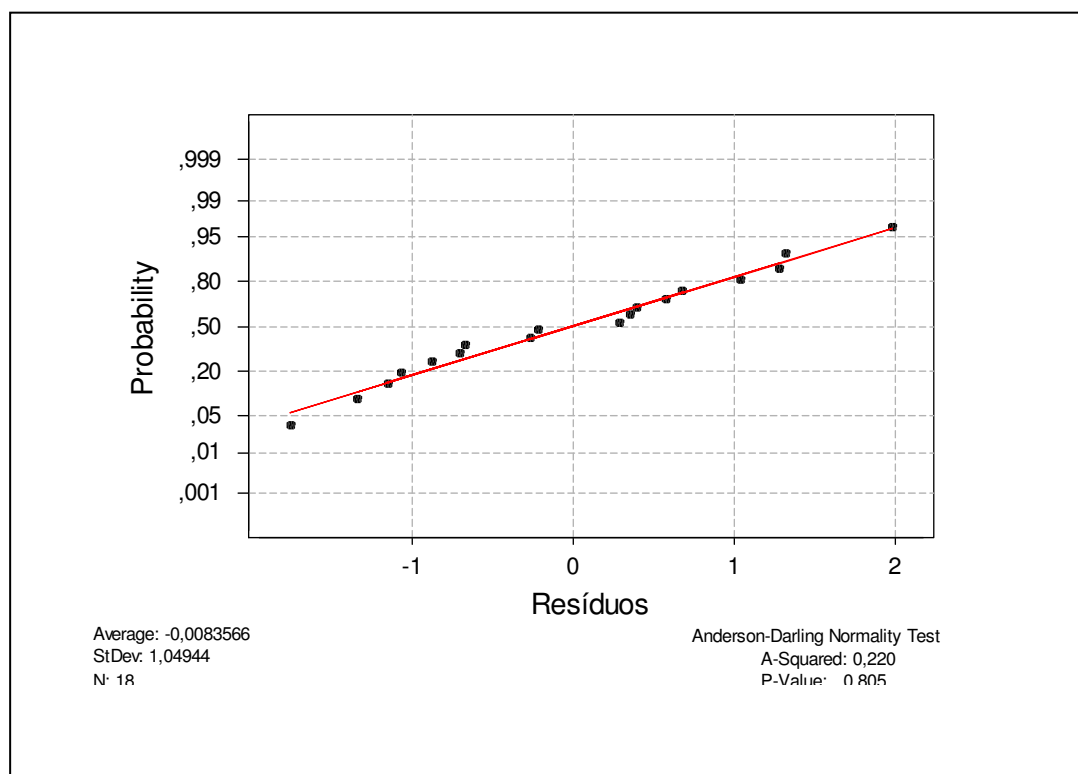


Figura 5.7– Análise de resíduos da RSM da resposta Vida.

Segundo Montgomery (1997), os resíduos devem ser normais, independentes (não-correlacionados) e identicamente distribuídos. A Figura 5.7 avalia a normalidade dos resíduos obtidos com o CCD empregado neste estudo. A boa adequação dos pontos à curva teórica normal (reta), bem como o valor de *P-value* do teste de Anderson-Darling (0,805) bem superior ao nível de significância adotado de 5%, indicam a normalidade dos resíduos.

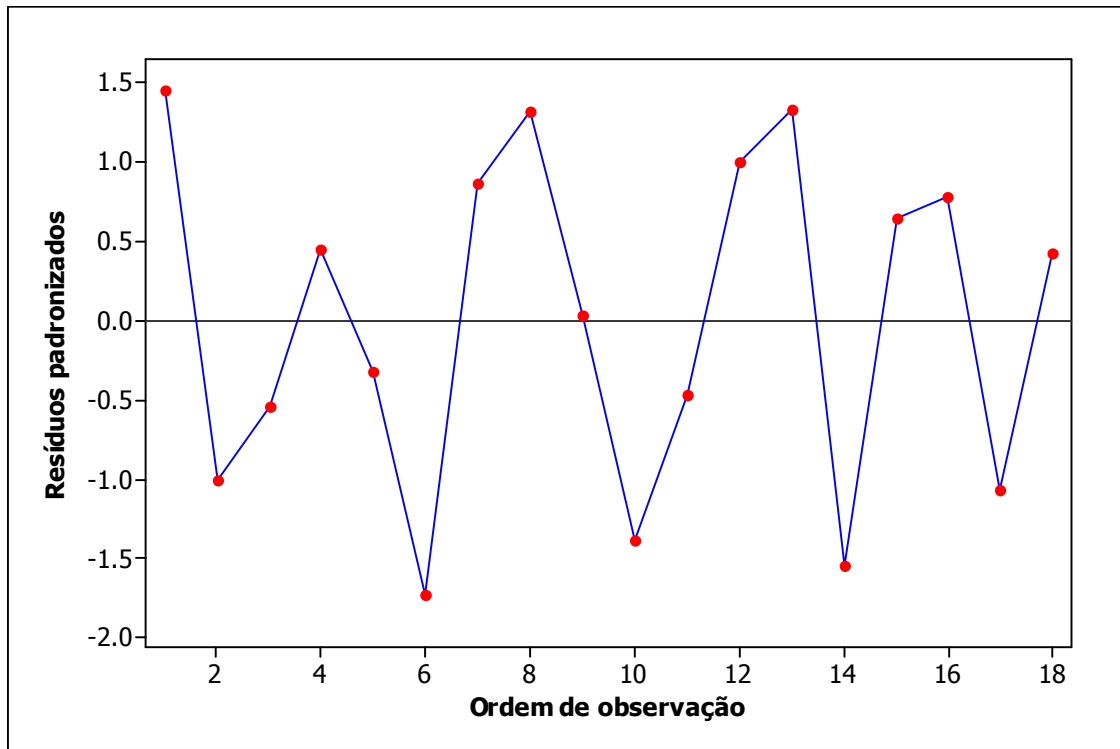


Figura 5.8- Resíduos versus ordem de execução dos experimentos.

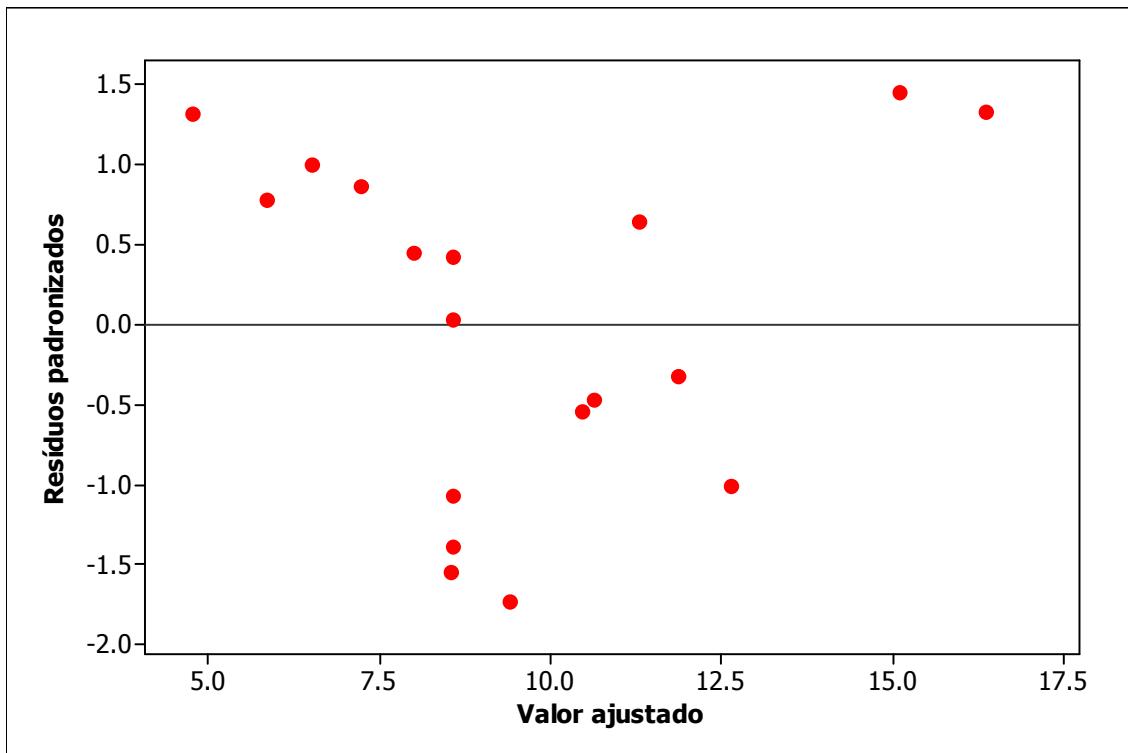


Figura 5.9- Resíduos versus valor ajustado da vida da ferramenta.

De maneira análoga, utiliza-se a Figura 5.8 para se verificar a independência dos resíduos em relação à ordem em que foram realizados os experimentos. Como não se nota a existência de correlação entre a magnitude do resíduo e o experimento que o originou, pode-se afirmar que os resíduos são independentes. Analogamente, a Figura 5.9 demonstra que não há correlação entre um resíduo e seu respectivo valor ajustado para a resposta vida da ferramenta. O valor ajustado é a resposta encontrada para um experimento quando se substituem os níveis especificados do arranjo original no modelo estatístico desenvolvido (nesse caso, o modelo quadrático completo).

Como não são evidenciados padrões de anormalidade nos resíduos, os resultados obtidos pelos modelos descritos neste trabalho podem ser considerados válidos.

### 5.3 Experimentos de Confirmação

A equação 5.1-a nos fornece um modelo de previsão da vida da ferramenta, obtido a partir do modelo quadrático completo gerado pelo *Central Composite Design*. Substituindo na equação 5.1-a os valores codificados para a condição de ótimo, ou seja, os níveis inferiores dos fatores  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  que permitem que seja alcançada uma maior vida da ferramenta, obtém-se a uma estimativa experimental para a vida da ferramenta.

Equação codificada para previsão da vida da ferramenta:

$$y = 7,941 - 1,230 V_c - 2,323 f n - 1,619 a_p + 0,257 V_c^2 + 1,495 f n^2 + 0,434 a_p^2 + 0,750 V_c f n + 0,075 V_c . a_p + 0,675 f n . a_p$$

Substituindo os valores  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  por -1, -1 e -1, que são os valores codificados para o menor nível dos fatores, obtém-se:

$$y = 16,956$$

O que significa uma vida (T) de 16,9 min. para a ferramenta na condição de ótimo.



Para se verificar a adequação do procedimento experimental e do modelo matemático, foram realizados cinco experimentos adicionais de confirmação para vida da ferramenta, considerados na condição de ótimo descrita anteriormente. Estes resultados constam da Tabela 5.8.

Tabela 5.8- Valores de vida dos experimentos de confirmação para a condição  $V_c=200$  m/min,  $f=0,05$  mm/v e  $a_p=0,15$  mm.

<i>Nº do experimento</i>	<i>T (min)</i>
1	17,4
2	16,5
3	18,7
4	14,2
5	18,7

Fazendo uma média aritmética simples dos valores encontrados para a vida da ferramenta, obtém-se o tempo de vida  $T = 17,1$  min. Comparando este valor com o valor teórico obtido pelo modelo ( $T = 16,9$  min), chega-se a uma diferença de 1,2% entre a previsão e o real, o que vem a comprovar a eficiência do modelo.

Avaliando-se os resultados da análise estatística descrita na Figura 5.10, nota-se que o valor previsto pelo modelo ( $T = 16,9$ ), pertence ao intervalo de confiança de 95% construído para os experimentos de confirmação ( $14,779 < T < 19,421$ ), o que revela que o modelo obtido experimentalmente através do DOE é adequado para a previsão da vida da ferramenta estudada. As diferenças encontradas entre as réplicas de confirmação e o valor previsto têm muitas explicações: primeiramente, o modelo em questão só é capaz de explicar 85,8% da variação da resposta com os três fatores utilizados; em segundo lugar, todo fenômeno sofre a influência de variações aleatórias, ou seja, é praticamente impossível se obter um modelo que faça uma previsão com acerto de 100%, uma vez que há fontes de variação naturais e desconhecidas que fazem com que, naturalmente, pequenos desvios entre o real e o teórico aconteçam. O experimento também pode ter sofrido a influência de variáveis de ruído, ou

seja, variações devidas a fatores externos, desconhecidos ou não controlados durante a experimentação. Mesmo assim, o modelo se mostrou bastante satisfatório e eficaz.

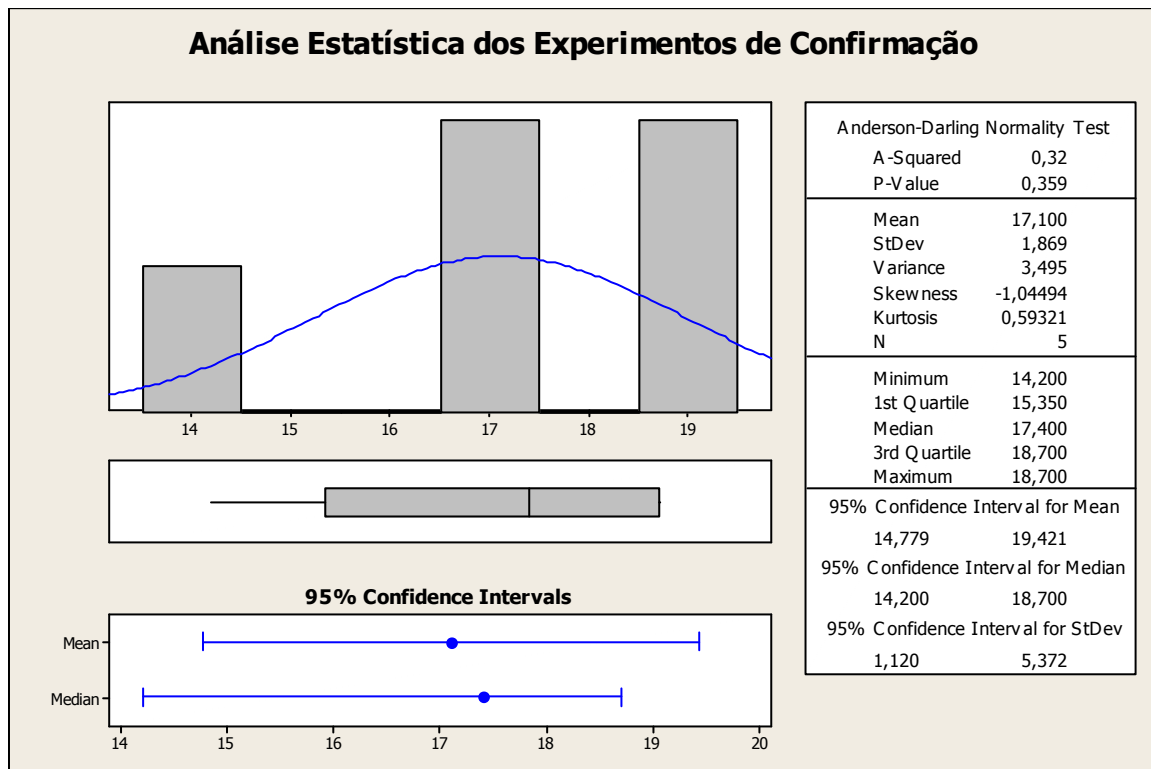


Figura 5.10- Análise estatística dos experimentos de confirmação.

### 5.4 Desgaste e Avarias na Ferramenta de Corte

Para todas as condições ensaiadas, foram verificados predominantemente os desgastes de flanco e de cratera, com algumas ocorrências de lascamentos. Após a análise da Figura 5.4, que fornece o nível de influência da variação de cada parâmetro de corte e suas combinações na vida da ferramenta, torna-se mais nítida a análise da Figura 5.1, onde é possível visualizar o tempo de vida da ferramenta de corte para cada uma das combinações de parâmetros utilizadas nos experimentos. Nota-se na Figura 5.11, onde foram utilizados os fatores  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  em seus níveis inferiores, que o desgaste da ferramenta mostrou-se uniforme, sendo observado um crescente desgaste de flanco que progrediu até atingir o critério de fim de vida  $V_{max} = 0,3$  mm.

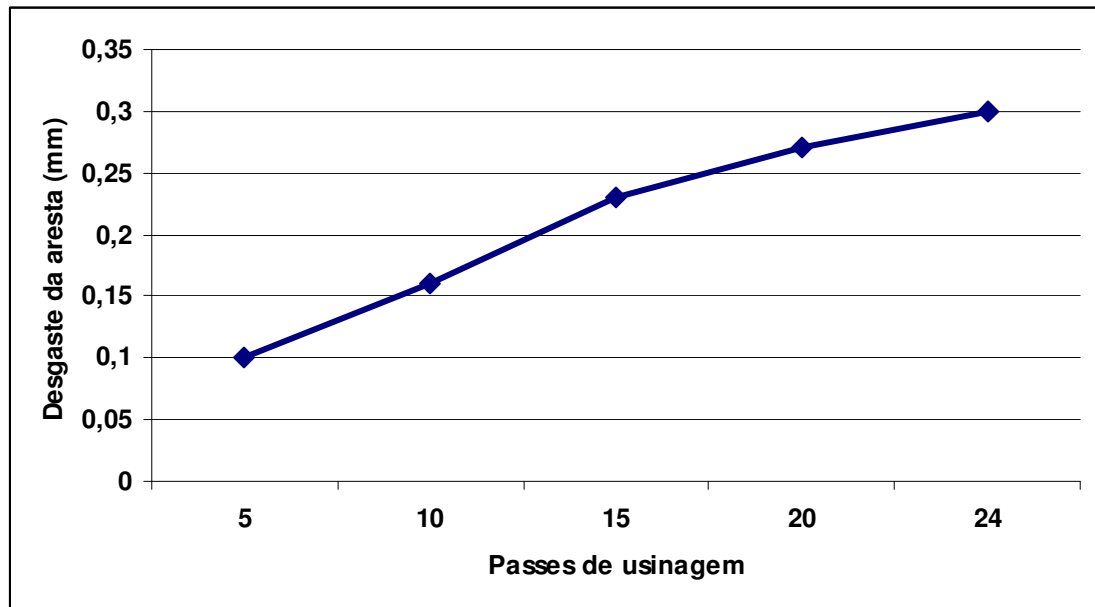


Figura 5.11- Evolução do desgaste da ferramenta para a condição  $V_c = 200$  m/min,  $f = 0,05$  mm/v e  $a_p = 0,15$  mm.

A Figura 5.12 mostra a aresta de corte da ferramenta de cerâmica mista utilizada na usinagem do aço ABNT 52100, após atingir o critério de fim de vida, para a condição de usinagem de  $V_c=200$  m/min,  $f=0,05$  mm/v e  $a_p=0,15$  mm. Pode-se notar a ocorrência de desgastes de flanco e cratera.

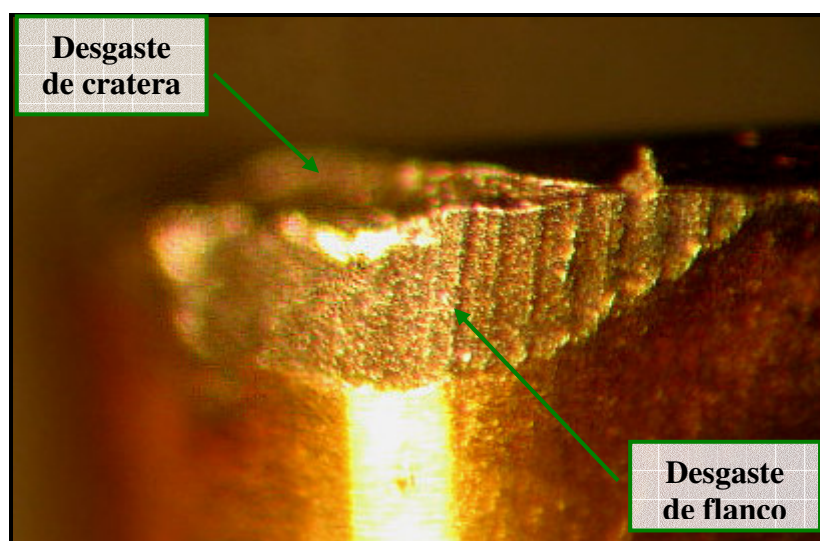


Figura 5.12- Desgastes na ferramenta após atingir critério de fim de vida, para  $V_c=200$  m/min,  $f=0,05$  mm/v e  $a_p=0,15$  mm.

Percebe-se na Figura 5.12 a presença de marcas verticais, que evidenciam a ocorrência de desgaste por abrasão mecânica. Tanto o desgaste frontal quanto o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém ela se destaca no desgaste frontal, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido, que é a peça, enquanto a superfície de saída atrita com elemento flexível, que é o cavaco. Este tipo de desgaste é incentivado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta.

A Figura 5.13 mostra a evolução do desgaste da aresta de corte para a condição com  $V_c = 240$  m/min,  $f = 0,10$  mm/v e  $a_p = 0,15$  mm. Nota-se que o desgaste evoluiu de maneira uniforme após o 15º passe de usinagem, atingindo o valor de 0,2 mm ao final do 25º passe e culminando com a quebra da aresta no 29º passe de usinagem.

Um exemplo de quebra ocorrida na ferramenta pode ser visualizado na Figura 5.14. Esta quebra ocorreu para a condição de corte de  $V_c=240$  m/min,  $f=0,10$  mm/v e  $a_p=0,15$  mm, onde se observa a presença do fator mais impactante na redução da vida da ferramenta (o avanço de usinagem) em seu nível máximo, com velocidade de usinagem de 240 m/min, o que contribui para o aumento de vibrações na usinagem.

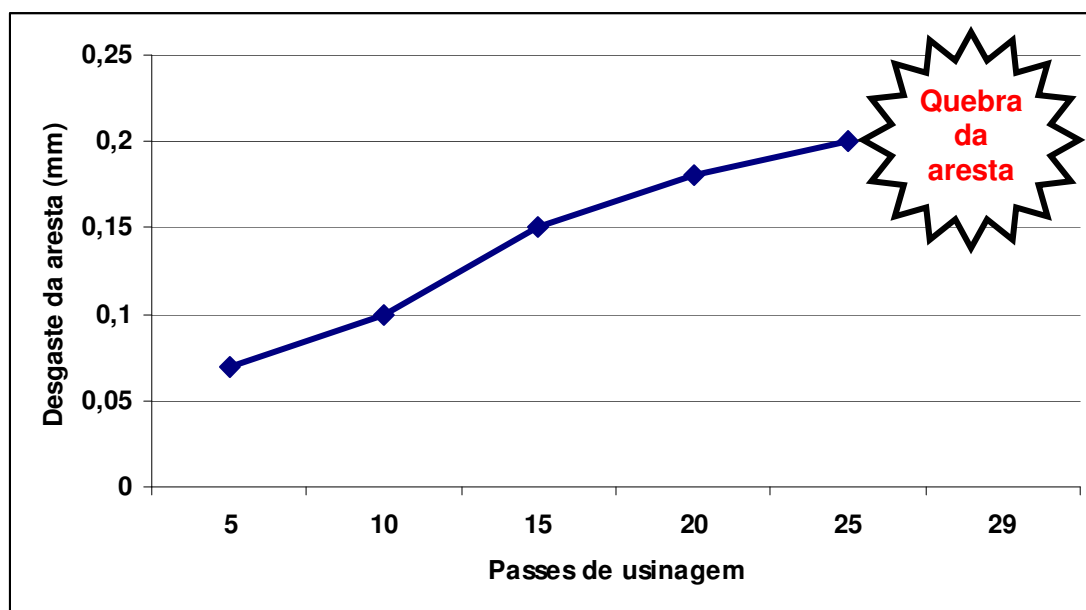


Figura 5.13- Evolução do desgaste para a condição  $V_c = 240$  m/min,  $f = 0,10$  mm/v e  $a_p = 0,15$  mm.

Observa-se na Figura 5.14 um acentuado desgaste de cratera, que ocorreu na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco. O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, como pode ser visualizado na Figura 5.14. A quebra se dá quando o desgaste de cratera progride até se encontrar com o desgaste frontal, sendo esta situação agravada, neste caso, pela falta de rigidez do torno.

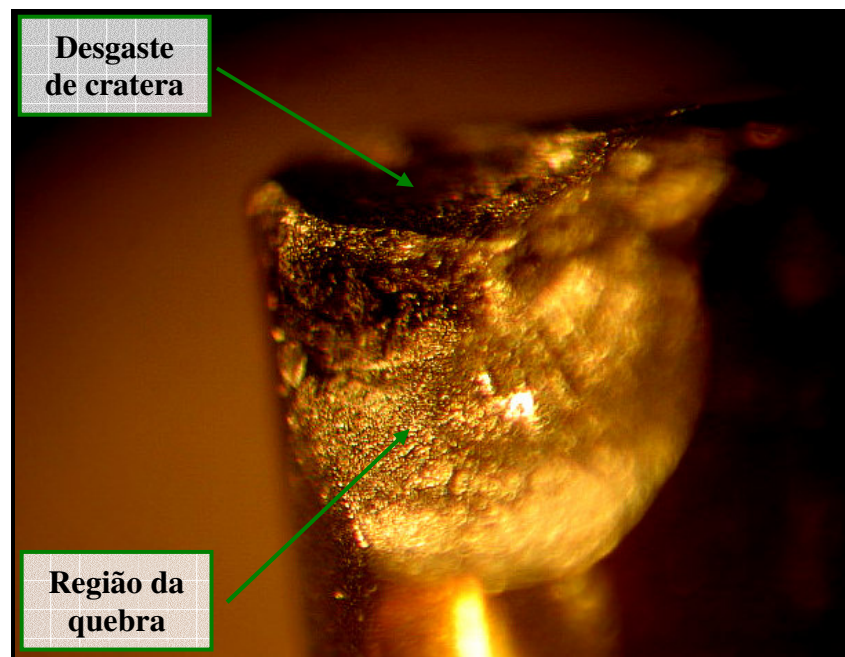


Figura 5.14- Quebra da ferramenta para a condição  $V_c=240$  m/min,  $f=0,10$  mm/v e  $a_p=0,15$  mm.

Foram observadas nos experimentos, ocorrências de lascamentos e quebras de arestas de corte, principalmente para as condições mais severas de usinagem. Nestas condições tornam-se mais acentuados os esforços de corte e a vibração do sistema, ocasionada tanto pela alta velocidade de usinagem como pela falta de rigidez do torno. Outro ponto que pode contribuir para a ocorrência dos lascamentos e quebras é o fato do torneamento ter sido realizado com ferramentas cerâmicas, as quais, devido à sua baixa tenacidade e elevada dureza, tornam-se extremamente sensíveis às vibrações de um sistema de menor rigidez.

## 5.5 Modelo para Rugosidade

Neste item será estudado o acabamento superficial das peças do aço ABNT 52100, sob diferentes combinações de parâmetros de usinagem, como observado na Tabela 5.9. Para isto será utilizada a metodologia de projeto de experimentos, conforme realizado para o estudo da vida da ferramenta.

Tabela 5.9- Fatorial completo  $2^3$  com *center points* para a resposta rugosidade superficial  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ).

<i>Nº do ensaio</i>	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/v)	$a_p$ (mm)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
1	200	0,05	0,15	-1	-1	-1	0,38
2	240	0,05	0,15	1	-1	-1	0,27
3	200	0,10	0,15	-1	1	-1	0,53
4	240	0,10	0,15	1	1	-1	0,60
5	200	0,05	0,30	-1	-1	1	0,24
6	240	0,05	0,30	1	-1	1	0,38
7	200	0,10	0,30	-1	1	1	0,48
8	240	0,10	0,30	1	1	1	0,66
9	200	0,05	0,15	-1	-1	-1	0,28
10	240	0,05	0,15	1	-1	-1	0,29
11	200	0,10	0,15	-1	1	-1	0,76
12	240	0,10	0,15	1	1	-1	0,53
13	200	0,05	0,30	-1	-1	1	0,25
14	240	0,05	0,30	1	-1	1	0,46
15	200	0,10	0,30	-1	1	1	0,65
16	240	0,10	0,30	1	1	1	0,56
17	220	0,075	0,225	0	0	0	0,36
18	220	0,075	0,225	0	0	0	0,42
19	220	0,075	0,225	0	0	0	0,37
20	220	0,075	0,225	0	0	0	0,29

Através da elaboração de um arranjo fatorial completo com quatro *center points* proceder-se-á à análise dos dados obtidos experimentalmente. A Tabela 5.9 apresenta os resultados da rugosidade superficial ( $R_a$ ) em  $\mu\text{m}$  da ferramenta de cerâmica mista para as oito condições ensaiadas necessárias à obtenção dos *factorial points*, seguidos de suas respectivas réplicas mais os *center points*.

São apresentados na Figura 5.15 os valores de rugosidade ( $R_a$ ) da superfície usinada, expressos em  $\mu\text{m}$ , para cada uma das condições ensaiadas e suas respectivas réplicas. Nos experimentos foram variados os parâmetros de velocidade de corte ( $V_c$ ) entre os níveis 200 m/min e 240 m/min, avanço de usinagem ( $f$ ) entre os níveis 0,05 mm/v e 0,10 mm/v e profundidade de usinagem ( $a_p$ ) entre os níveis 0,15 mm e 0,30 mm, sendo que em todos os ensaios foram utilizadas pastilhas cerâmicas mistas recobertas com Nitreto de Titânio.

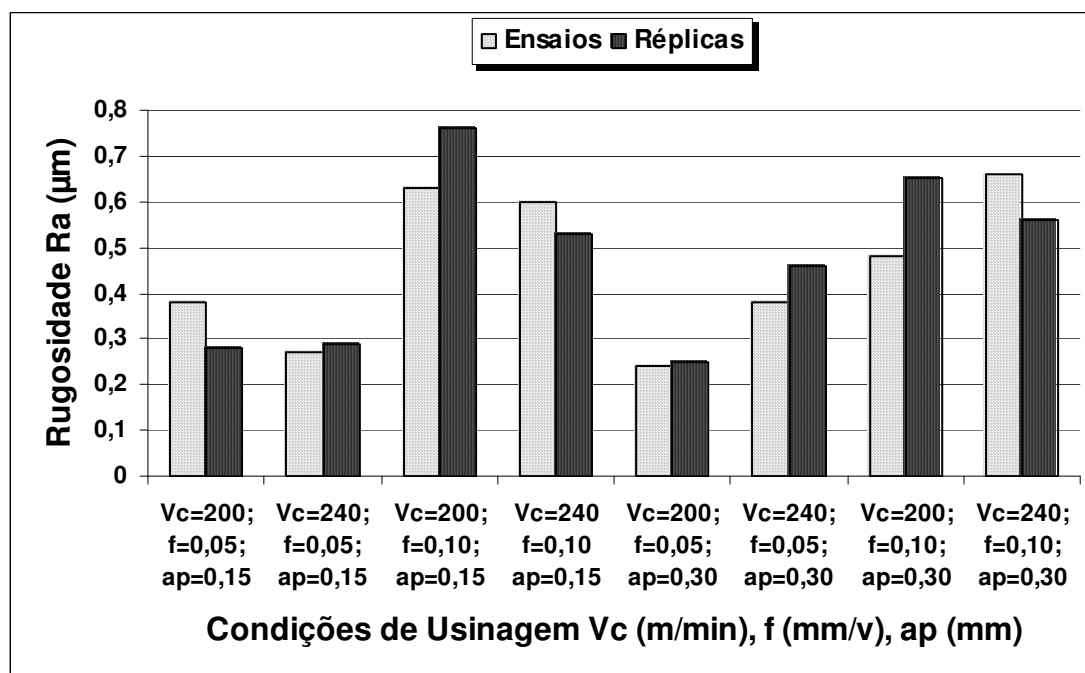


Figura 5.15- Rugosidade da superfície usinada e respectivas réplicas, medidas após último passe de usinagem.

Nota-se uma grande coerência entre os valores ensaiados e suas réplicas para os valores de rugosidade superficial, as quais foram tomadas após o último passe de usinagem,

respeitando-se o critério de fim de vida da ferramenta de  $V_B \leq 0,3$  mm ou quebra da ferramenta.

Utilizando-se os dados da Tabela 5.9, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) do fatorial completo para os três fatores em dois níveis ( $2^3$ ), com *center points*, para a resposta rugosidade. A análise de variância gerou a Tabela 5.10, através da qual se observa um *P-value* para o teste de curvatura com um valor inferior ao nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%. Isto demonstra, que os níveis escolhidos conduzem a uma resposta próxima à região de ótimo. Baseado nestas evidências se procederá ao processo de ajuste da resposta do experimento utilizando-se o *Central Composite Design (CCD)*.

Tabela 5.10- ANOVA do fatorial completo  $2^3$  para rugosidade média ( $R_a$ ).

<i>TERMO</i>	<i>EFEITO</i>	<i>COEF</i>	<i>SE COEF</i>	<i>T</i>	<i>P</i>
Constante		0,4638	0,0164	28,26	0,000
$V_c$	0,010	0,0050	0,0164	0,30	0,766
$f$	0,290	0,1450	0,0164	8,84	0,000
$a_p$	-0,008	-0,0037	0,0164	-0,23	0,823
$V_c \times f$	-0,053	-0,0262	0,0164	-1,65	0,138
$V_c \times a_p$	0,100	0,0500	0,0164	3,05	0,011
$f \times a_p$	-0,035	-0,0175	0,0164	-1,07	0,309
$V_c \times f \times a_p$	-0,013	-0,0062	0,0164	-0,38	0,711
<i>Center Point</i>		-0,1038	0,0367	-2,83	0,016

<i>FONTE</i>	<i>DF</i>	<i>SEQ SS</i>	<i>ADJ SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Efeitos Principais	3	0,337	0,337	0,1123	26,07	0,000
Interações 2ª.Ordem	3	0,056	0,056	0,0186	4,33	0,030
Interações 3ª.Ordem	1	0,001	0,001	0,0006	0,15	0,711
Curvatura	1	0,034	0,034	0,0344	7,99	0,016
Erro Residual	11	0,047	0,047	0,0043		
Erro Puro	11	0,047	0,047	0,0043		
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>0,475</b>				



Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos fatores e suas respectivas interações, sobre os valores da rugosidade média é fornecida pela Figura 5.16. Pode-se observar que o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média é o avanço de usinagem (f). Segue-se a este fator, considerando-se o nível de significância sobre os valores da rugosidade média, a interação dupla entre a velocidade e profundidade de usinagem, porém com um nível de significância inferior ao nível de significância do avanço de usinagem.

Ressalta-se que estes resultados são válidos apenas para o torneamento do aço ABNT 52100 temperado, usinado com ferramentas de cerâmica mista ( $Al_2O_3 + TiC$ ), recoberta com TiN (geometria: ISO CNGA 120408 S01525) e com os parâmetros de corte variando nos níveis já mencionados neste trabalho.

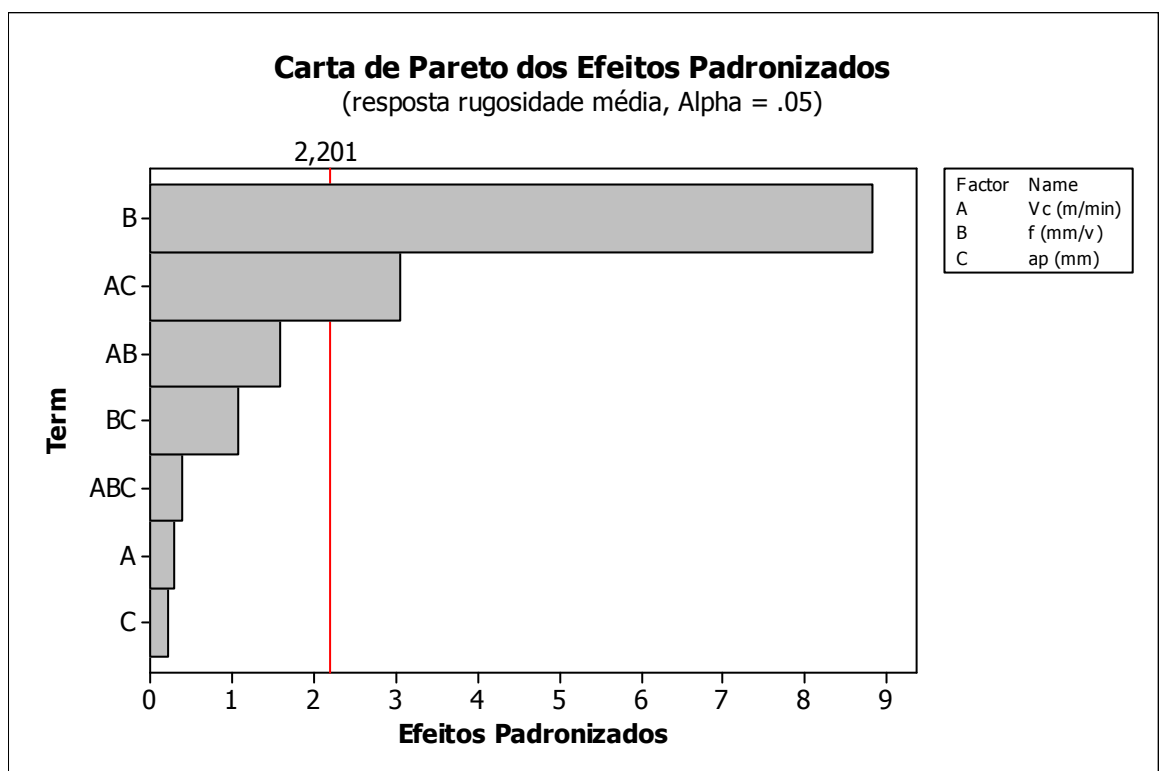


Figura 5.16- Diagrama de Pareto para os efeitos padronizados para rugosidade média.

Observando a Figura 5.17, que fornece o gráfico dos efeitos principais  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  na rugosidade média da superfície da peça, pode-se notar que, dentre todos os efeitos principais, apenas o avanço de usinagem ( $f$ ) possui influência significativa sobre o valor da rugosidade média.

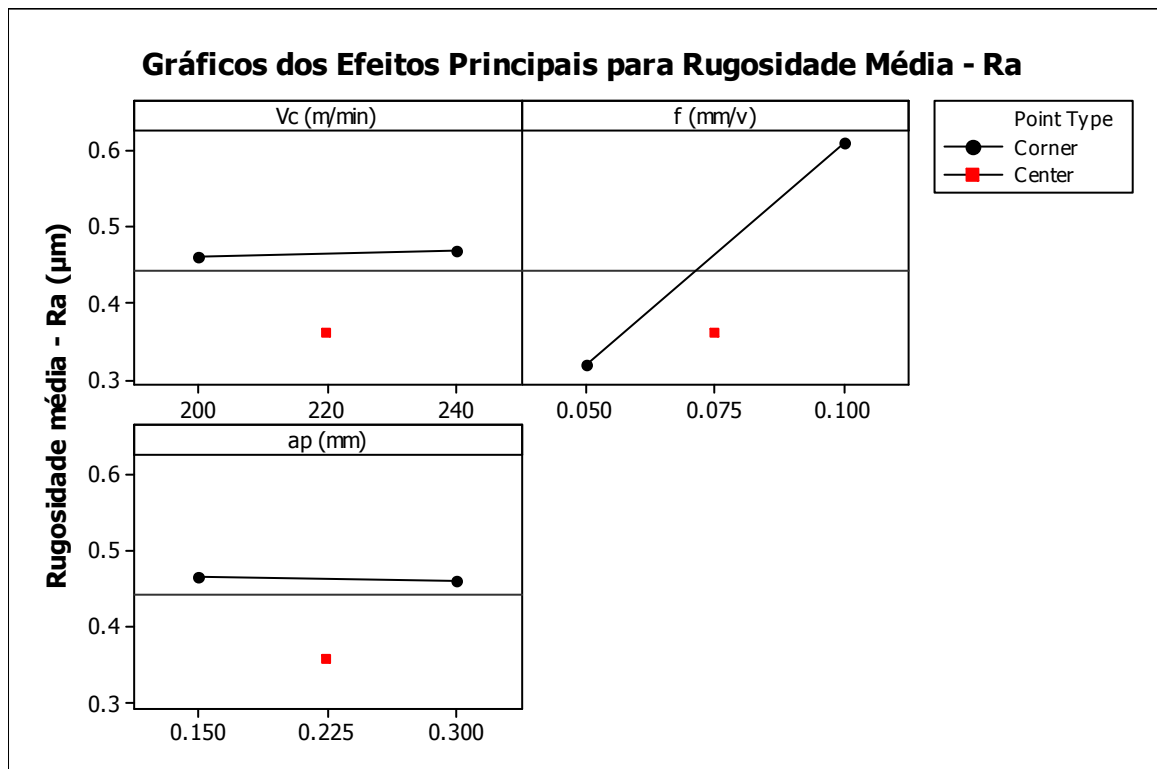


Figura 5.17- Gráficos dos efeitos principais  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  na rugosidade média.

A Figura 5.18 exibe o gráfico das interações dos fatores para rugosidade média da superfície usinada. Através dele pode-se observar a influência da variação de mais de um parâmetro, simultaneamente, na rugosidade média. Nota-se uma interação significativa entre fatores  $V_c$  e  $a_p$ , evidenciada por uma acentuada alteração no valor da rugosidade média, quando alteramos estes dois valores simultaneamente. Já a interação entre os demais fatores estudados, ou seja, entre  $V_c$  e  $f$  e entre  $f$  e  $a_p$ , parece não exercer influência expressiva nos valores da resposta em estudo ( $R_a$ ).

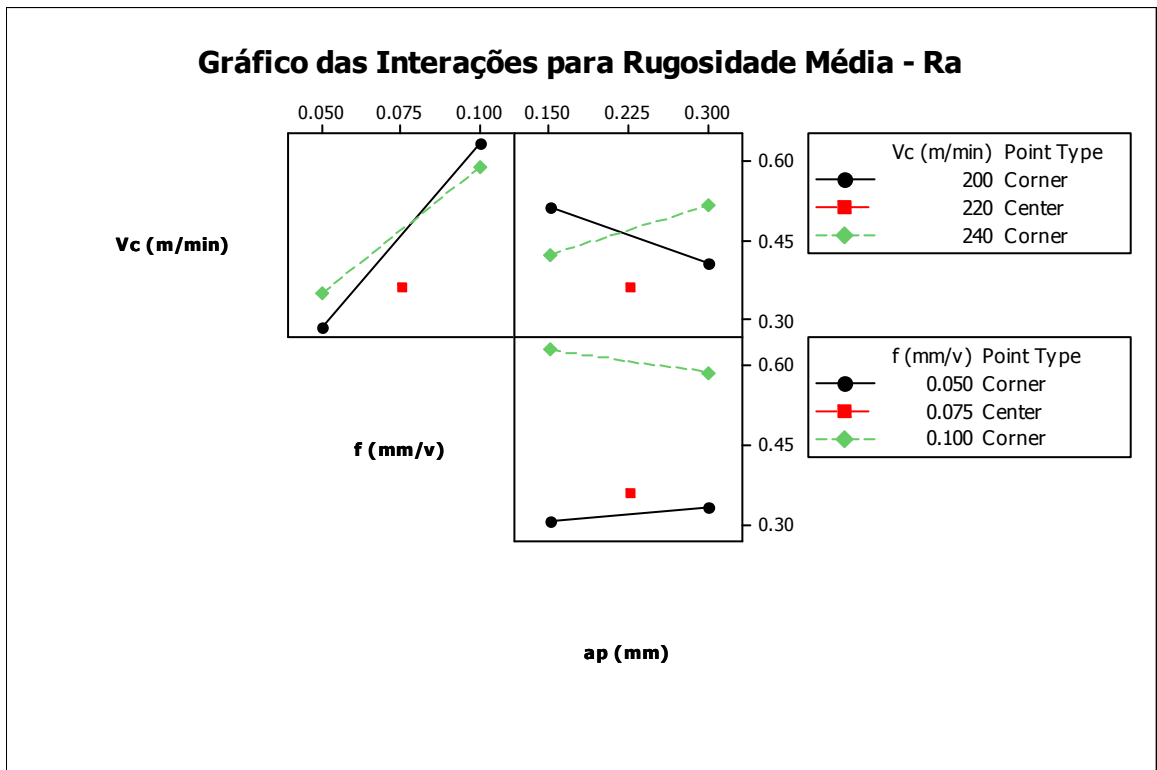


Figura 5.18- Gráficos das interações dos efeitos na rugosidade média.

Para a realização do ajuste da resposta obtida a partir do fatorial completo, serão utilizados os resultados do referido arranjo, executando-se para complemento, os pontos axiais, de forma análoga ao realizado na Tabela 5.3. Conforme resultados obtidos anteriormente, durante o estudo da resposta vida, conclui-se que não se faz necessário o uso da blocagem. Serão utilizadas como valores da rugosidade média ( $R_a$ ), as médias aritméticas simples entre os valores obtidos nos experimentos e em suas respectivas réplicas.

Tabela 5.11- Parâmetros de corte e resultados para o RSM da resposta rugosidade média.

<i>Nº do ensaio</i>	<i>Bloco</i>	<i>V<sub>c</sub></i> ( <i>m/min</i> )	<i>f (mm/v)</i>	<i>a<sub>p</sub> (mm)</i>	<i>x<sub>1</sub></i>	<i>x<sub>2</sub></i>	<i>x<sub>3</sub></i>	<i>Ra (µm)</i>
1	1	200	0,05	0,15	-1	-1	-1	0,33
2	1	240	0,05	0,15	1	-1	-1	0,28
3	1	200	0,10	0,15	-1	1	-1	0,695
4	1	240	0,10	0,15	1	1	-1	0,565
5	1	200	0,05	0,30	-1	-1	1	0,245
6	1	240	0,05	0,30	1	-1	1	0,42
7	1	200	0,10	0,30	-1	1	1	0,565
8	1	240	0,10	0,30	1	1	1	0,61
9	1	220	0,075	0,225	0	0	0	0,36
10	1	220	0,075	0,225	0	0	0	0,42
11	1	186,364	0,075	0,225	-1,682	0	0	0,34
12	1	253,636	0,075	0,225	1,682	0	0	0,45
13	1	220	0,03296	0,225	0	-1,682	0	0,32
14	1	220	0,11705	0,225	0	1,682	0	0,72
15	1	220	0,075	0,09887	0	0	-1,682	0,36
16	1	220	0,075	0,35113	0	0	1,682	0,31
17	1	220	0,075	0,225	0	0	0	0,37
18	1	220	0,075	0,225	0	0	0	0,29

Procedendo-se como realizado no estudo da resposta vida, conclui-se, baseado nos dados da Tabela 5.12, que os únicos termos significativos para a compreensão do comportamento da rugosidade média são o avanço ( $f$ ) e o termo quadrático ( $f \times f$ ).

Tabela 5.12- ANOVA da superfície de resposta, para a resposta rugosidade média ( $R_a$ ).

<i>TERMO</i>	<i>COEF</i>	<i>SE COEF</i>	<i>T</i>	<i>P</i>
Constante	0,357	0,0251	14,267	0,000
$V_c$	0,016	0,0136	1,212	0,260
f	0,134	0,0136	9,870	0,000
$a_p$	-0,008	0,0136	-0,614	0,556
$V_c \times V_c$	0,021	0,0141	1,545	0,161
f x f	0,066	0,0141	4,673	0,002
$a_p \times a_p$	0,001	0,0141	0,043	0,967
$V_c \times f$	-0,026	0,0178	-1,478	0,178
$V_c \times a_p$	0,050	0,0178	2,815	0,023
f x $a_p$	0,017	0,0178	-0,985	0,353

S = 0,050                      R-Sq = 94,4 %                      R-Sq (adj) = 88,0 %

<i>FONTE</i>	<i>DF</i>	<i>SEQ SS</i>	<i>ADJ SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Regressão	9	0,337	0,337	0,037	14,85	0,000
Linear	3	0,251	0,251	0,084	33,09	0,000
Quadrático	3	0,059	0,059	0,020	7,77	0,009
Interação	3	0,028	0,028	0,009	3,69	0,062
Erro Residual	8	0,020	0,020	0,003		
Falta de Ajuste	5	0,012	0,012	0,002	0,81	0,611
Erro Puro	3	0,009	0,009	0,003		
Total	17	0,358				

Poder-se-ia pressupor à primeira vista que um modelo reduzido pudesse ser construído apenas com estes dois parâmetros ( $f$  e  $f \times f$ ). Empregando-se esta combinação, obtém-se um ajuste de 83,7% com um desvio padrão  $S = 0,0616$ ; entretanto, atentando-se para o princípio da hierarquia descrito por Montgomery (1997), pode-se observar que, como a interação entre  $V_c$  e  $a_p$  é significativa, os termos de primeira ordem  $V_c$  e  $a_p$  devem ser mantidos no modelo. Considerando, entretanto, estes dois termos, o ajuste do modelo cai para 81,4% e  $S = 0,062$ . Como a explicabilidade do modelo não é satisfatória com estas considerações, optou-se por utilizar o modelo quadrático completo.

Desta forma, o modelo estatístico para a rugosidade média ( $R_a$ ) é dado, em sua forma codificada, pela equação 5.3, onde deve-se substituir os termos  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  pelos seus níveis codificados para encontrar-se o valor de  $R_a$ :

$$R_a = 0,357 + 0,016 * V_c + 0,134 * f - 0,008 * a_p + 0,021 * V_c^2 + 0,066 * f^2 + 0,001 * a_p^2 - 0,026 * V_c * f + 0,050 * V_c * a_p - 0,017 * f * a_p \quad (5.3)$$

A análise de regressão do modelo descrito pela equação 5.3 apresenta um  $R^2$  (adj) igual a 88% e um termo de erro  $S$  igual a 0,050, o que denota a excelente adequação do modelo. Também neste caso, não é necessário se investigar um modelo de ordem mais alta.

Com a equação 5.3 pode-se analisar a superfície de resposta gerada para a variável Rugosidade média, empregando-se a avaliação do ponto estacionário. Considerando-se os coeficientes do modelo fornecido pela equação 5.3, o ponto estacionário será dado por:

$$b = \begin{bmatrix} 0,016 \\ 0,134 \\ -0,008 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,021 & -0,0130 & 0,0250 \\ 0,013 & 0,0660 & 0,0085 \\ 0,0250 & 0,0085 & 0,0010 \end{bmatrix} \Rightarrow x_s = \begin{bmatrix} -0,20148 \\ -1,15136 \\ -0,74946 \end{bmatrix}$$

Novamente, esta é uma solução obtida em unidades codificadas. Decodificando-a, tem-se que:

$$V_c = \frac{x-220}{20} = -0,20148 \therefore V_c = 215,97 \text{ m/min}$$

$$f = \frac{x-0,075}{0,025} = -1,1536 \therefore f = 0,0462 \text{ mm/v}$$

$$a_p = \frac{x-0,225}{0,075} = -0,74946 \therefore a_p = 0,16879 \text{ mm}$$

Pode-se perceber claramente que os valores para o avanço e a profundidade de corte se aproximam muito da condição experimental (-1; -1), ou seja, avanço de 0,05 e profundidade de corte de 0,15. Como observado na análise precedente, estes níveis concorrem para a maximização da vida da ferramenta, enquanto minimizam a rugosidade superficial. Calculando-se os autovalores da matriz  $[B]$  tem-se, respectivamente:

$$\lambda_1 = 0,073;$$

$$\lambda_2 = 0,031;$$

$$\lambda_3 = -0,016$$

(5.4)

Autovalores positivos sugerem um ponto de mínimo; entretanto, como o conjunto de autovalores apresentou valores mistos, pode-se considerar que a superfície de resposta tende levemente para uma inflexão. Contudo, como o autovalor que demonstra isto é, comparativamente, o menor de todos (-0,016), pode-se praticamente relevar este aspecto, e considerar a superfície com concavidade positiva (voltada para cima). Isto sugere que os níveis calculados na análise canônica precedente conduzem à minimização da resposta.

Analisando-se, entretanto, a Figura 5.16 e a Tabela 5.12, conclui-se que o avanço é o fator de maior impacto sobre a rugosidade, sendo que a interação entre velocidade e profundidade de corte também é significativa, mas exerce menor influência. Neste caso, o

nível que minimiza a rugosidade é o mesmo adotado para a Vida, ou seja,  $f = 0,05$  mm/volta. Como os outros dois parâmetros ( $V_c$  e  $a_p$ ) são estatisticamente indiferentes (não significativos) quando analisados isoladamente, conforme mostra a Figura 5.17, torna-se interessante adotar para os mesmos os níveis que maximizam a vida da ferramenta, que são  $V_c = 200$  m/min e  $a_p = 0,15$  mm.

A Figura 5.19 apresenta a superfície de resposta para a rugosidade média em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de corte de 0,225 mm, enquanto que a Figura 5.20 exibe o gráfico de contorno para a rugosidade média em função da velocidade e avanço de corte. A análise dos gráficos, tanto a superfície de resposta, como o gráfico de contorno, evidenciam o fato de que, o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média da superfície usinada é o avanço de corte ( $f$ ). A influência causada pelo avanço de corte no acabamento superficial pode ser facilmente visualizada quando comparamos os valores de rugosidade medidos nos ensaios, na Figura 5.15.

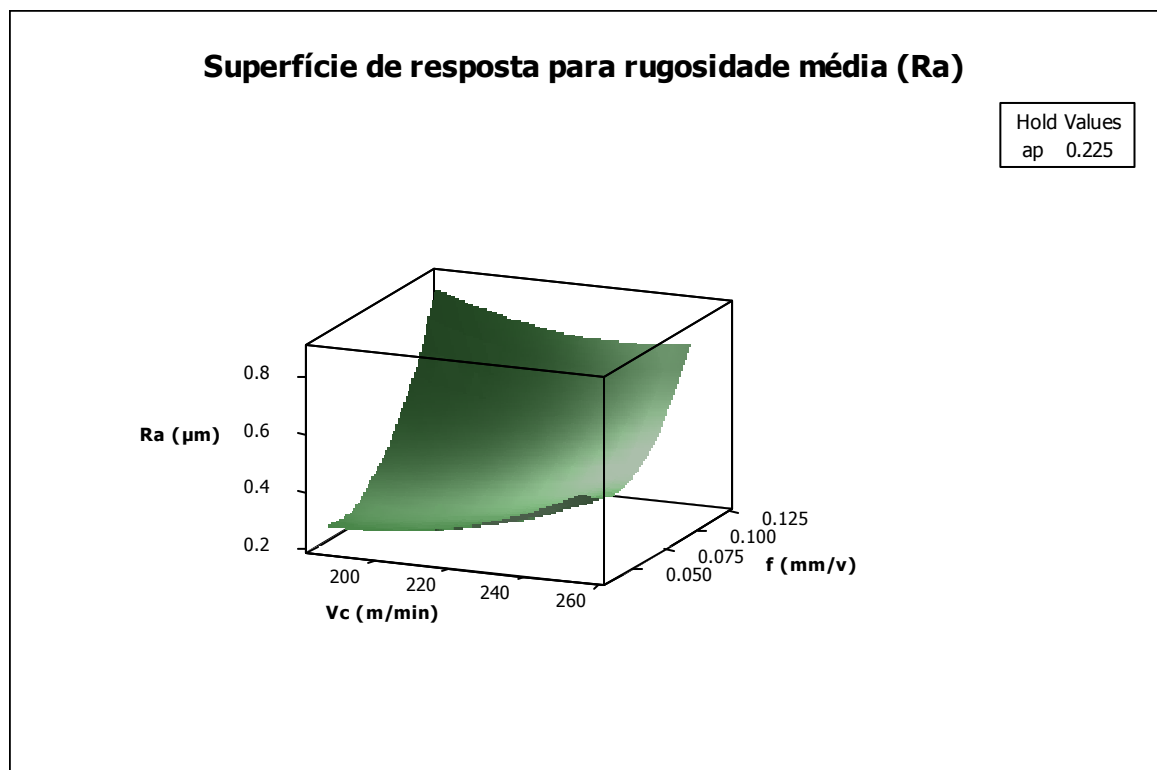


Figura 5.19- Superfície de resposta para rugosidade média ( $R_a$ ).



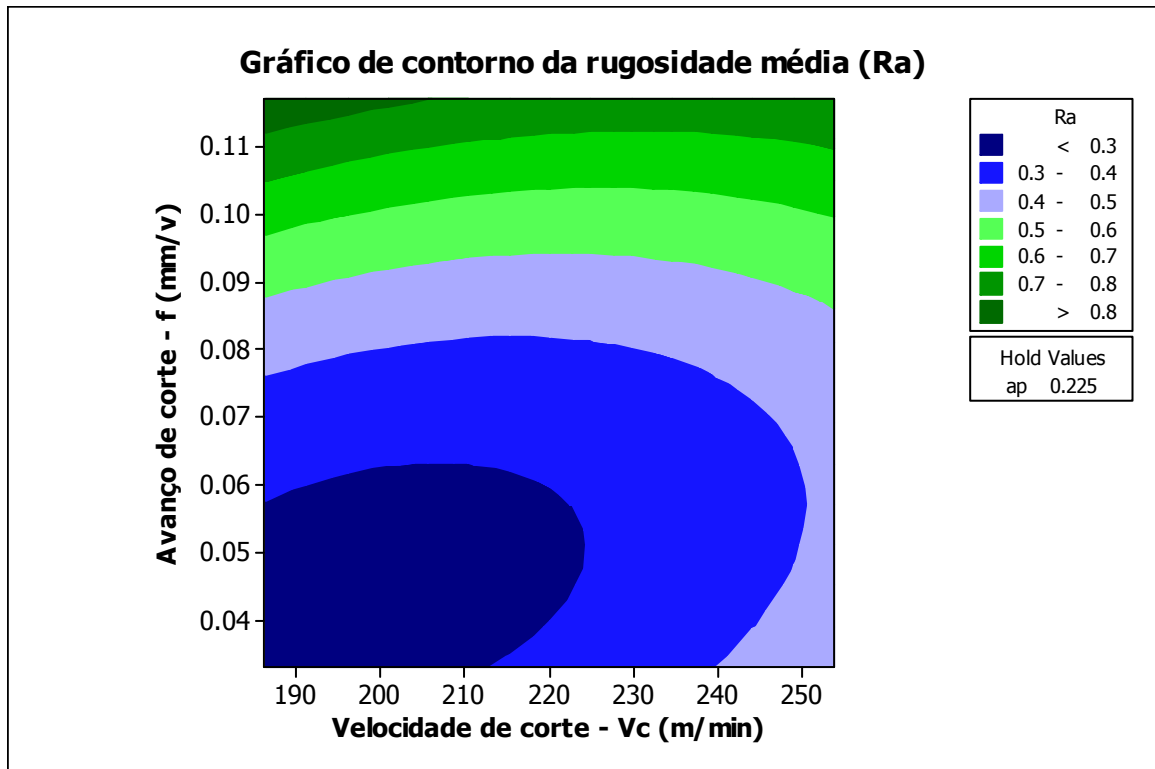


Figura 5.20- Gráfico de contorno para rugosidade média ( $R_a$ ).

Na Figura 5.21, é mostrado a independência dos resíduos em relação à ordem em que foram realizados os experimentos. Como não se nota a existência de correlação entre a magnitude do resíduo e o experimento que o originou, pode-se afirmar que os resíduos são independentes. Analogamente, a Figura 5.22 demonstra que não há correlação entre um resíduo e seu respectivo valor ajustado da rugosidade média.

Como não são evidenciados padrões de anormalidade nos resíduos, os resultados descritos neste trabalho podem ser considerados válidos.

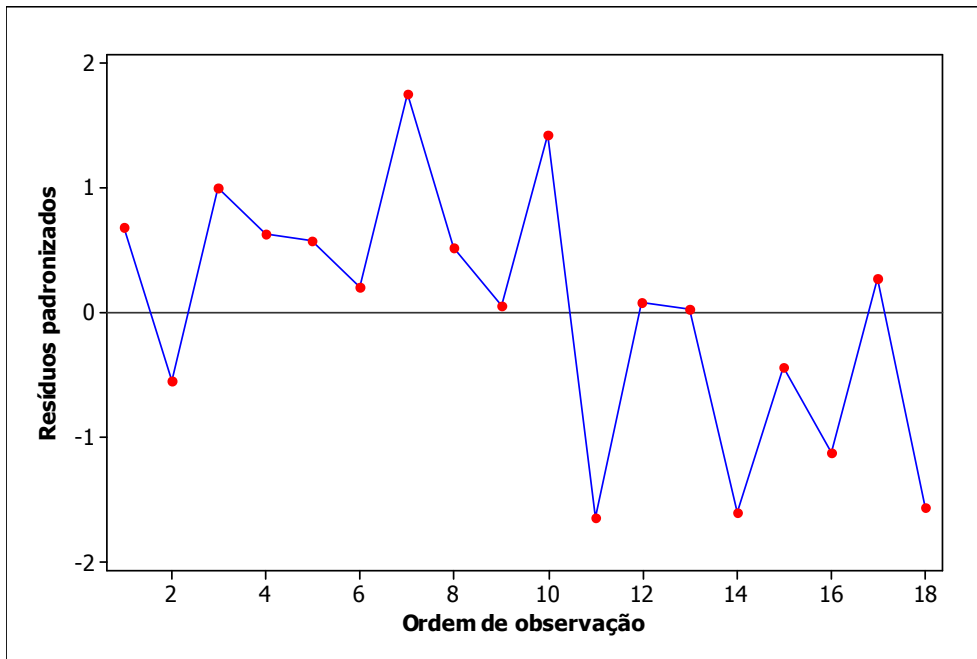


Figura 5.21- Resíduos versus ordem de execução dos experimentos.

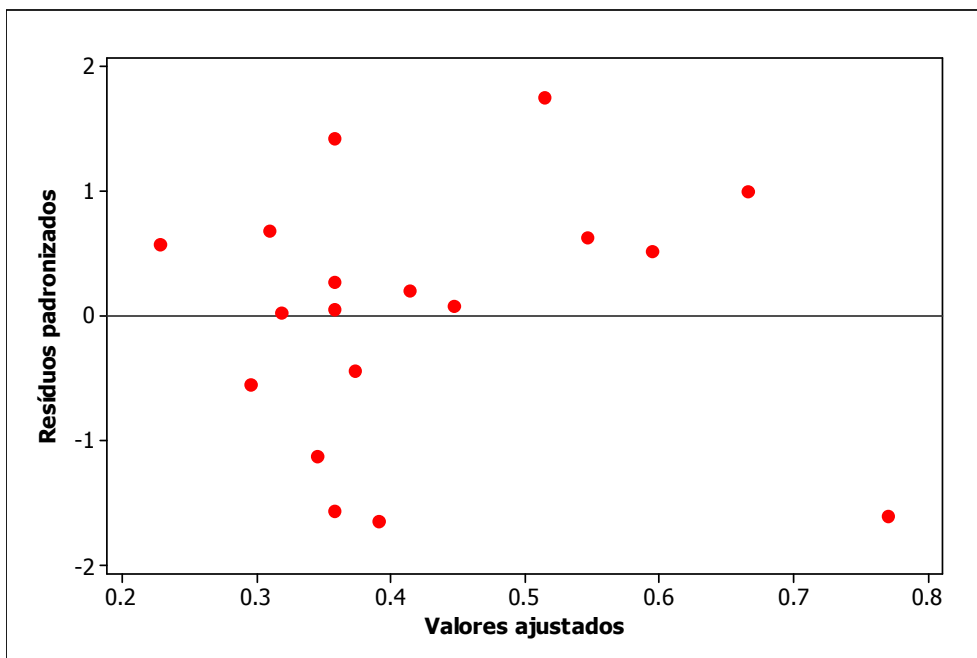


Figura 5.22- Resíduos versus valores ajustados da resposta rugosidade média.

Ao analisar-se na Figura 5.15 o comportamento da rugosidade após o último passe de usinagem, percebe-se que para os ensaios que utilizaram avanço de 0,05 mm/v, a rugosidade manteve-se dentro dos limites considerados equivalentes ao processo de retificação convencional - máximo 0,60  $\mu\text{m}$  segundo Diniz e Matsumoto (1999); atingindo o valor máximo de 0,46  $\mu\text{m}$  para a condição com  $V_c = 240$  m/min e  $a_p = 0,30$  mm. Porém, quando foi utilizado avanço de 0,10 mm/v, os valores de rugosidade chegaram a ultrapassar esse limite em alguns ensaios, atingindo o valor de 0,76  $\mu\text{m}$  para a condição com  $V_c = 200$  m/min e  $a_p = 0,15$  mm.

Um fato interessante observado no comportamento das curvas de rugosidade, Figuras 5.23 e 5.24, é a oscilação dos valores à medida que são usinadas as peças. Isto pode ser explicado pelo aparecimento de pequenos lascamentos ocorridos de forma sucessiva a medida em que as peças foram sendo usinadas, lascamentos estes que modificavam constantemente a aresta de corte, contribuindo para a oscilação dos valores da rugosidade média. Para o aparecimento destes pequenos lascamentos, um fator preponderante foi o excesso de vibração, ocorrido devido à falta de rigidez do torno e agravado pelas severas condições de usinagem.

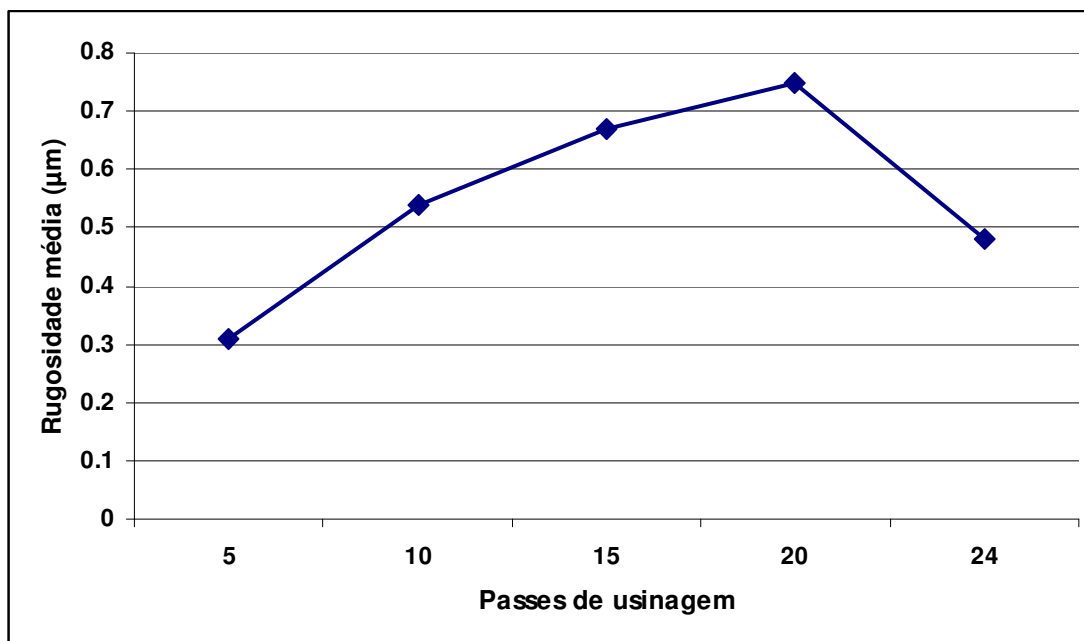


Figura 5.23- Evolução da rugosidade para a condição  $V_c = 200$  m/min,  $f = 0,10$  mm/v e  $a_p = 0,30$  mm.

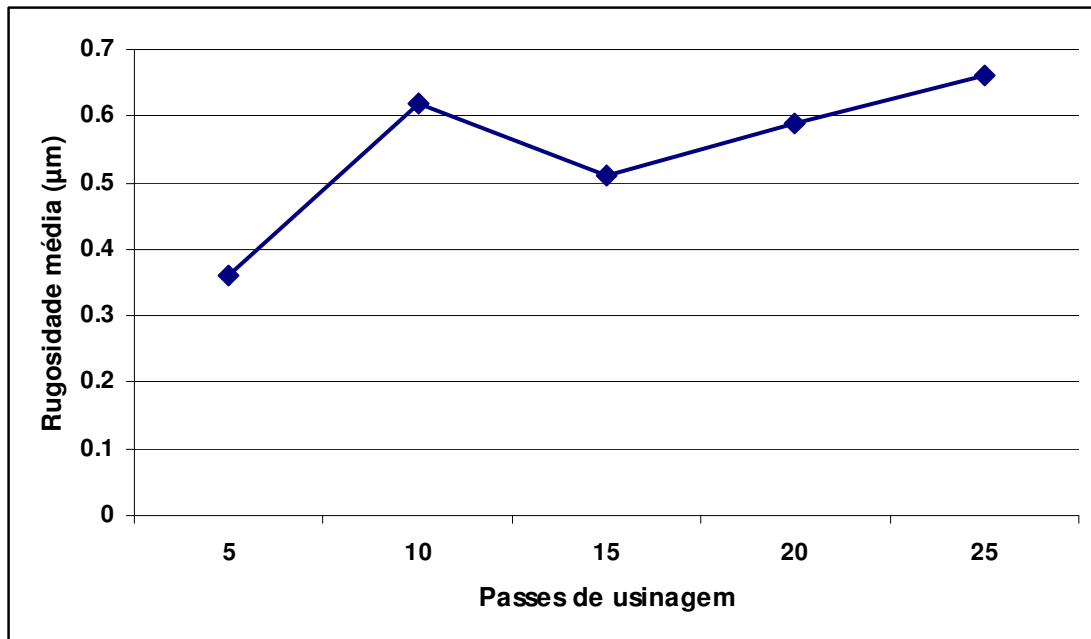


Figura 5.24- Evolução da rugosidade para a condição  $V_c = 240$  m/min,  $f = 0,10$  mm/v e  $a_p = 0,30$  mm.

Este estudo demonstra, portanto, que não há divergência entre a escolha dos melhores níveis. Assim, velocidades de corte abaixo de 200 m/min, avanços inferiores a 0,05 mm/volta e profundidades de corte menores que 0,15 mm, promovem uma vida maior para as ferramentas e menor rugosidade da peça.

## 5.6 Experimentos de Confirmação

A equação 5.3 nos fornece um modelo de previsão da rugosidade média, obtido a partir do modelo quadrático completo gerado pelo *Central Composite Design*. Substituindo na equação 5.3 os valores codificados para a condição de ótimo, ou seja, o nível -1 para o fator avanço de corte ( $f$ ) e para os fatores não significativos, os níveis que maximizam a vida da ferramenta, que são -1 para  $V_c$  e  $a_p$ , obtém-se a previsão de rugosidade  $R_a$  da peça.

Equação codificada para previsão da rugosidade média ( $R_a$ ):

$$Ra = 0,357 + 0,016 * V_c + 0,134 * f - 0,008 * a_p + 0,021 * V_c^2 + 0,066 * f^2 + \\ + 0,001 * a_p^2 - 0,026 * V_c * f + 0,050 * V_c * a_p - 0,017 * f * a_p$$

Substituindo os valores  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  pelos níveis inferiores codificados (-1, -1 e -1), tem-se que:

$$Ra = 0,31$$

O que significa uma rugosidade média ( $R_a$ ) de 0,31  $\mu\text{m}$  na condição de ótimo.

Foram realizados cinco experimentos adicionais, para a confirmação da rugosidade média na condição de ótimo, sendo que os valores obtidos nestes ensaios são os constantes da Tabela 5.13.

Tabela 5.13- Valores de rugosidade média dos experimentos de confirmação para a condição  $V_c=200$  m/min,  $f=0,05$  mm/v e  $a_p=0,15$  mm.

<i>Nº do experimento</i>	<i>R<sub>a</sub> (<math>\mu\text{m}</math>)</i>
1	0,20
2	0,39
3	0,27
4	0,46
5	0,36

Calculando-se a média aritmética simples dos valores encontrados para a rugosidade média nos experimentos de confirmação, obtém-se o valor de  $R_a = 0,34$   $\mu\text{m}$ . Comparando-se este valor com o valor teórico obtido pelo modelo ( $R_a = 0,31$   $\mu\text{m}$ ), encontra-se uma diferença de 8,4%.

Entretanto, deve-se atentar para o fato de que a rugosidade média é um parâmetro que apresenta elevada oscilação de valores. Portanto, para chegar-se a um valor mais próximo do real, torna-se necessário realizar vários ensaios nas mesmas condições para calcular-se a média, como o procedimento apresentado nos experimentos de confirmação.

Observando-se a análise estatística da Figura 5.25, realizada com os dados dos experimentos de confirmação, nota-se que o valor previsto pelo modelo também pertence ao intervalo de 95% para a Rugosidade Média ( $0,209 < Ra < 0,463$ ).

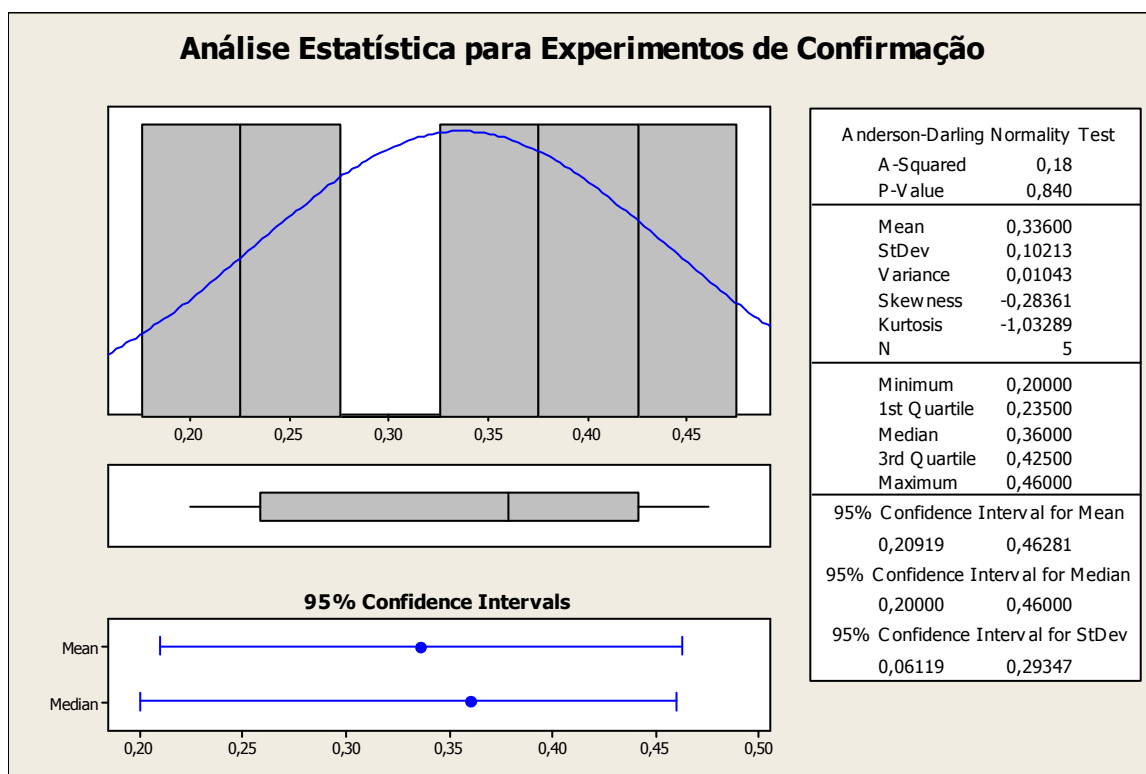


Figura 5.25- Análise estatística para os experimentos de confirmação.

Como demonstração da viabilidade da solução encontrada, pode-se construir um gráfico que ilustre a sobreposição das respostas na região de interesse. Este é o gráfico da Figura 5.26 a seguir. Este gráfico confirma as soluções ótimas encontradas para a vida da ferramenta e a rugosidade média, quando são adotados os níveis inferiores dos três parâmetros estudados.

Neste gráfico, a região representada pela cor branca é chamada de região viável, ou seja, a região de combinação dos espaços experimentais que contém a solução comum para as funções objetivo. Como este gráfico só é concebível no espaço bidimensional, um terceiro fator experimental deve ser mantido constante. Neste caso, fixou-se a profundidade de corte no seu nível inferior ( $ap = 0,15$ ).

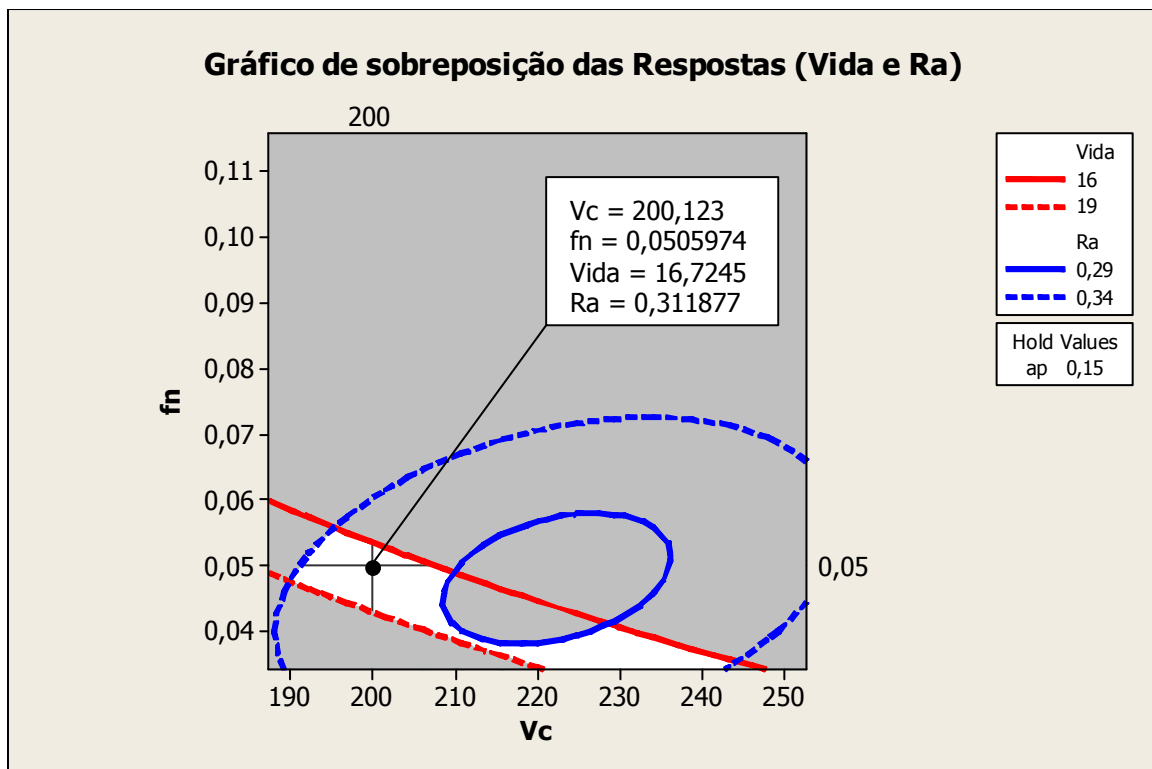


Figura 5.26- Gráfico de sobreposição das curvas de níveis das Superfícies de Resposta para a Vida da Ferramenta e a Rugosidade Média (Ra).

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

#### **6.1 Conclusões**

Neste item serão apresentadas as conclusões obtidas acerca do presente trabalho, apresentado e discutido no decorrer dos capítulos anteriores.

- Os fatores velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de usinagem ( $a_p$ ), exercem influência significativa no tempo de vida da ferramenta, sendo que o aumento de cada um deles contribui para a redução da vida da ferramenta de corte;
- Dentre os fatores analisados, a maior influência exercida sobre o tempo de vida da ferramenta, para as condições ensaiadas, foi devida ao avanço de corte; seguido da profundidade de usinagem, velocidade de corte e das interações entre velocidade-avanço de corte; e entre avanço-profundidade de usinagem;



- No estudo do acabamento superficial, o único fator a exercer grande influência sobre a rugosidade média ( $R_a$ ) foi o avanço de corte, que sempre que aumentado provocou aumento da rugosidade média. Um fator secundário detectado, foi a interação entre velocidade e profundidade de corte (porém com um nível de significância inferior ao do avanço);
- Os modelos de previsão de vida e acabamento superficial obtidos através da metodologia do projeto de experimento (DOE), realizaram previsões muito próximas à realidade, com margem de erro inferior a 5% para ambos os casos; isto mostra a viabilidade do modelamento de processos de usinagem por esta técnica (DOE);
- Para o avanço de corte ( $f$ ) de 0,05 mm/v, é possível obter valores de rugosidade média equivalentes aos valores do processo de retificação convencional, porém, com o avanço de 0,10 mm/v este valor ( $R_a \leq 0,60 \mu\text{m}$ ) foi algumas vezes ultrapassado;
- O excesso de vibração, ocasionado pela falta de rigidez da máquina, principalmente para as condições de corte mais severas, provocou avarias nas ferramentas de corte como pequenos e grandes lascamentos e até mesmo a quebra da ponta da ferramenta, sendo o responsável em alguns casos pelo fim de vida da ferramenta.

## 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Realizar um projeto de experimento (DOE) similar ao deste trabalho, utilizando ferramentas de PCBN para verificar o seu comportamento no tocante a vida da ferramenta e rugosidade média;
- Testar o desempenho das ferramentas de cerâmica mista para as condições ensaiadas, num torno de alta rigidez;
- Realizar este experimento (DOE) utilizando-se ferramentas de geometria alisadora, para verificar se para estas, a influência dos fatores possuirá a mesma ordem de significância nas respostas vida e rugosidade média;
- Estudar a influência da variação dos parâmetros de corte, no torneamento de um aço de baixa dureza, utilizando-se o projeto de experimentos;
- Realizar ensaios comparativos entre os processos de torneamento duro do aço ABNT 52100 e o processo de retificação do mesmo aço.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO, A. M. E ASPINWALL, D. K. (1986).** *The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel.* Wear, v. 196, p. 279 - 284.
- ABRÃO, A. M.; ASPINWALL, D. K.; WISE, M. L. H. (1995).** *Tool wear, cutting forces and temperature evaluation when turning hardened bearing steel using PCBN and ceramic materials.* Proceeding of the Thirty-First International Matador Conference, Manchester, p. 209-16.
- ACODEDJI, E. C. (2003).** *Projective properties of screening designs in economic construction of modelisation or optimization designs.* Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. (1990).** *Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões.* 5ª reimpressão, Editora Edgar Blücher Ltda, São Paulo, p. 295.
- ALMEIDA, C. H. D.; ABRÃO, A. M. (2001).** *A utilização de ferramentas cerâmicas e PCBN no torneamento de peças endurecidas.* COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Curitiba – PR.
- ANDERSON, M. J., KRABER, S. L. (1999).** *Keys to successful designed Experiments.* Quality Digest Magazine, p. 25.

- ANTONY, J.; KATE, M.; FRANGOU, A. (1988).** *A strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques.* The TQM magazine, v. 10, n° 3, p. 169 – 176.
- ÁVILA, R. F.; ABRÃO, A. M. (2000).** *O efeito do uso de fluidos de corte na vida de ferramentas cerâmicas,* Máquinas e Metais, maio, p. 82-92.
- BISCHOF, H. J., ROLLENHAGEN, A. (1999).** *Behavioural and neurophysiological aspects of sexual imprinting in zebra finches.* Behavioural Brain Research, n.98, p.267-276.
- 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, J. S. (1957).** *Experimental design for the exploration and exploitation of response surfaces,* New York, John Wiley & Sons, Inc., p. 138-190.
- BALDONI, J. G.; BULJAN, S. J. T. (1988).** *Ceramics for Machining.* Ceramic Bulletin, v. 67, No. 2, p. 381-387.
- BARKER, T. B. (1985).** *Quality by experimental design.* New York, Marcel Dekker; Milwaukee: ASQC Quality Press. Cap 1 – 2, p. 1 – 22.
- BAS, J. (2001).** *Aços especiais de usinabilidade melhorada.* Máquinas e Metais, n° 422, p. 96 – 113, março.
- BOEHS, L. (1987).** *Resultados atraentes com ferramentas cerâmicas.* Máquinas e Metais, p. 24-7, maio.
- BOIS, F. Y. (2001).** *Applications of population approaches in toxicology.* Toxicology Letters, n.120, p. 385-394.

- BORDUI, D. (1988).** *Hard-part machining with ceramic inserts.* Ceramic Bulletin, v. 67, No. 6, p. 298 – 304.
- BOSSON, P. K. (1991).** *The selection of high and low CBN cutting tool materials for automotive applications.* Superabrasive, p. 1139 – 1160.
- BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. (1987).** *Empirical model-building and response surfaces.* New York, Wiley. (Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics).
- BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. (1978).** *Statistics for Experimenters.* New York, John Wiley & Sons.
- BOX, G. E. P. WILSON, K. B. (1951).** *On the Experimental Attainment of Optimum Conditions.* – With discussion. Journal of the Royal Statistical Society B 13, p. 1-45.
- BREYFOGLE III, F. W. (2000).** *Implementing Six Sigma – Smarter Solutions Using Statistical Methods.* Austin, Texas. John Wiley & Sons.
- BUTTON, S.T. (2001).** *Metodología para planejamento experimental e análise de resultado.* São Paulo, Universidade Estadual de Campinas. /Apostila/
- CHAO, B. T. E TRIGGER, K. J. (1951).** *Cutting temperatures and metal cutting phenomena.* Transactions of the ASME, v. 73/6, p. 777 – 793.
- CHEW, V. (1957).** *Experimental designs in industry.* New York, John Wiley & Sons, Inc. p. 1 – 58.
- CHIAVERINI, V. (1990).** *Aços e ferros fundidos.* Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 6ª ed., 2ª impressão, São Paulo, p. 443-6.

- CHOU, Y. K.; EVANS, C. J.; BARASH, M. M. (2002).** *Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel*, Journal of Material Processing Technology, No. 124, p. 274 – 283.
- COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. (1993).** *A systematic approach to planning for a designed industrial experiment*, Technometrics, v. 35, n.1, p. 1-12.
- COSTA, D. D. (1993).** *Análise dos parâmetros de torneamento de aços endurecidos*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Dissertação de Mestrado, 110 p.
- CUPINI, N. L., FERREIRA, J. R. (1993).** *Turning of carbon and glass fiber hybrid cloth composite material*, NIST-Special Publication, nº 847, p. 447-53.
- DANE, F. C. (1990).** *Research methods*. Califórnia Brooks/Cole. Cap.1-2.
- DAUMEN, J. (2001).** *Nitreto cúbico de boro policristalino para usinar materiais endurecidos*, Máquinas e Metais, abril, p. 30-37.
- DEVOR, R. E., CHANG, T., SUTHERLAND, J. W. (1992).** *Statistical Quality Design and Control – Contemporary concepts and methods*. New Jersey, Prentice Hall, Inc. Cap. 15-20, p.503-744.
- DINIZ, A. E. (1989).** *A rugosidade superficial da peça em processos de torneamento: Critério de fim de vida da ferramenta e fatores de influência*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 152p. Tese de Doutorado.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. (2001).** *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, 3ª ed., Artliber Editora Ltda, São Paulo, 244p.
- DINIZ, A. E.; MATSUMOTO, H. (1999).** *Análise da vida das ferramentas no torneamento de aços endurecidos*, XV COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia – SP.

- DINIZ, A. E.; NORITOMI, P. Y. (2002).** *Influência dos parâmetros de corte na rugosidade de peças torneadas*, Departamento de Engenharia de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP.
- DONG, F. (1993).** *On the identification of active contrasts in unreplicated fractional factorials*. *Statistical Sinica*, n.3, p.209-217.
- DONNANGELO, F.; GEORGETTI, A. D.; SANTOS JR., R. J. S. (2001).** *Torneamento de engrenagens de furo liso em material endurecido*, *Máquinas e Metais*, maio, p. 103-112.
- DRAPER, N., LIN, D. K. J. (1990).** *Capacity Considerations For Two-Level Fractional Factorial Designs*. *Journal of Statistical Planning and Inference*, n.24, p. 25-35.
- DURIG, T., FASSIH, A. R. (1993).** *Identification of stabilizing and destabilizing effects excipient-drug interactions in solid dosage form design*. *International Journal of Pharmaceutics*, n.97, p. 161-170.
- EZUGWU, E. O.; WALLBANK, J. (1987).** *Manufacture and properties of ceramic cutting tools: a review*, *Materials Science and Technology*, v. 3, p. 881-7.
- FERRARESI, D. (1977).** *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Editora Edgard Blucher, São Paulo.
- GALDÁMEZ, E. V. C. (2002).** *Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos na Melhoria da Qualidade de um Processo de Fabricação de Produtos Plásticos*. 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- GANGULI, R. (2002).** *Optimum Design of a Helicopter Rotor for low vibration using aeroelastic analysis and Response Surface Methodology*. *Journal of Sound and Vibration*, v.2, n.258, p. 327-342.

- GIL, A. C. (1988).** *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo, Atlas. p.45-60.
- GRUSS, W. W. (1988).** *Ceramic tools improve cutting performance*, American Ceramic Society Bulletin, v. 67-6, p. 993-6.
- GUANARAJ, V., MURUGAN, N. (2000).** *Prediction and Optimization of Weld Bead Volume for the Submerged Arc Process – Part One*. Welding Research Supplement, p. 286-338, November.
- GUNST, R. F. (2000).** *Randomization Is the Key to Experimental Design Structure*. Quality Progress, p.72-75, February.
- HAALAND, P. D.; O’CONNELL, M.A. (1993).** *Discussion: a systematic approach to planning for a designed industrial experiment*. Coleman, D. E.; Montgomery, D. C. Technometrics, v.35, n.1, p.17-20.
- HAHN, G. J. (1984).** *Discussion: Experimental design: review and comment*. Steinberg, M. D.; Hunter, W. G. Technometrics, v.40, n.3, p.195-213, Aug.
- HOERL, R. W. (2001).** *Six Sigma Black Belts: What Do They Need to Know?* Journal of Quality Technology, v.33, n. 4, October.
- HOPPEN, N.; LAPOINTE, L.; MOREAU, E. (1986).** *Um guia para a avaliação de artigos de pesquisa em sistemas de informação*. Revista eletrônica de administração, v. 2, n. 3, p. 1- 27, nov.
- JACK, D. H. (1986).** *Ceramic cutting tool materials*. Materials & Design, v. 7, No. 5, p. 267-273.
- JOHNSON, R. A., WICHERN, D. W. (1982).** *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.



- JÚNIOR, A. B.; SILVA, L. R.; BEZERRA, A. A.; COELHO, R.T. (2001).** *Desgaste de ferramentas de torneamento usando HSC e MQL*, Máquinas e Metais, p. 284-295, abril.
- JURAN, J. M.; GRINA JR., F. M.; BINHAM JR., R. S. (1951).** *Quality control handbook*, 3ª ed., New York, McGraw-Hill, cap. 27, p. 1-49.
- KLIMENKO, S. A.; MUKOVOZ, Y. A.; LYASHKO, V. A.; OGORODNIK, V. V. (1992).** *On the wear mechanism of cubic boron nitride base cutting tools*. *Wear*, v. 157, nº 1, p. 1-7, agosto.
- KLOCHE, F.; KÖNIG, K. F.; SCHROETER, R. B. (1995).** *Torneamento de precisão: uma opção para o acabamento de peças de aço temperado*. *Máquinas e metais*, p. 56 – 67, outubro 1995.
- KOMANDURI, R. E SAMANTA, K. (1989).** *Ceramics*. *Metals Handbook*, v. 16, p. 98-103, Nona Edição.
- KÖNIG, W.; WAND, TH. (1988).** *Turning bearings steel with amborite & ceramic*. *Industrial Diamond Review*, v. 47/3, p. 117 - 120.
- KÖNIG, W.; KOMANDUI, R.; TÖNSHOFF, H. K.; ACKERSCHOTT, G. (1984).** *Machining of hard materials*, *Annals of the CIRP*, v. 33/2, p. 417-27.
- KRESS, D. (2001).** *A usinagem de materiais endurecidos elimina a retificação*, *Máquinas e Metais*, setembro, p. 18-23.
- LAWSON, J., GRIMSHAW, S., BURT, J. (1998).** *A Quantitative method for identifying active contrasts in unreplicated factorial designs based on the half-normal plot*. *Computational Statistics & Data Analysis*, n.26, p. 425-436.

- LIMA, F. E.; NOVASKI, O.; LORCA, M. C. A.; GUARNIERI, A.; PARANHO, E.; DEZORDI, R.; NÓBREGA, L.; GIBSON, G. (2000).** *Usinagem de materiais endurecidos*. Usinagem 2000 – Feira e Congresso, São Paulo, 11 p.
- LIN, J. F., CHOU, C. C. (2002).** *The response surface method and the analysis of mild oxidational wear*. Tribology International, n.35, p. 771–785.
- MASUI, C. DeCORTE, F. (1999).** *Enhancing learning and problem solving skills: orienting and self-judging, two powerful and trainable learning tools*. Learning and Instruction, n.9, p. 517-542.
- MATSUMOTO, H. (1998).** *Uma contribuição ao estudo do processo de torneamento de aços endurecidos*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Tese de doutorado, 148 p.
- MATSUMOTO, Y.; BARASH, M. M.; LIU, C. R. (1987).** *Cutting mechanism during machining of hardened steel*. Materials Science and Technology, v. 3, p. 299 – 305.
- MATSUMOTO, H.; DINIZ, A. E. (2000).** *A vida das ferramentas no torneamento dos aços endurecidos*, Máquinas e Metais, abril, p. 156-167.
- MCNAMARA, D. S., HEALY, A. (1995).** *A Procedural Explanation of the Generation Effect: The Use of an Operand Retrieval Strategy for Multiplication and Addition Problems*. Journal of Memory and Language, n.34, p.399-416.
- MEYER, L.; STRASSBURGER, C.; SCHNEIDER, C. (1984).** *Effects and present application of the microalloying elements Nb, V, Ti, Zr and B in HSLA steels* – in: HSLA Steels technology e applications, Proceedings of international conference, AMS, Philadelphia, p. 29-44.
- MINITAB RELEASE 14 (2003).** *Statistical Software*, Minitab Inc.

- MOMPER, F. J. (2000).** *Usinagem a seco e de materiais endurecidos*, Máquinas e Metais, março, p. 30-37.
- MONTGOMERY, D.C. (1991).** *Diseño y análisis de experimentos*. Trad. por Jaime Delgado Saldivar. Mexico Iberoamérica.
- MONTGOMERY, D. C. (1997).** *Designs and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.
- MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. (2003).** *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*, 2<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- MULLER-GASS, A. CAMPBELL, K. (2002).** *Event-related potential measures of inhibition of information processing:I. Selective attention in waking state*. International Journal of Psychophysiology, n. 46, p.177-195.
- MYERS, R. H. & MONTGOMERY, D. C. (1995).** *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, Canada, John Wiley & Sons, Inc.
- NAYLON, D.; LLEWELLYN, D.; KEANE, D. (1976).** *Control of machinability in medium-carbon steel*. Met. Technology.
- NAKAYAMA, K; ARAI, M.; KANDA, T. (1988).** *Machinig characteristics of hard materials*. Annals of the CIRP, v. 37/1, p. 89 – 92.
- NOORDIN, M. Y.; VENKATESH, V. C.; SHARIF, S.; ELTING, S.; ABDULLAH, A. (2004).** *Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel*, Journal of Material Processing Technology, No. 145, p. 46 – 58.

- OHTANI, T.; YOKOGAWA, H.(1988).** *The effects of workpiece hardness on tool wear characteristics.* Bulletin Os The Japan Society of Precision Engineering, v. 22, nº 3 , p. 229-31, setembro.
- OLIVEIRA, L. C. (1999).** *Uso integrado do método QFD e de técnicas estatísticas de planejamento e análise de experimentos na etapa do projeto do produto e do processo.* Belo Horizonte. 270 p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais.
- 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.
- PIPKIN, N. J.; ROBERT, D. C.; WILSON, W. L. (1987).** *Amborite – A remarkable new material from the bears,* Industrial Diamond Review, v. 40/6, p. 203-6.
- 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.
- RASIS, D., HOWARD, S. G., POPOVICH, E. (2002).** *Papers Organizers International: A Fictitious Six Sigma Green Belt Case Study. II.* Quality Engineering. Vol.15, No. 2, pp. 259-274.
- REY, L. (1993).** *Planejar e redigir trabalhos científicos.* 2. Ed. São Paulo, Edgard Blücher. Cap.3–6, p.31-80.
- ROSS, P. J. (1991).** *Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade.* Makron Books. São Paulo, p.26-96.
- SALES, G. T. (2004).** *Torneamento do aço ASTM 300M endurecido com ferramentas de cerâmica e PCBN com geometria “Wiper”,* Dissertação de mestrado, Itajubá, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 117 p.

**SANDVIK (2000).** *Catálogo técnico do fabricante de ferramentas*, Sandvik Coromant.

**SANDVIK (2001-02).** *Catálogo técnico do fabricante de ferramentas*, Sandvik Coromant.

**SHAW, M. C. (1986).** *Metal cutting principles.I* New York: Clarendon Press Oxford.

**SATA, T. (1985).** *Analysis of surface roughness generation in turning operation and its applications.* Annals of the CIRP, v. 34, p. 473-6.

**SILVEIRA, J. F. (2002).** *Fresamento toroidal do aço ABNT H13 endurecido com ferramentas de cermet e de metal duro*, Dissertação de mestrado, Itajubá, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 89 p.

**STEINBERG, M. D.; HUNTER, W. G. (1984).** *Experimental design: review and comment.* Technometrics, v. 26, nº 2, p. 71 – 130, may.

**STOCKHORST, U., STEINGRUBER, H. J., SCHERBAUM, W. (2000).** *Classically conditioned responses following repeated insulin and glucose administration in humans.* Behavioural Brain Research, n.110, p. 143-159.

**TAGUCHI, G.; ELSAIED, A. E.; HSIANG, T. C. (1990).** *Engenharia da qualidade em sistemas de produção*, São Paulo, MacGraw-Hill.

**TEIXEIRA FILHO, F. (2000).** *Estudo da influência da refrigeração / lubrificação no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido*, Dissertação de mestrado, Itajubá, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, 106 p.

**TEIXEIRA FILHO, F.; FERREIRA, J. R.; SANTOS, J. N.; DINIZ, A. E. (2001).** *O uso (ou não) da refrigeração / lubrificação no torneamento de aço endurecido*, Máquinas e Metais, abril, p. 260-283.

- TOKIMATSU, R. C. (1995).** *Influência dos parâmetros micro-estruturais e procedimentos de ensaio no comportamento mecânico num aço de ultra-alta resistência e baixa liga*, Tese de doutorado, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 440 p.
- TOMITA, Y. (1991).** *Development of fracture toughness of ultrahigh strength low alloy steels for aircraft and aerospace applications*, Materials Science and Technology, v. 7, p. 481-9.
- TRENT, E.M. (1991).** *Metal Cutting*. Third Edition, Butterworth-Heinemann Ltd, 273p.
- WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. (1996).** *Planejamento e análise de experimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo*. Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni. v.8.
- WISE, M. (1992).** Material apresentado em palestra na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. UNICAMP.
- YUKIMURA, C. D. L. (1991).** *Eficiência e qualidade no projeto do produto com ênfase no método Taguchi*. Florianópolis. 201p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina.