

**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE  
ITAJUBÁ**

**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Análise da integridade superficial na retificação dupla face de anéis de pistão de aço inoxidável ISO 6621- 3 MC 66 nitretado

**Daouda Kane**

**Orientador: Dr. João Roberto Ferreira**

**Itajubá, 18 de dezembro de 2002**

**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE  
ITAJUBÁ**

**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Análise da integridade superficial na retificação dupla face de anéis de pistão de aço inoxidável ISO 6621- 3 MC 66 nitretado

**Daouda Kane**

**Membros da banca**

**Prof. Dr. Olívio Novaski**

**Prof. Dr. Paulo Shigueme Ide**

**Prof. Ms. Luiz Fernando Barca**

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

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

**Itajubá, 18 de dezembro de 2002**

## Dedicat6rio

Dedico este trabalho aos meus pais

## **Agradecimentos**

Ao Professor João Roberto Ferreira, pela valiosa orientação e confiança;  
Aos Professores Luiz Fernando Barca, Pedro Paulo Balestrassi e Carlos Alberto Mont'Alvão pela grande ajuda durante o trabalho;  
À Universidade Federal de Itajubá pela oportunidade dada;  
A empresa Mahle Cofap Aneis pelos recursos disponibilizados;  
A todos os funcionários da empresa Mahle Cofap Aneis pelos serviços prestados;  
Aos meus pais e a toda comunidade Itajubense.

## Sumário

Dedicatório	iii
Agradecimentos	iv
Sumário	v
Resumo	ix
Abstract	x
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiv
Lista de símbolos	xv
<b>Capítulo 1: Introdução</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2: Características do processo de retificação</b>	<b>4</b>
2.1 Características da ferramenta de corte (rebolo) utilizada em retificação	4
2.1.1 Natureza do grão abrasivo	5
2.1.1.1 Abrasivos naturais não siliciosos	5
2.1.1.2 Abrasivos naturais siliciosos	6
2.1.1.3 Abrasivos moles	6
2.1.1.4 Abrasivos sintéticos ou artificiais	6
2.1.2 Tamanho do grão abrasivo	7
2.1.3 Dureza do rebolo	9
2.1.4 Estrutura do rebolo	9
2.1.5 Ligante	11
2.1.5.1 Ligante resinóide	11
2.1.5.2 Ligante vitrificado	11
2.1.5.3 Ligante metálico	12
2.2 Materiais superabrasivos para rebolo	14
2.2.1 Propriedades dos materiais superabrasivos	14
2.2.1.1 Dureza	14
2.2.1.2 Resistência ao desgaste	16
2.2.1.3 Resistência a compressão	17

2.2.1.4	Condutividade térmica	18
2.2.1.5	Tenacidade e Friabilidade	19
2.2.2	Super-revestimentos para materiais superabrasivos	21
2.2.3	Aplicações do CBN (Nitreto Cúbico de Boro)	23
2.3	Usinabilidade	24
2.4	Mecanismo de formação de cavaco	26
2.5	Mecanismo de desgaste de um rebolo	28
2.5.1	Desgaste por atrito	29
2.5.2	Fratura do grão	29
2.5.3	Desgaste do aglomerante	30
2.6	Dressagem e perfilamento de rebolos	31
2.6.1	Perfilamento	31
2.6.2	Dressagem	31
2.6.3	Dressagem convencional	33
2.6.4	Novos processos de dressagens	34
2.6.4.1	Dressagem a laser	34
2.6.4.2	Dressagem eletrolítico	34
2.6.4.3	Dressagem por descarga elétrica	34
2.6.4.4	Dressagem por jato abrasivo	35
2.6.4.5	Dressagem com abrasivo livre	35
2.6.4.6	Emissão acústica	36
2.6.4.7	Exemplos de monitoramento de dressagem	37
 <b>Capítulo 3: Retificação dupla face com máquina de disco</b>		 38
3.1	Métodos de retificação com máquinas de disco	38
3.1.1	Método de alimentação contínua com dispositivo rotativo	38
3.1.2	Método de alimentação com dispositivo retilíneo	39
3.1.3	Método de alimentação descontínua com dispositivo oscilante	40
3.1.4	Método vertical para fuso simples	41
3.1.5	Método com fixação especial	42
3.2	Retificação dupla face com rebolo de CBN	43

3.3	Aplicação da retificação dupla face	44
3.3.1	Distribuição de produtos retificados em máquinas de disco	44
<b>Capítulo 4: Integridade de superfície</b>		<b>46</b>
4.1	Importância da integridade superficial	46
4.2	Queima	47
4.3	Trincas	51
4.4	Acabamento superficial	52
4.5	Tensões Residuais	54
4.5.1	Origem das tensões residuais	54
a)	Tensões de primeira ordem	60
b)	Tensões de segunda ordem	60
c)	Tensões de terceira ordem	60
4.5.2	Efeitos das tensões residuais	61
4.5.3	Princípios básicos de medição de tensão por difração de raio x	62
4.5.4	Fontes de raio x	63
4.5.5	Difração	63
4.5.6	Condição de difração – Lei de Bragg	63
4.6	Alterações metalúrgicas	65
<b>Capítulo 5: Projeto e análise de experimentos</b>		<b>67</b>
5.1	Limitações	68
5.2	Amplitude do efeito	69
5.3	Planejamento fatorial $2^k$	71
<b>Capítulo 6: Procedimento experimental</b>		<b>72</b>
6.1	Metodologia experimental	72
6.1.1	Planejamento	73
6.1.2	Preparação	74
6.1.3	Execução	75

6.1.4	Processamento	76
6.2	Material	77
6.3	Equipamentos de medições	78
6.3.1	Equipamento de medição de rugosidade	78
6.3.2	Equipamento de medição de tensões residuais	78
6.3.3	Equipamento de medição de dureza	78
6.3.4	Equipamento de análise micrográfica	79
6.4	Procedimentos de medições	79
6.4.1	Procedimento de medição de rugosidade	79
6.4.2	Procedimento de medição de tensões residuais	80
6.4.3	Procedimento de avaliação das superfícies	80
6.4.4	Procedimento de preparação e medição de dureza	81
6.5	Máquina retificadora	81
6.5.1	Capacidade dos motores	81
6.5.2	Cabeçote do rebolo	82
6.5.3	Sistema de avanço do cabeçote porta rebolo	82
6.6	Ferramentas de usinagem e dressagem	84
6.6.1	Rebolo de corte	84
6.6.2	Dressador	84
6.6.3	Fluido de corte	84
<b>Capítulo 7:</b>	<b>Resultados e discussão</b>	<b>85</b>
7.1	Análise da microestrutura	85
7.2	Análise das tensões residuais	89
7.3	Acabamento superficial	99
7.3.1	Análise comparativo da rugosidade das duas faces do anel	99
7.3.2	Análise dos efeitos	102
7.4	Parâmetros de corte propostos	107
<b>Capítulo 8:</b>	<b>Conclusões e sugestões para trabalhos futuros</b>	<b>108</b>
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>110</b>

## **Resumo**

Na operação de retificação, são controladas normalmente as irregularidades geométricas da superfície denominada textura superficial e também a integridade superficial ou seja as alterações metalúrgicas da superfície e da subsuperfície das peças. A obtenção de uma boa textura e integridade superficial depende em grande parte dos parâmetros de corte utilizados durante a operação de retificação. Estes parâmetros são a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte. Este trabalho apresenta a influência destes parâmetros no acabamento e na integridade superficial das peças quando seus níveis forem alterados. Foram analisadas o acabamento superficial, as alterações da subsuperfície e a distribuição das tensões residuais. Foi utilizado o planejamento fatorial  $2^3$  para analisar a amplitude dos efeitos de cada parâmetro assim como a da interação entre eles. Os resultados mostram que na retificação dupla face com rebolo de CBN do aço inoxidável (ISO 6621-3 – subclasse MC 66), nitretado, não houve danos térmicos na superfície das peças e as tensões residuais na superfície tenderam a ser de compressão e foram maiores quando as condições de retificação deixaram de ser suave. Isoladamente a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte tiveram pouca influência, mas suas interações influenciaram significativamente o acabamento superficial das peças.

### **Palavras chave**

Retificação Dupla Face, Tensões Residuais, Integridade de Superfície, Acabamento Superficial.

## **Abstract**

In Grinding, geometrical irregularities called surface texture and surface integrity are normally controlled. To obtain a good surface texture and better surface integrity, depends to a large extent on choosing the cutting parameters. These parameters are the cutting speed, the table speed and the depth of cut per pass. This work presents the influence of these parameters on the finishing surface and the subsurface when their levels are changed. The finishing surface, residual stresses and surface alterations were analysed. A 2<sup>3</sup> factorial design was used in the surface finish evaluation. The results of the analysis prove that in the double disc grinding with CBN of hardened steels ISO 6621-3 subclass MC 66, there is no thermal damage on the surface and the residual stresses have a tendency to be compressive on the surface and higher when grinding conditions are not soft. The influence of the cutting speed, table speed and depth of cut was not significant, but their interactions, were found to play a more significant role in the finishing surface.

### **Key words**

Double Disc Grinding, Residual Stresses, Surface Integrity, Finishing Surface

## Lista de Figuras

Figura 2.1:	Influência do tamanho do grão abrasivo nas variáveis do processo	8
Figura 2.2:	Influência da estrutura do rebolo nas variáveis do processo	10
Figura 2.3:	Influência da concentração nas variáveis do processo	13
Figura 2.4:	Dureza de diversos grãos abrasivos	14
Figura 2.5:	Resistência ao desgaste de diversos grãos abrasivos	16
Figura 2.6:	Resistência à compressão de diversos grãos abrasivos	17
Figura 2.7:	Resistência à condutividade térmica de diversos grãos abrasivos	18
Figura 2.8:	Grãos de CBN não revestidos	21
Figura 2.9:	Grãos de CBN revestidos	21
Figura 2.10:	Mecanismo de formação de cavaco	27
Figura 2.11:	Mecanismo de desgaste de um rebolo	28
Figura 2.12:	Rebolo de corte com detalhe da gaveta	33
Figura 3.1:	Método de alimentação com dispositivo rotativo	39
Figura 3.2:	Método de alimentação com dispositivo retilíneo	40
Figura 3.3:	Método de alimentação descontínua com dispositivo oscilante	41
Figura 3.4:	Método vertical para fuso simples	42
Figura 3.5:	Método com fixação especial	43
Figura 3.6:	Distribuição de produtos retificados através do método de retificação dupla face	44
Figura 3.7:	Produtos retificados através do método de retificação dupla face	45
Figura 4.1:	Gradiente de temperatura na região de contato entre grão abrasivo e Peça.	47
Figura 4.2:	Micrografia do aço 4340 após retificação	48
Figura 4.3:	Gradiente de temperatura na peça retificada	50
Figura 4.4:	Diagrama isocromática das tensões durante a retificação	50
Figura 4.5:	Critério para definição de Ra	53
Figura 4.6:	Critério para definição de Rz	53
Figura 4.7:	Haste cilíndrico sob tração	55
Figura 4.8:	Carregamento abaixo do limite elástico	56

Figura 4.9:	Carregamento acima do limite elástico	57
Figura 4.10:	Sem carregamento (material plasticamente deformado)	57
Figura 4.11:	Ilustração de grãos deformados	68
Figura 4.12:	Distribuição de tensões residuais ocorridas após retificação através de condições suaves e severas em aços endurecidos	69
Figura 4.13:	Progressão da distribuição de Tensões Residuais durante a vida da ferramenta	61
Figura 4.14:	Reflexões de um feixe de raios x pelos planos (hkl) de um cristal	64
Figura 5.1:	Esquema de relações que devem ser considerado na seleção de um DOE	68
Figura 6.1:	Visão geral do procedimento experimental	72
Figura 6.2:	Esquema do anel de pistão	76
Figura 6.3:	Micrografia do aço inox ISO 6621-3 subclasse MC 66	78
Figura 6.4:	Retificadora de disco	83
Figura 6.5:	Esquema de retificação de disco com alimentador rotativo	83
Figura 7.1:	Micrografia da camada branca, de difusão e intermediária	85
Figura 7.2:	Microestrutura do material antes retificação	86
Figura 7.3:	Microestrutura do material após retificação	86
Figura 7.4:	Microestrutura da superfície antes retificação	87
Figura 7.5:	Microestrutura da superfície após retificação	87
Figura 7.6:	Acabamento da superfície após retificação suave	88
Figura 7.7:	Acabamento da superfície após retificação moderada	88
Figura 7.8:	Tensões residuais na superfície antes da operação de retificação	89
Figura 7.9:	Distribuição das tensões residuais antes da operação de retificação	90
Figura 7.10:	Ilustração do mecanismo de formação das tensões residuais	91
Figura 7.11:	Tensões residuais superficiais médias após retif. suave e moderada	93
Figura 7.12:	Dureza da peça em diversas profundidades em relação à superfície	95
Figura 7.13:	Níveis de tensões residuais em condição de retif. suave e moderada	97
Figura 7.14:	Distribuição das tensões residuais na superfície e na subsuperfície	98
Figura 7.15:	Rugosidade média na face sup. (Rz sup.) e inf. (Rz inf.)	101
Figura 7.16:	Rugosidade média na face sup. (Rz sup.) e inf. (Rz inf.) após replicag.	101
Figura 7.17:	Gráfico normal dos efeitos padronizados da rugosidade Rz sup.	102

Figura 7.18: Gráfico normal dos efeitos padronizados da rugosidade Rz inf.	102
Figura 7.19: Gráfico de pareto para Rz sup.	104
Figura 7.20: Gráfico de pareto para Rz inf.	104
Figura 7.21: Gráfico de interação entre as variáveis para Rz inf.	106
Figura 7.22: Gráfico de interação entre as variáveis para Rz sup.	106

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1:	Sistema ANSI de especificação de rebolos de CBN e diamantados	5
Tabela 2.2:	Evolução de uso dos principais ligantes para rebolos superabrasivos	12
Tabela 2.3:	Impactos que ocorrem no rendimento de um reboło superabrasivo de CBN em virtude de alterações dos grãos abrasivos e ligantes	20
Tabela 5.1:	Guia auxiliar para um planejamento de experimento	69
Tabela 5.2:	Relação entre número de experimentos e Amplitude do Efeito	70
Tabela 6.1:	Fatores de usinagem e seus respectivos níveis	74
Tabela 6.2:	Matriz de planejamento dos experimentos	75
Tabela 6.3:	Composição química do material	77
Tabela 7.1:	Tensões residuais superficiais antes da operação de retificação	89
Tabela 7.2:	Tensões residuais superficiais após retificação suave	92
Tabela 7.3:	Tensões residuais superficiais após retificação severa	92
Tabela 7.4:	Tensões residuais em função dos parâmetros de corte	97
Tabela 7.5:	Resultados das medidas de rugosidade após o 1º ensaio	100
Tabela 7.6:	Resultados das medidas de rugosidade após o 2º ensaio	100
Tabela 7.7:	Efeitos para análise da relevância dos fatores	103
Tabela 7.8:	Parâmetros de corte otimizados	107

## Nomenclatura

### Letras latinas

(+):	Nível superior de um fator
(-):	Nível inferior de um fator
k:	Número de fatores do experimento
DOE:	Design Of Experiments (Delineamento de Experimentos)
$S_p$ :	Número de experimentos do DOE fatorial
$V_c$	Velocidade de corte
$V_w$ :	Velocidade de avanço
Ad:	Profundidade de corte
Rz Sup.	Rugosidade da face superior
Rz Inf.:	Rugosidade da face inferior
CBN:	Nitreto Cubico de Boro
F1:	Força aplicada na haste cilíndrica
A:	Área da seção transversal
$D'$ :	Diâmetro da haste cilíndrica
$\Delta L$ :	Variação do comprimento
$L_0$ :	Comprimento inicial da haste
$L_f$ :	Comprimento final da haste
$d_0$	distância interplanar do material sem tensão
$d_n$ :	distância interplanar do material tensionado
E:	Módulo de elasticidade longitudinal
d:	Distância interplanar

### Letras gregas

$\sigma$ :	Tensão normal atuando na direção y
$\alpha$ :	Nível de significância
$\lambda$	Comprimento de onda
$\theta$ :	Ângulo de difração
$\nu$ :	Coefficiente de Poisson

## Capítulo 1

### INTRODUÇÃO

O processo de retificação é um dos mais problemáticos dentro de uma seqüência de fabricação e são poucos os técnicos habilitados a solucionar as falhas críticas que ocorrem durante o processo produtivo. A retificação envolve um número muito grande de variáveis, que podem influenciar negativamente os resultados que se deseja obter. As vezes basta que um único parâmetro apresente um desvio para comprometer todo o processo. As diferenças de qualidade de fabricação de um mesmo tipo de rebolo, a dependência da habilidade e sensibilidade do operador e o desconhecimento das condições ideais de utilização do rebolo agravam este problema. A grande dependência da mão de obra hábil e experiente é mais crítica na produção de pequenos lotes. Green (1984) afirma que na retificação de pequenos lotes, o tempo para se fazer a ajustagem dos parâmetros de usinagem e obter-se a primeira peça aceitável é normalmente maior do que o tempo para a produção de todo o lote. As montagens são feitas por tentativas e seu sucesso depende fundamentalmente da habilidade e talento de um operador experiente. Parâmetros de corte inadequados, mudanças nas características topográficas de um mesmo rebolo pelo desgaste das arestas de corte, refrigeração deficiente, por exemplo podem provocar variações consideráveis no resultado final da operação e tornarem o processo inconsistente. Keeg (1983), diretor de pesquisa e desenvolvimento da Cincinnati Milacron Inc.-USA afirma que os dados e resultados obtidos em trabalhos científicos, normalmente não tem muita aplicabilidade dentro de uma indústria. A retificação apresenta alto grau de complexidade em virtude do grande número de possíveis condições de processo. Ainda hoje é muito desconhecida e difícil de ser controlada (Oliveira et al., 2000). Todas essas dificuldades fazem com que os critérios para utilização de rebolos no meio industrial não sejam bem estabelecidos como na usinagem com ferramentas com arestas de corte definidas como o torneamento, o fresamento e outros. Isto se torna mais grave pelo fato de que a retificação é normalmente uma operação de acabamento e portanto, uma das últimas da seqüência de fabricação. Assim todos os atrasos de tempo e problemas de qualidade ocorridos nas operações anteriores devem ser solucionadas no final da

seqüência de fabricação ou seja, no processo de retificação. A retificação é portanto, o processo que, apesar de ser menos tecnologicamente dominado dentre todos os processos convencionais de fabricação, tem como papel solucionar os problemas de qualidade e de tempo de todo o processo de fabricação.

Segundo Krar e Ratterman (1990) como consequência dos esforços contínuos para melhorar a qualidade dos produtos e os métodos de fabricação, têm sido desenvolvidas novas máquinas-ferramentas e materiais para ferramentas de corte. Assim foram desenvolvidos os rebolos superabrasivos de CBN (Nitreto Cúbico de Boro) que tem uma alta eficiência para a retificação de materiais difíceis de serem retificados - DTG (*Difficult To Grinding*).

O objetivo principal deste trabalho é analisar o acabamento e a integridade superficial de anéis de pistão para motor de combustão interna, sob diversas condições de retificação com rebole de CBN. Foi feita uma análise conjunto da microestrutura do material, das tensões residuais desenvolvidas na superfície e na subsuperfície e também da rugosidade das superfícies geradas. A análise da rugosidade ou seja do acabamento superficial é feita através do projeto e análise de experimentos que envolve a determinação do nível de importância e da influência dos fatores velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. A otimização destes fatores e a avaliação da eficiência do rebole de CBN também fazem parte dos objetivos deste trabalho. Uma vez que a integridade de superfície do anel de pistão tem uma importância capital no seu funcionamento, torna-se relevante qualquer estudo ou trabalho que leva a conhecer as suas influências em cada aplicação. É de conhecimento que peças com boa integridade de superfície têm comportamento previsível e portanto menos sujeito a falhas repentinas ou imprevíveis.

O trabalho está dividido em 8 capítulos conforme descritos a seguir:

O **primeiro capítulo** refere-se à introdução, onde são apresentados o papel da operação de retificação, as dificuldades e a complexidade do processo de retificação.

Também está apresentado neste capítulo o objetivo deste trabalho.

No **segundo capítulo** estão descritas algumas características relevantes do processo de retificação. Procurou-se abordar o assunto de forma abrangente, levantando a importância de diversos fatores que influenciam diretamente ou indiretamente o processo de retificação.

No **terceiro capítulo** estão apresentados diversos métodos de retificação com máquinas de discos entre os quais o método de alimentação contínua com dispositivo rotativo que é utilizado neste trabalho. São apresentados as vantagens de cada método assim como sua aplicabilidade dentro da indústria.

O **quarto capítulo** refere-se à integridade de superfície de materiais retificados . Neste capítulo são apresentados os tipos de danos que afetam diretamente a integridade de uma peça podendo levá-la a falhar repentinamente durante seu funcionamento. Faz-se também neste capítulo uma abordagem das tensões residuais apresentando os diversos tipos existentes, suas origens, seus efeitos e como medi-las.

No **quinto capítulo**, procurou-se abordar a técnica Projeto e Análise de Experimentos de forma resumida, mostrando seu poder e suas limitações. Apenas é abordado o planejamento fatorial  $2^k$  pois é a técnica utilizada neste trabalho.

No **capítulo 6**, são apresentados, a metodologia experimental ou seja a forma em que os experimentos foram conduzidos, a máquina, as ferramentas, os diversos equipamentos e procedimentos utilizados para efetuar as medições necessárias.

No **capítulo 7**, são apresentados os resultados e comentários dos mesmos.

No **capítulo 8**, são apresentados as conclusões tiradas deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

#### 2.1 Características da ferramenta de corte (rebolo)

O sucesso de uma operação de retificação depende em grande parte da escolha correta do rebolo. O tipo de rebolo selecionado e como usá-lo, afeta a sua vida útil e a taxa de remoção do material e o acabamento da superfície da peça. A seleção de um rebolo de CBN por exemplo pode ser uma tarefa difícil e normalmente o usuário segue a recomendação dos fabricantes que têm uma boa experiência dentro das indústrias. Suas sugestões têm proporcionado melhores resultados para os usuários. Os cinco elementos que devem ser especificados na escolha de um rebolo são (Diniz et al., 1999):

- O material do grão abrasivo, ou seja, o elemento cortante
- O tamanho do grão
- A dureza do rebolo
- A estrutura do rebolo
- O tipo de liga aglomerante

A tabela 2.1 mostra um exemplo de especificação de rebolo que o Instituto Americano de Normas Internacionais (ANSI) e a Federação Européia dos fabricantes de Produtos Abrasivos (FEPA) usam (Krar e Ratterman, 1990).

Tabela 2.1: Sistema ANSI de especificação de rebolos de CBN e diamantados  
(Krar e Ratterman, 1990)

<b>Sequencia</b>	<b>Especificação</b>	<b>Descrição</b>
Prefixo	M	Indica o tipo de abrasivo do fabricante (opcional)
Tipo de abrasivo	D	Diamante
Tamanho do grão	120	Grão fino
Dureza do rebolo	N	Média
Concentração	100	Designação do fabricante Pode ser um número ou um símbolo
Tipo de ligante	B	Ligante Resinóide
Ligante modificado	77	Ligante especial
Camada de abrasivo	1 / 8	Espessura da camada de abrasivo em milímetro ou em polegada
Registro do Fabricante	-	Símbolo de Identificação do fabricante (opcional)

### **2.1.1 Natureza do grão abrasivo**

A escolha do tipo de grão é um fator determinante na escolha de um rebolo. Um dos critérios importantes nesta escolha é a afinidade do grão com o material a usinar. Os abrasivos podem ser classificados em dois grupos, os naturais e os artificiais. Chamamos de abrasivos naturais aqueles que se encontram na natureza e artificiais ou sintéticos aqueles que foram obtidos por meio de processos industriais.

#### **2.1.1.1 Grãos abrasivos naturais**

Entre os abrasivos naturais ainda há os siliciosos e os não siliciosos (Nussbaum, 1988).

##### **a) Abrasivos naturais não siliciosos**

- Diamante
- Corindon

- Esmeril
- Granada

**b) Abrasivos naturais siliciosos**

- Quartzo
- Areia (sílica)
- Pedra pomes
- Pó vulcanico
- Diatomita

**c) Abrasivos moles**

- Feldspato
- Dolomita
- CaO (Óxido de Cálcio)
- Óxidos metálicos (cromo, Zn, etc.)

### **2.1.1.2 Abrasivos sintéticos ou artificiais**

Estão descritos abaixo os principais grãos abrasivos sintéticos e suas respectivas aplicações.

- Diamante usado para a retificação de materiais não ferrosos como o metal duro, o cerâmico, a porcelana, o vidro, a pedra etc.
- CBN (Nitreto Cúbico de Boro ou NBC) utilizado principalmente para materiais ferrosos (ferro fundido e aços de elevada dureza).
- Carbetto de Silício (SiC) indicado para a retificação de materiais de alta dureza como o ferro fundido cinzento, materiais não ferrosos (principalmente o metal duro) e não metálicos. Não deve ser utilizado na retificação de aços. (verde e preto)
- Alumina sinterizada
- Carbetto de Tungstênio
- Óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) indicado para a retificação de materiais de alta resistência à tração tais como aço carbono, ligas de aço, aço rápido, ferro fundido maleável, ferro fundido nodular e outros metais similares. Existem vários tipos de óxido de alumínio. Cada tipo tem características adequadas para

determinadas aplicações. Podemos citar o óxido de alumínio comum (A), utilizado em operações de desbaste e retificações cilíndricas em geral, exceto em aços de elevada dureza e sensíveis ao calor. O óxido de alumínio branco (AA) é utilizado principalmente em usinagem leve onde seja preciso evitar o aquecimento superficial. O óxido de alumínio zirconado é utilizado especialmente para desbaste de lingotes de aços especiais, particularmente os inoxidáveis. Há também o óxido de alumínio rosa.

É interessante observar que a escolha do material do grão abrasivo é fundamental, pois, os materiais abrasivos diferem para cada aplicação. Antes de iniciar qualquer operação de retificação, deve-se pelo menos conhecer o material abrasivo, o material a usinar e a afinidade entre os dois materiais para poder prever os resultados. O grão abrasivo influencia diretamente a vida do rebolo, a eficiência da operação de retificação e a qualidade superficial da peça retificada. Todo cuidado é pouco para a escolha do tipo de grão.

### **2.1.2 Tamanho do grão abrasivo**

O tamanho da partícula abrasiva de um rebolo é especificado pelo número do grão. O número que indica o tamanho do grão é dado pelo número de malhas existentes em uma polegada linear da peneira de classificação. Um grão 60, por exemplo, irá passar livremente numa peneira de 60 malhas por polega linear, mas ficará retido em uma peneira com 61 ou mais malhas (Diniz et al., 1999).

A classificação do tamanho do grão abrasivo pode ser dividida em:

- Muito grosso: de 6 a 14
- Grosso : de 16 a 30
- Médio: de 36 a 90
- Fino: de 100 a 240
- Extra fino: de 280 a 500
- Pulverulento: 600 a 1600

O tamanho do grão influencia bastante na taxa de remoção e no acabamento do material. A escolha do tamanho do grão a utilizar está associada ao que se pretende no

processo. Os grãos classificados muito grossos e grossos são usados para operações de desbaste, de rebarbação, e para obras grosseiras em geral. Rebolos de grãos grossos são usados em geral para usinagem de materiais moles, dúcteis ou fibrosos, como os aços moles ou alumínio e também quando se deseja rápida remoção de material (Diniz et al., 1999).

Os grãos classificados finos, são recomendados para usinagem de materiais duros e frágeis ou quebradiços como o metal duro ou o vidro. Rebolos de grãos finos são usados em operação onde se deseja um acabamento superficial fino.

Existem rebolos feitos com misturas de dois ou mais tamanhos de grãos que reúnem a vantagem do grão grosso (capacidade de corte) e os de grão fino (acabamento fino). Esses rebolos são usados freqüentemente em retificadoras cilíndricas.

Segundo Subramanian (1999), o tamanho do grão influencia os esforços de corte, a razão G que define a relação entre o volume de material removido e o volume de rebolo gasto, o acabamento da peça e a potência da máquina. A figura 2.1 mostra o comportamento destas características com relação ao tamanho do grão.

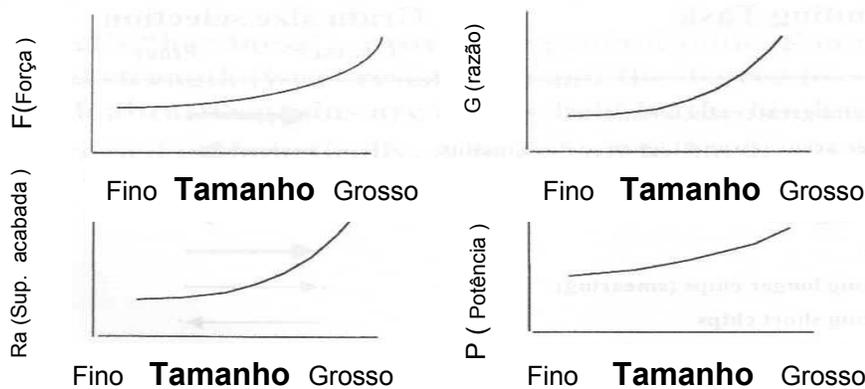


Figura 2.1: Influência do tamanho do grão nas variáveis de resposta processo (Subramanian, 1999)

### 2.1.3 Dureza do rebolo

A dureza não se relaciona com as partículas abrasivas e sim indica o grau de coesão dos grãos com o aglomerante. O rebolo é considerado duro quando ele oferece uma grande resistência aos esforços de retificação que tendem a retirar os grãos do rebolo. Quando os grãos se desprendem com facilidade, o rebolo é considerado mole. Portanto, os rebolos duros retêm as partículas abrasivas mais firmemente do que os moles ou macios. Os rebolos são classificados de acordo com a dureza em muito mole, mole, médio, duro e muito duro. A classificação por diversos grãos depende das normas do fabricante. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), segue a seguinte classificação, (Diniz et al., 1999):

E – F – G	Rebolos muito moles
H – I – J – K	Rebolos moles
L – M – N – O	Rebolos de dureza média
P – Q – R	Rebolos duros
S – T – U – V	Rebolos muito duros

Os rebolos muito moles são empregados para retificar aços rápidos e aços temperados enquanto que os rebolos duros são empregados em obras diversas de aços mais moles, em esmerilamento manual, afiação, retificação de cantos, corte e rebarbação. Quanto mais duro for o material a retificar, mais macio deve ser o rebolo e vice-versa.

### 2.1.4 Estrutura

A estrutura indica a concentração volumétrica de grãos abrasivos no rebolo (Diniz et al., 1999). É o modo de se dispor os grãos. O espaçamento entre os grãos pode ser maior ou menor deixando a estrutura mais ou menos compacto. Quanto mais compacto ou seja mais fechado for o rebolo, mais duro ele será. Entende-se por rebolo com estrutura fechada, um rebolo com bastante grãos abrasivos e aberto com poucos grãos abrasivos. Em geral uma estrutura mais aberta dá um acabamento grosseiro mas os cavacos têm melhor saída e há menos aquecimento no processo. A estrutura de um rebolo é indicada por um número sendo (Diniz e al., 1999):

- de 1 a 4 – estrutura fechada

- de 5 a 7 – estrutura média
- de 8 a 12 – estrutura aberta
- acima de 12 rebolo com poucos grão abrasivos.

Segundo Subramanian (1999), a estrutura influencia os esforços de corte, a razão G, o acabamento da peça e a potência da máquina. A figura 2.2 mostra o comportamento destas características com relação à estrutura

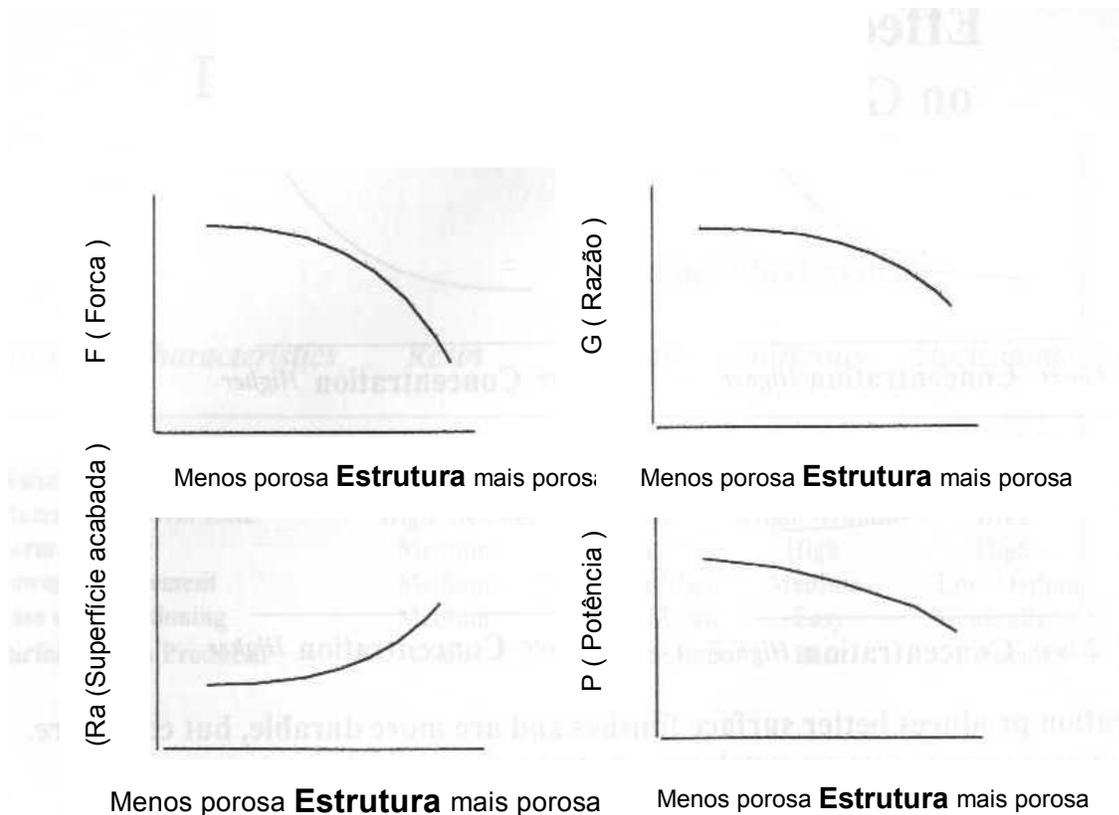


Figura 2.2: Influência da estrutura do rebolo nas variáveis de resposta do processo (Subramanian, 1999)

## **2.1.5 Ligante**

O ligante ou aglomerante é o elemento responsável pela retenção dos grãos abrasivos no rebolo. De forma geral constata-se que se o ligante possuir baixa capacidade de retenção dos grãos abrasivos na superfície de corte do rebolo, ocorrerá o desprendimento dos grãos e a renovação da superfície de corte. Os ligantes mais conhecidos são os resinóides e os vitrificados.

### **2.1.5.1 Ligante resinóide (B)**

É composto por resinas orgânicas. É uma liga de elevada resistência e resiliência. Os rebolos com ligante resinóide, geralmente tem a ação de retificação mais macia e fácil com relação aos outros ligantes. Dependendo da construção, os rebolo podem operar até a velocidade de 100 m/s, (Diniz et al. 1999). Estes rebolos removem material rapidamente e têm as seguintes características (Bianchi et al., 1999):

- podem ser utilizados em um grande número de aplicações
- estão disponíveis em um grande número de formas e tamanhos
- podem ser utilizados em retificação seca ou refrigerada
- possuem boas qualidades de corte

### **2.1.5.2 Ligante vitrificado (V)**

É a liga mais comum para operação de retificação de precisão por apresentarem maior eficiência, propiciarem melhor acabamento superficial e maior vida. Não resiste a grandes impactos ou pressões, não é afetada pela água, óleos ou ácidos, trabalha normalmente com velocidade periférica de 33 m/s, (Diniz et al., 1999).

Em rebolos superabrasivos, as ligas vitrificadas estão se consolidando rapidamente, principalmente nos rebolos de CBN. A grande vantagem da liga vitrificada sobre todas as outras consiste na facilidade de se obter estruturas porosas que permitem maior rapidez de corte, remoção de cavaco e melhor desempenho de refrigeração.

Até agora os rebolos utilizados na retificação de disco duplo são fabricados com ligante vitrificado. Este tipo de ligante é frágil, extremamente resistente ao desgaste e possui uma boa estabilidade térmica. Uma outra vantagem significativa da utilização do ligante vitrificado em rebolos de CBN resulta do fato de ele proporcionar boa porosidade e boas propriedades de auto-afiação, o que usualmente simplifica o método do seu condicionamento.

O rebolo de CBN com ligante vitrificado tem condicionamento mais fácil da superfície devido a porosidade induzida que proporciona um fluxo mais adequado dos cavacos. O emprego desta ferramenta tem crescido rapidamente com relação aos outros rebolos com outro tipo de ligante como resinoide ou metálico. De acordo com a tabela 2.2, pode-se notar um crescimento rápido na utilização do ligante vitrificado.

Tabela 2.2: Evolução de uso dos principais ligantes para rebolos superabrasivos  
(GE Company USA 1998)

Ligante	1980 (%)	1997 (%)	Tendência
Resinóide	76	31	Queda
Metálico	10	11	Crescimento lento
Vitrificado	4	32	Crescimento rápido
Camada simples	10	26	Crescimento rápido

### 2.1.5.3 Ligante metálico

Em rebolos superabrasivos, as ligas metálicas são o tipo mais comum de matriz usada para segurar os cristais superabrasivos revestidos. As ligas metálicas compostas de bronze, cobalto, tungstênio ou outros metais, são extremamente duras e resistentes ao desgaste. O principal mecanismo de desgaste de uma liga metálica se caracteriza pela queda de cristais abrasivos ou a perda do cristal abrasivo antes de serem completa e efetivamente utilizados (Carius 1999).

Quando se trata de rebolos superabrasivos, dois dígitos representando a concentração e profundidade do abrasivo são incluídos na especificação (Diniz et al., 1999). A concentração do rebolo representa a quantidade de abrasivos por unidade de volume do rebolo, expressa em quilates por centímetros cúbicos ( $Qt / cm^3$ ). O número da

concentração é baseado numa escala proporcional, onde tal número dividido por 4 é igual à porcentagem volumétrica de grãos contidos no rebolo. Como exemplo, um rebolo com concentração 100 significa que ele possui 25% do seu volume em grãos abrasivos. A escolha de uma maior concentração implica maior quantidade de grãos atuando sobre a peça e um melhor acabamento superficial. Entretanto os espaços entre os grãos tendem a ficar insuficientes, prejudicando a remoção de cavacos e aumentando as temperaturas e os esforços de retificação. Uma alta concentração proporciona um acabamento melhor, mas o custo é mais alto. Uma otimização da concentração é essencial para viabilizar tecnicamente e economicamente sua utilização.

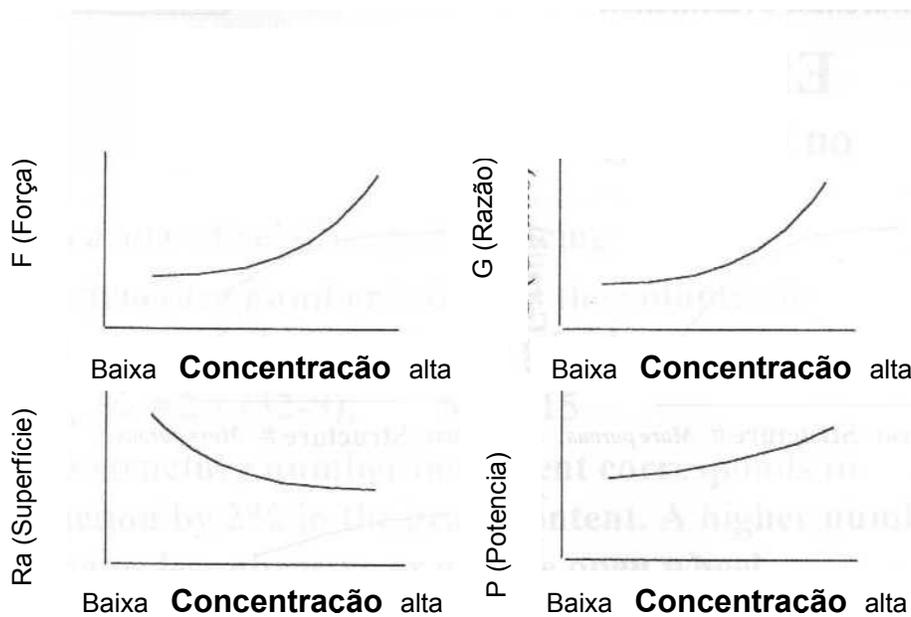


Figura2.3: Influência da Concentração nas variáveis de resposta do processo  
(Subramanian, 1999)

## 2.2 Materiais Superabrasivos para Rebolo

### 2.2.1 Propriedades dos Materiais Superabrasivos

Os superabrasivos, o diamante e o CBN, possuem propriedades diferentes dos abrasivos convencionais como o óxido de alumínio e o carbeto de silício. A dureza, a resistência à abrasão, a resistência à compressão e a condutividade térmica favorecem a sua escolha na usinagem de materiais difíceis de serem usinados (Bianchi et al., 2002). As figuras 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 mostram a comparação de propriedades importantes dos superabrasivos com relação às dos abrasivos convencionais mais conhecidos como o óxido de alumínio, o carbeto de silício.

#### 2.2.1.1 Dureza

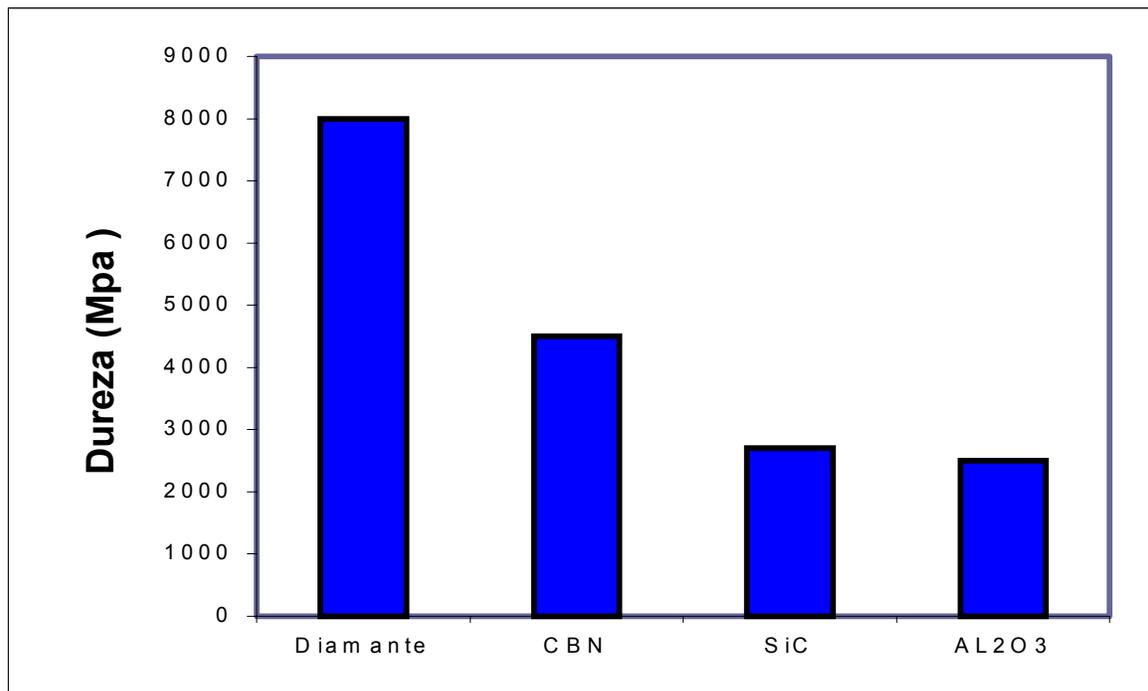


Figura 2.4: Dureza de diversos grãos abrasivos (Krar e Ratterman, 1990)

A propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de

diversos materiais. Entretanto, o conceito físico de dureza não tem um mesmo significado para todas as pessoas que tratam com essa propriedade. Essa conceituação de dureza depende da experiência e área na qual o profissional irá classificá-la.

Existem diversas definições arbitrárias que podem, inclusive, servir de base para alguns ensaios de dureza. Algumas delas são as seguintes:

- a resistência à penetração;
- a absorção de energia sob cargas dinâmicas;
- a resistência ao risco;
- a resistência à abrasão;
- a resistência ao corte.

Existem diversos métodos para medir a dureza de um metal, compreendidos em dois grupos: ensaios de penetração estáticos e ensaios de penetração dinâmicos.

Os ensaios estáticos são os mais usados; eles constituem um instrumento importante para a inspeção de rotina, além do controle de qualidade final do material, no que respeita sobretudo à verificação dos resultados dos tratamentos térmicos e mecânicos a que são freqüentemente submetidos os metais.

Os métodos padronizados, mais conhecidos de medição de dureza por penetração na engenharia são: Brinell, Rockwell, Vickers e Knoop.

A dureza é muito importante para um abrasivo pois ela proporciona uma maior facilidade de corte. O CBN é o material mais duro depois do diamante. Sua dureza se mantém a quente até 1300 °C o que permite trabalhar com velocidades de corte muito elevadas e usinar materiais duros enquanto que o diamante só é estável termicamente até 800 °C.

### 2.2.1.1 Resistência ao desgaste

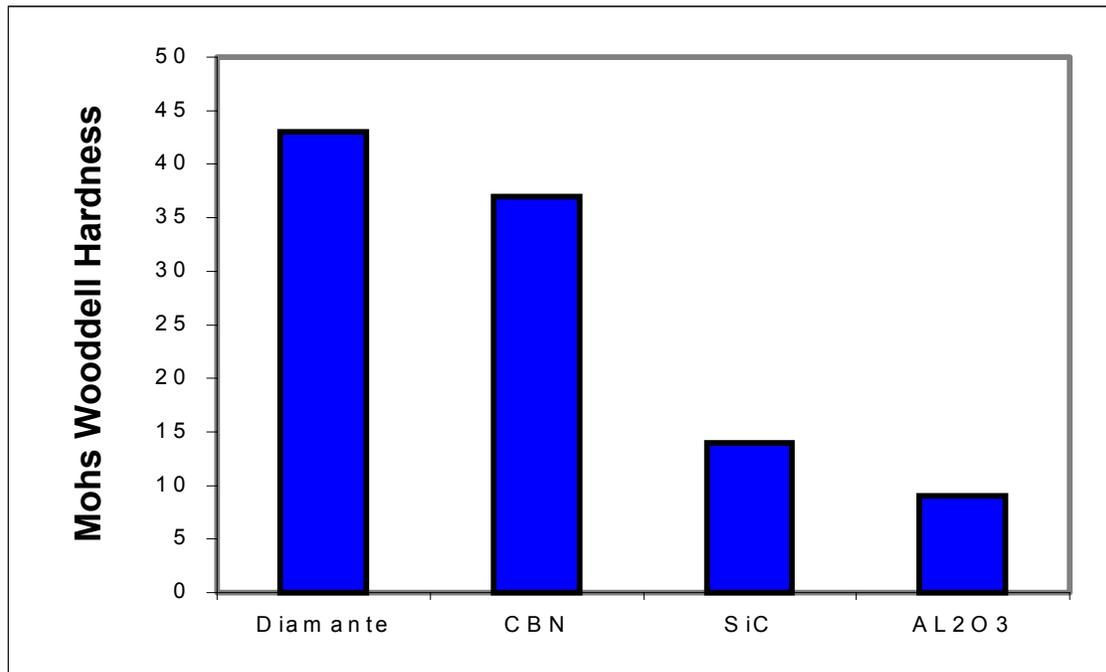


Figura 2.5: Resistência ao desgaste de diversos grãos abrasivos (Krar e Ratterman ,1990)

O diamante tem uma resistência ao desgaste de aproximadamente três vezes maior que o carbeto de silício enquanto que o CBN resiste quatro vezes mais do que o óxido de alumínio. A alta resistência ao desgaste torna às ferramentas de corte feitas com superabrasivos ideais para usinagem de materiais duros a alta velocidade de corte. A vida útil de um grão de CBN é aproximadamente 100 vezes maior do que a do óxido de alumínio. Apesar de os cristais de CBN terem alta resistência ao desgaste, as suas arestas afiadas podem eventualmente perder o brilho se o abrasivo, o ligante e as condições de retificação não forem compatíveis. Idealmente, o cristal deveria fraturar-se de maneira controlada para expor arestas de corte novas e afiadas. Se o cristal for muito resistente para a aplicação, a fratura pode não ocorrer. Como resultado, ele tem um desgaste polido e plano, que não corta efetivamente. Se o cristal não for resistente o suficiente para uma dada aplicação, ele pode fraturar-se prematuramente, desperdiçando abrasivo, encurtando a vida do rebolo e gerando um acabamento superficial mais rugoso. Cristais de média resistência deveriam ser utilizados para a

maioria das operações e cristais com maior resistência são recomendados para operações onde as forças de retificação são maiores, (Bianchi et al., 2002).

### 2.2.1.3 Resistência a compressão

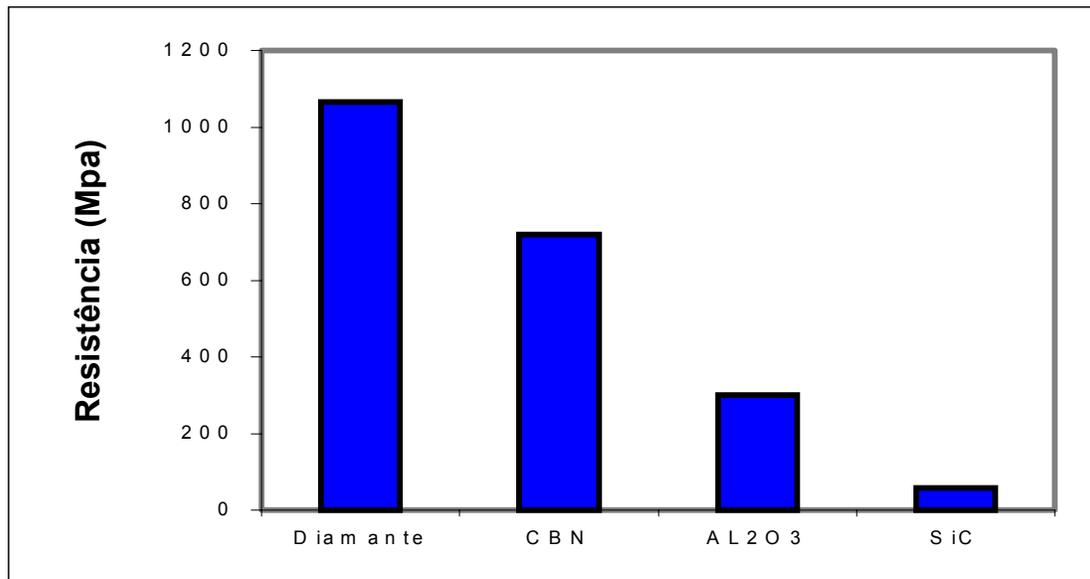


Figura 2.6: Resistência à compressão de diversos grãos abrasivos (Krar e Ratterman, 1990)

A resistência a compressão é definida com sendo a máxima tensão de compressão que o material pode suportar antes de romper. Ambos o diamante e o CBN tem uma alta resistência a compressão conforme mostra a figura 2.6 As ferramentas feitas com superabrasivos tem uma excelente qualidade em resistir aos choques devido a cortes interrompidos e às forças geradas em alta taxa de remoção.

#### 2.2.1.4 Condutividade térmica

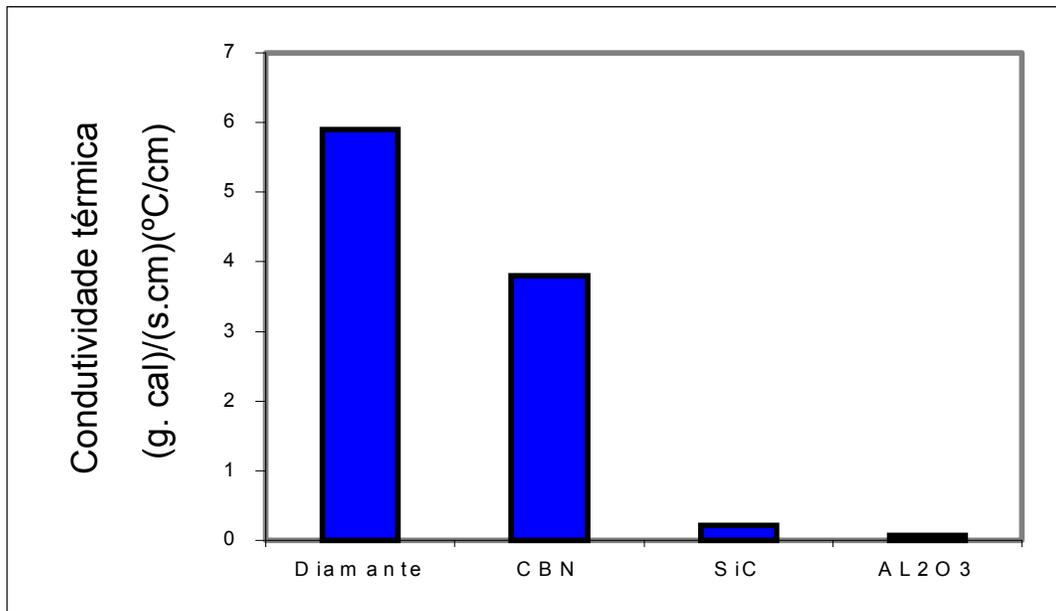


Figura 2.7: Condutividade térmica de diversos grãos abrasivos (Krar e Ratterman, 1990)

Uma alta condutividade térmica do material significa que o calor gerado pelo processo é rapidamente retirado da região de corte e assim a ferramenta não é excessivamente aquecida e, portanto não se desgasta tão rapidamente.

Na operação de retificação, os cavacos produzidos são pequenos devido aos pequenos avanços e profundidades de usinagem. A pequena massa de cavaco gerado não é suficiente para levar embora todo o calor gerado pelo corte e, por isso a ferramenta atinge altas temperatura, o que faz com que propriedades como estabilidade térmica e química (para impedir a difusão que é incentivada pela alta temperatura) sejam imprescindíveis (Vieira Jr. et al., 1999).

A figura 2.7 mostra que o diamante e o CBN tem excelente condutividade térmica com relação aos abrasivos convencionais e tem um grande poder de dissipar o calor principalmente em usinagem com alta taxa de remoção de materiais duros, abrasivos

ou difíceis de serem usinados. As altas temperaturas desenvolvidas durante usinagem geram muito calor que é rapidamente dissipado reduzido assim o risco de provocar danos térmicos para a peça de trabalho.

Devido à combinação das propriedades de resistência à compressão, dureza, resistência ao desgaste e condutividade térmica, os superabrasivos assumiram uma posição de maior importância nas indústrias.

### **2.2.1.5 Tenacidade / Friabilidade**

Falando em termos de abrasivos, tenacidade implica capacidade para suportar tensões provocadas por impacto, sem quebrar em pedaços. Em mecânica encontramos a tenacidade em materiais dúcteis, porém a ductilidade não existe nos abrasivos, (Nussbaum, 1988).

Devemos no caso entender como tenacidade, a quantidade de trabalho necessário para quebrar um grão abrasivo sob determinadas condições (esforços aplicados). Deste modo, quanto maior for o esforço aplicado para produzir ruptura do grão, maior é a tenacidade do mesmo. O óxido de alumínio tem tenacidade maior do que o SiC, embora tenha dureza menor. A razão corresponde às diferenças de comportamento dos dois materiais em esforços de tensão versus compressão, sendo que a quebra ou ruptura acontece por tensão e a dureza é geralmente baseada num movimento de compressão (Nussbaum, 1988).

O conceito oposto ao da tenacidade é o da friabilidade, que corresponde a facilidade para quebrar em pedaços sob uma determinada força ou impacto. A friabilidade define muito bem uma divisão importante entre os abrasivos (Nussbaum, 1988):

- os apropriados para trabalhos duros;
- os adequados para trabalhos de retífica de precisão que, geralmente serão mais duros e friáveis do que os outros.

Foi constatado que a pureza do material é a maior causa da sua friabilidade. Quanto mais puro for o grão, mais friável será (menos tenaz). A porosidade e a forma também influenciam a friabilidade. Quanto maior for a porosidade, maior será a friabilidade.

Na tabela 2.3 são apresentados os impactos de um rebolo de CBN devido às alterações dos grãos e ligante (GE Company, 1998).

Tabela 2.3: Impactos que ocorrem no rendimento de um rebolo superabrasivo de CBN em virtude de alterações dos grãos e ligante (GE Company, 1998)

Alterações Impacto	Friabilidade		Granulometria		Concentração		Dureza (ligante)	
	- Friável	+ Friável	Fina	Grossa	Baixa	Alta	Baixa	Alta
	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Taxa de remoção de material	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Relação G (aplicação específica)	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Acabamento superficial	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↓	↑
Consumo de energia	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↑

Legenda: ↑ Melhora ↓ Piora

## 2.2.2 Super-revestimentos para superabrasivos

Os superabrasivos apresentam inúmeras vantagens com relação aos abrasivos convencionais. Sua superioridade quanto a dureza, tenacidade, resistência a abrasão e condutividade térmica lhe proporcionou uma grande aceitação no mercado industrial. Mas segundo Carius (1999), esta superioridade pode ser neutralizado tanto no diamante quanto no CBN quando a liga entre os cristais e o material da matriz for fraca. O ideal para uma liga é ser suficientemente forte para reter os cristais a medida que eles se desgastam e se reafiam e somente liberá-los depois deles perder a ação efetiva de corte para serem substituídos por outros cristais emergentes da superfície.

Os super-revestimentos foram introduzidos no mercado para melhorar a aderência dos cristais na liga e assim aumentar a vida útil dos rebolos. Os cristais não revestidos são mais lisos, por isso eles se deprendem da liga com mais facilidade do que aqueles revestidos. As figuras 2.8 e 2.9 mostram o aspecto visual de cristais de CBN revestidos e não revestidos.

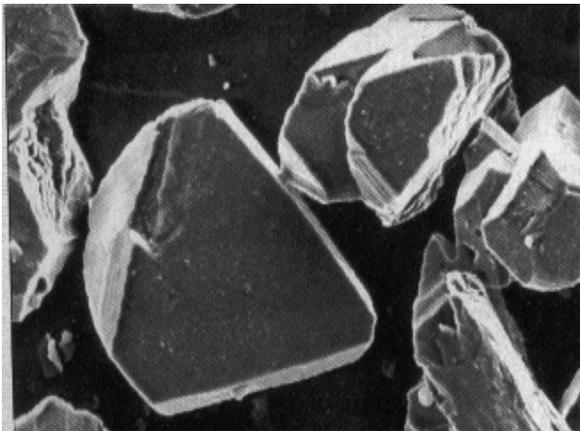


Figura 2.8: CBN não revestidos  
(Caruis, 1999)

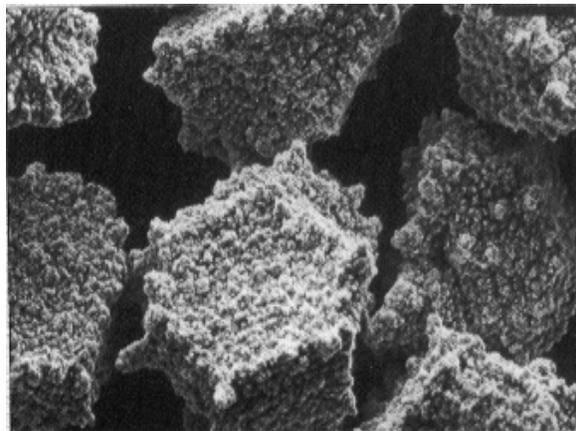


Figura 2.9: CBN revestidos  
(Caruis, 1999)

Os super-revestimentos proporcionam uma excelente retenção dos cristais na liga. Isto ajuda a evitar que os cristais desgastados se desprendam da liga prematuramente. Os revestimentos geralmente caracterizam-se por uma espessa camada metálica de níquel

ou cobre. O níquel foi o primeiro revestimento disponibilizado comercialmente no mercado sendo o mais usado. Mas existem vários outros materiais de revestimento como o titânio, o molibdênio, o cromo, o cobalto, a prata, o ferro, os polímeros e os cerâmicos que podem ser utilizados dependendo da aplicação. A escolha de um rebolo superabrasivo com cristais revestido e outro com cristais sem revestimento, para retificação, depende dos requisitos particulares de cada aplicação.

Segundo Carius (1999), a maioria dos rebolos de ligas vitrificadas e de camada única, tem cristais superabrasivos sem revestimento para aplicação de retificação de diâmetros internos de rolamentos, retificação cilíndrica de cames do eixo de comando de válvulas e dos pinos, retificação dos dentes de engrenagens, de formas especiais das ferramentas de corte e de componentes aeroespaciais. Os rebolos de liga resinóide com cristais superabrasivos sem revestimentos são geralmente usados para o polimento de materiais metálicos e não metálicos (vidro, cerâmico, carbetto de tungstênio). Somente quando a combinação de revestimento superabrasivos com sistemas de ligas for otimizada, os rebolos para retificação, oferecerão desempenho maximizado e custo eficaz.

### **2.2.3 Aplicações do Nitreto Cúbico de Boro (CBN)**

Em 1950, a General Electric (GE) reconheceu a necessidade de melhorar os materiais abrasivos devido às dificuldades e algumas vezes a impossibilidade de usinar materiais duros como as superligas e materiais compósitos e assim partiu para o desenvolvimento de novos materiais. Assim foi desenvolvido e introduzido o CBN no mercado industrial que tem uma alta eficiência para a retificação de materiais difíceis de serem retificados DTG (*Difficult To Grinding*). Na retificação de materiais DTG, os rebolos convencionais perdem a capacidade de corte mais rapidamente, o que resulta em valores elevados de forças de corte, de temperatura (gerado por atrito) e as taxas de remoção de material são reduzidas, afetando a precisão geométrica e dimensional das peças retificadas. De forma oposta os rebolos de CBN têm capacidade de corte prolongada e alta condutividade térmica que reduz significativamente o calor gerado (Bianchi et al., 1999)

O CBN é conhecido no mercado como o Borazon que é o nome comercial que lhe foi dado pela GE. O CBN é um abrasivo com dureza maior do que do carbeto de silício e menor do que do diamante. Ele tem a habilidade de usinar aços duros por períodos longos sem necessidade de dressagem com alta precisão de forma e acabamento com menor desgaste quando comparado com o óxido de alumínio ou carbeto de silício. Os rebolos de CBN são recomendados para usinagem de qualquer aço carbono ou liga endurecido a partir de 50 HRC, ferros fundidos extremamente duros e resistentes à abrasão, ligas de aços resistentes à abrasão, super ligas de níquel ou cobalto com dureza acima de 35 HRC e metais especiais, ( Bianchi et al., 2002).

A vida útil de um grão de CBN é muito maior do que a do óxido de alumínio. Além disso, o CBN é quimicamente inerte na presença do carbono o que não acontece com o diamante. Devido a sua geometria (pontagudo), o CBN tende a usinar suavemente proporcionando um bom acabamento e alta integridade superficial.

O CBN pode usinar aços com alta taxa de remoção e excelente acabamento, no entanto ele apresenta o inconveniente de reagir com a água a alta temperatura. O vapor da água dissolve a camada protetora do óxido de boro deixando a superfície

exposto a hidrólise provocando desgaste prematuro e baixa razão G. A razão G é o termo que descreve o desgaste de um rebolo. Quanto maior, menor é o desgaste. A utilização de fluido a base de óleo com ferramentas superabrasivas (CBN) mostraram-se satisfatórios, pois os rebolos de CBN possuem a característica de resistência a temperatura elevada, além de facilidade de dissipação de calor (Bianchi, 2001).

O custo do CBN é alto mas a relação custo-benefício pode justificar facilmente seu emprego principalmente nas indústrias automotivas. É importante salientar que apesar das suas inúmeras vantagens, o CBN não pode ser utilizado em qualquer processo de retificação nem em qualquer máquina retificadora. O CBN requer o uso de máquinas rígidas e robustas com métodos corretos de perfilamento e dressagem.

### **2.3 Usinabilidade**

A usinabilidade define o grau de dificuldade relativo de se usinar um material. No sentido prático, dificuldade relativa refere-se ao desgaste da ferramenta e da potência requerida para usinar um material. De modo geral, usinabilidade pode ser definida como uma grandeza que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão, (Diniz et al., 1999).

A usinabilidade depende do estado metalúrgico do material, da dureza, das propriedades mecânicas do material, da sua composição química, das operações anteriores efetuadas sobre o material (sejam a frio ou a quente) e do eventual encruamento. Pode-se ter um material que tenha uma boa usinabilidade quando se leva em conta uma propriedade de usinagem, como por exemplo a vida da ferramenta e não possuir boa usinabilidade quando se leva em conta outra propriedade como por exemplo a rugosidade da peça usinada. Mas a usinabilidade não depende somente das condições íntimas do material, ela depende também das condições de usinagem, das características da ferramenta, das condições de refrigeração, da rigidez do sistema máquina - dispositivo de fixação - peça - ferramenta e dos tipos de trabalho executados pela ferramenta (Diniz et al., 1999). Máquinas rígidas e potentes são geralmente requeridas para trabalhar com materiais de baixa usinabilidade, enquanto

que uma alta produtividade pode ser obtida com máquinas com potência moderada quando o material tem alta características de usinabilidade. É importante salientar que a compreensão dos fatores que influenciam a usinabilidade é muito importante na compreensão da usinagem com abrasivos e no processo de retificação.

A usinabilidade depende das propriedades físicas, mecânicas e químicas de um dado material.. O cavaco proveniente da usinagem com ferramentas de corte tem dimensões uniformes e o seu processo de formação é previsível. A espessura do cavaco normalmente varia de 0,12 a 1,5 mm. No processo de retificação, os grãos abrasivos produzem cavacos extremamente pequenos com dimensões e formas variadas. A espessura pode variar de 0,002 a 0,05 mm em condições grosseiras de usinagem (Krar e Ratterman, 1990).

As características do cavaco na operação de retificação são devidas a disposição aleatória e protuberância dos grãos abrasivos na superfície dos rebolos. Na usinagem com ferramentas de corte, pode-se produzir cavacos longos, uniformes e a potência requerida para remover um determinado volume de material é menor do que na operação de retificação. Em geral a potência requerida para remover 1 cm<sup>3</sup> de um dado material é de 10 a 30 vezes maior que nas operações de usinagem que usam ferramentas de corte (Krar e Ratterman,1990).

## 2.4 Mecanismo de formação de cavaco no processo de retificação

O rebolo é uma ferramenta com uma grande quantidade de arestas de corte distribuídas de forma aleatória. Os grãos abrasivos apresentam configurações mais ou menos esféricas, apresentam ângulos de ataque negativos em todas as direções possíveis. Grãos com formas muito angulosas podem apresentar alguns pontos de corte com ângulos de ataque de valor zero ou até positivo, porém estes grãos são relativamente frágeis devido às seções transversais de pouca espessura e por isso serão de baixa durabilidade (Nussbaum, 1988). Cada grão ao entrar em contato com a peça, gera a formação de um cavaco muito pequeno que se dá em três fases:

- Fase 1: Contato grão – peça
- Fase 2: Deformação plástica
- Fase 3: Corte e saída do cavaco

Quando o grão começa a atritar com a peça, ele causa primeiramente uma deformação elástica na pequena porção de material tocado por ele (escorregamento do grão). Ao prosseguir no seu caminho na peça, as tensões vão aumentando e, então, o grão passa a causar deformação plástica em outra porção do material (riscamento), até que, finalmente, continuando o processo de crescimento das tensões, a tensão de ruptura do material à frente do grão é ultrapassada e acontece a remoção de uma pequena porção de material em forma de cavaco (Diniz et al., 1999). A figura 2.10 ilustra a formação de cavaco na operação de retificação.

No caso de materiais frágeis como o aço endurecido, a fase 2 é bem curta pois o material se rompe com pouca deformação plástica.

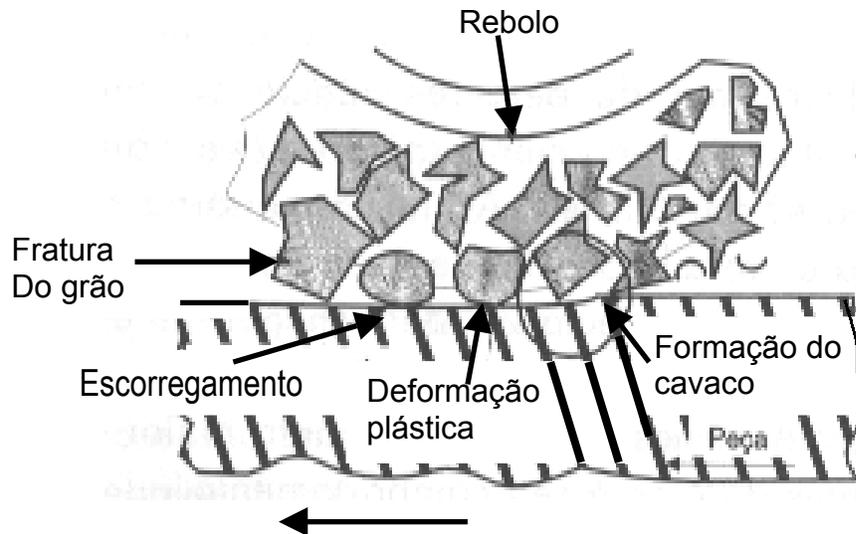


Figura 2.10: Mecanismo de formação de cavaco (Diniz e al., 1999)

Konig (1980) caracterizou o mecanismo de remoção de cavaco em três fases conforme descrito a seguir.

Fase 1: onde ocorrem deformações plásticas e o atrito entre o grão abrasivo e a peça.

Fase 2: onde ocorrem deformações elásticas e plásticas, atrito entre o grão abrasivo e a peça e atrito interno entre os grãos da estrutura do material.

Fase 3: onde ocorrem as deformações plásticas, o atrito entre o grão abrasivo e a peça, o atrito interno do material e, finalmente a separação do material que origina o cavaco.

Segundo Vieira (1992), a extensão de cada uma dessas fases depende principalmente de fatores relacionados às características de agressividade do rebolo (grau de afiação de grão abrasivo) e aos parâmetros de operação utilizados (profundidade de corte, velocidade de corte e velocidade da peça).

## 2.5 Mecanismo de desgaste do rebolo

A topografia de um rebolo exerce uma grande influência no desempenho de uma operação de retificação. Ela é influenciada por vários fatores no decorrer da operação e se altera ao longo da vida do rebolo devido ao desgaste sofrido. Após um certo tempo de uso, o rebolo se desgasta e perde suas principais características o que exigirá uma dressagem.

O desgaste de rebolo de CBN com ligante resinóide ocorre pela ação de dois mecanismos, chamados macro e microdesgaste, decorrentes da interação entre os grãos abrasivos e a peça (Bianchi et al., 1993). O microdesgaste refere-se ao desgaste por atrito e fratura dos grãos e o macrodesgaste, ao desgaste do ligante.

Segundo Malkin (1989), os principais mecanismos de desgaste de um rebolo são:

O desgaste por atrito, a fratura do grão abrasivo e a fratura ou desgaste do aglomerante conforme mostra a figura 2.11.

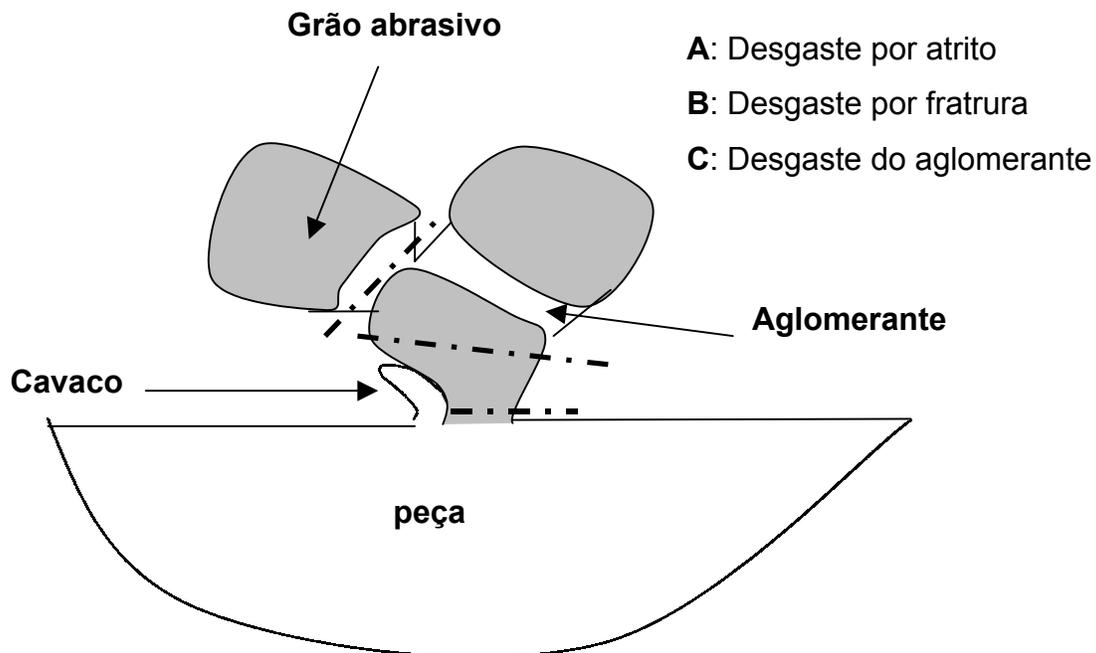


Figura 2.11: Mecanismo de desgaste de um rebolo

### **2.5.1 Desgaste por atrito**

O desgaste por atrito decorre da iteração entre o grão abrasivo e o material que está sendo usinado o que gera arredondamento das arestas cortantes e / ou entupimento dos poros do rebolo. Este desgaste de natureza mecânica e química causa a perda da afiação do grão. O desgaste de natureza química ocorre e é mais acentuado quando o material do grão abrasivo é muito mais duro do que o do material usinado. Quando o grão interage com a peça em elevadas temperaturas, inúmeras reações químicas podem ocorrer envolvendo além do grão abrasivo e a peça, o aglomerante, o fluido de corte e a atmosfera. É o caso do diamante que se degrada rapidamente na presença de ferro. Quanto ao CBN, ele tem uma boa estabilidade química em altas temperaturas e se desgasta muito menos com os metais ferrosos. Segundo Malkin (1989), a medida que o grão se desgasta, os esforços de corte e a temperatura aumentam afetando a qualidade e a integridade superficial da peça usinada. O aumento das forças de retificação ocorre da seguinte forma. Os grãos abrasivos que permanecem por mais tempo presos no ligante sofrendo microdesgaste têm suas arestas de corte arredondadas ou danificadas em geral o que proporciona uma área de contato maior entre a peça e o grão desgastado e conseqüentemente os esforços de corte. O desgaste por atrito é insignificante em termo de volume mas tem grande influência no comportamento do grão durante a usinagem (Hahn et al. 1971). Em outros trabalhos, Lindsay (1984), desprezou o desgaste por atrito, chamando-o simplesmente de perda de afiação. Se em uma operação de retificação a perda de afiação ou desgaste por atrito é predominante, o rebolo precisa ser dressado para que não ocorra a queima da peça.

### **2.5.2 Fratura do grão abrasivo**

Quando o grão sofre o atrito inerente ao processo, ele pode se fraturar e depois se desprender do rebolo, causando o desgaste ou simplesmente ter suas arestas arredondadas causando a perda da afiação (Diniz et al., 1999). A fratura do grão abrasivo é um mecanismo de desgaste significativo, quando os rebolos utilizados são duros. Um rebolo é considerado duro quando consegue segurar o grão abrasivo com

mais tempo e com isso o desgaste por atrito acontece mais rapidamente. A fratura do grão gera novas arestas de corte que tornam o rebolo mais agressivo.

### **2.5.3 Desgaste do aglomerante**

A fratura ou desgaste do aglomerante durante a utilização de rebolos moles, é o mecanismo que ocasiona maior desgaste volumétrico. Este mecanismo está ligado à friabilidade do aglomerante. Rebolos moles apresentam uma menor quantidade de aglomerante o que aumenta sua probabilidade de ruptura, (Malkin, 1989). Com um rebolo mole, o aglomerante não consegue suportar as tensões geradas pelo processo, quebra e solta o grão, gerando o desgaste. O aglomerante também pode desgastar-se devido ao atrito com a peça e com os cavacos ou pelo ataque químico dos fluidos de corte, (Bianchi, 1992). A auto afiação provoca aumento da rugosidade pois torna o rebolo agressivo. O desgaste do ligante pode se dar por causas térmicas, pela geração do cavaco ou pela combinação entre ambas diminuindo a capacidade de retenção dos grãos abrasivos. Quando a temperatura de trabalho é elevada, há a deterioração térmica do ligante, que perde parte da sua capacidade de retenção dos grãos abrasivos. O cavaco gerado pela interação grão abrasivo e peça, incide ao sair, na parte do ligante que está à frente do grão abrasivo na direção do movimento do rebolo. O atrito entre o cavaco gerado e o ligante provoca continuamente o desgaste do ligante e este desgaste diminui a capacidade de retenção dos grãos abrasivos. O desgaste do ligante está intimamente ligado com a geometria do cavaco gerado. Desta forma variando as condições de trabalho, pode-se variar a geometria média dos cavacos de forma a prolongar a permanência do grão abrasivo na superfície do rebolo (Bianchi, 1993). Na retificação de aços duros ou endurecidos com rebolos de CBN, devido a pouca porosidade inicial do rebolo, os cavacos por serem muito finos acabam se alojando nos poros e a partir daí inicia-se o processo de desgaste do ligante. Neste caso o desgaste do ligante é menor pois os cavacos são muito pequenos e quebradiços. No caso de retificação do aço macio, o fenômeno é contrário. Como os cavacos gerados tem dimensões maiores e são menos quebradiços, eles desgastam mais rapidamente o ligante.

## **2.6 Dressagem e Perfilamento de rebolo**

O rebolo é constituído por múltiplos grão abrasivos de natureza diversas. Após um determinado tempo de uso, ele sofre um desgaste e começa a perder sua agressividade ou seja seu poder de corte. Diz-se que o rebolo está gasto. Para condicionar ou seja restituir ao rebolo sua agressividade e geometria, é necessário realizar as operações conhecidas como dressagem e perfilamento. Com os produtos superabrasivos, o perfilamento e a dressagem podem ser realizados em uma única operação, dependendo da aplicação. No entanto é comum separar as duas operações para obter melhores resultados pois, a vida das ferramentas utilizadas para o perfilamento é bastante afetada pela dureza dos grãos superabrasivos. Uma vez que o procedimento de dressagem modifique a topografia do rebolo, ele deve ser muito bem conhecido e controlado. Os resultados obtidos tanto no perfilamento quanto na dressagem dependem da velocidade de corte, da direção da velocidade de corte, do tipo e tamanho do grão, da profundidade de dressagem e da quantidade de abrasivos.

### **2.6.1 Perfilamento**

É a operação de dar forma a um rebolo, seja para fazê-lo girar corretamente centrado, sem batimentos, ou para dar as bordas um perfil especial, capaz de reproduzir corretamente a forma desejada.

### **2.6.2 Dressagem**

É uma espécie de “ reafiação ”, que consiste em fratura ou remover grãos arredondados e cegos (rebolo espelhado) ou limpar rebolos “ carregados ” de cavacos (rebolos empastados) para melhorar a agressividade, a qualidade em termo de precisão e de superfície.

A dressagem e o perfilamento são fatores muito importantes no uso efetivo de rebolos. Uma vez que o rebolo é montado na máquina, ele deve ser perfilado e dressado. Os rebolos de CBN (vitrificadas), por ter uma estrutura porosa, em vários casos podem ser

dressados e perfilados ao mesmo tempo. Para manter constante a qualidade do acabamento superficial da peça, os rebolos devem ser dressados e perfilados em intervalos de tempos bem definidos. O intervalo de tempo entre duas dressagens pode ser definido por exemplo pelo número de peças usinadas. Neste caso após usar a quantidade de peças estabelecida, o rebolo deve ser dressado.

Rebolos de CBN com ligante Resinóide são feitos de grãos de CBN com uma matriz Resinóide. Os grãos de CBN, são embutidos na resina e são curados. Devido a sua estrutura, os grãos não são protuberantes após o perfilamento razão pela qual eles devem ser dressados para promover uma usinagem efetiva.

Nos processos convencionais de dressagem e perfilamento, os rebolos são perfilados e dressados após serem desmontados das máquinas o que acarreta improdutividade e pode causar possíveis desalinhamento dos rebolos após sua montagem na máquina. Nas máquinas mais modernas, existem dispositivos que possibilitam a dressagem ou perfilamento sem necessidade de desmontar o rebolo, eliminando assim os problemas mencionados acima. Em certos casos uma parte do rebolo é uma gaveta que pode ser desmontada para fazer eventuais inspeções visuais e análises através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura 2.12 mostra um rebolo com o detalhe da gaveta.

No caso de rebolos de CBN não eletrodepositados, os rebolos são perfilados e depois devem ser avivados ou dressados . Este avivamento é feito com um bloco, normalmente feito do mesmo material utilizado em rebolos convencionais (óxido de alumínio). O rebolo de CBN corta este bloco, que deve proporcionar o desgaste da liga, liberando espaços para cavacos e para o fluido refrigerante escoar.

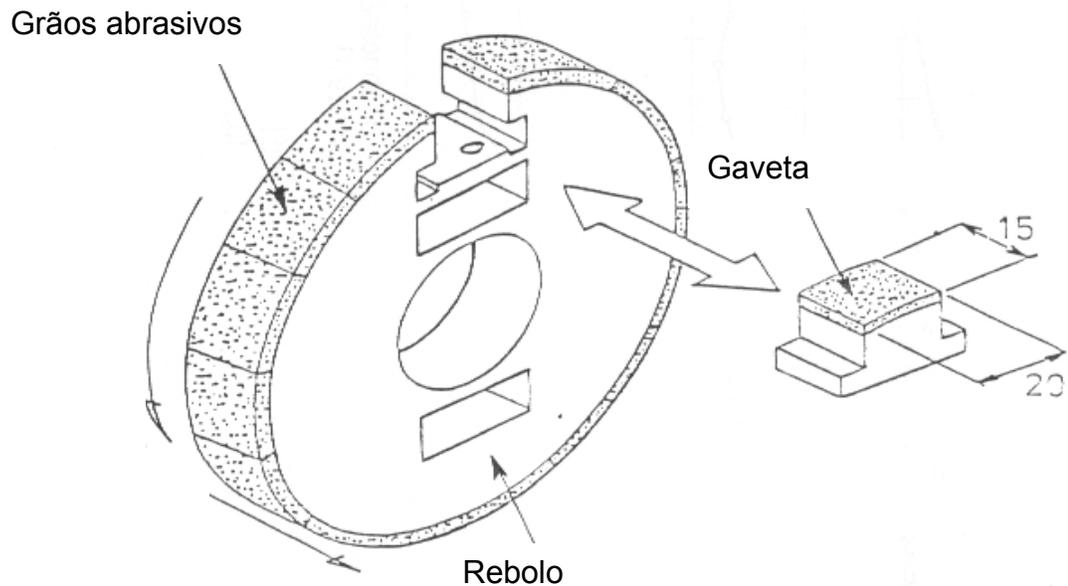


Figura 2.12: Rebolo de corte com o detalhe da gaveta (Noritake Company, 2000)

### 2.6.3 Dressagem convencional

Em dressagem convencional, vários tipos de dressadores são utilizados. Os bastões dressadores, os discos dressadores e os dressadores de ponta única podem ser empregados para dressagem de rebolos diamantados ou de CBN. Cada um desses dressadores tem sua aplicação apropriada. Existem também dressadores que têm formas especiais para atender rebolos que tem perfis especiais. Os dressadores são normalmente feitos com óxido de alumínio ou carbeto de silício mas existem também dressadores diamantados. Em geral, em processo de dressagem, o dressador é móvel mas em certos casos ele pode estar fixo.

## **2.6.4 Novos processos de dressagem**

A grande influencia que as condições de dressagem podem provocar no desempenho de uma operação de retificação, motivou muitos pesquisadores a desenvolverem novos processos de dressagem.

### **2.6.4.1 Dressagem a Laser**

Neste processo, emprega-se um raio laser de alta potência, posicionado perpendicularmente à superfície do rebolo e que se desloca com uma velocidade definida pela coordenação entre os pulsos e a velocidade de avanço do feixe, de modo que toda a superfície do rebolo possa ser irradiada (Coelho et al., 1998). Este processo apresenta a vantagem de não gerar poluição além de deixar o material livre de esforços.

### **2.6.4.2 Dressagem eletrolítica**

A dressagem eletrolítica se aplica aos rebolos superabrasivos com ligante metálico. Neste processo, o rebolo atua como pólo positivo e um eletrodo fixado em uma distância de 0,1mm ao rebolo funciona como pólo negativo. Quando há fornecimento de corrente elétrica, ocorre o fenômeno de eletrólise e inicia-se o processo de remoção de material. Neste processo há apenas remoção do ligante de tal maneira que os grãos abrasivos ficam sempre uniformemente protuberantes.

### **2.6.4.3 Dressagem por descarga elétrica**

A dressagem por descarga elétrica também aplica aos rebolos de diamantes com ligante metálico. Este processo emprega um par de eletrodo fixos ou móveis mantido em contato com o rebolo. Quando os eletrodos deixam de ter contato com o rebolo, ocorre instantaneamente uma descarga elétrica e começa o processo de remoção de material. Analogamente ao processo de dressagem eletrolítico, o processo por

descarga elétrica apenas promove a remoção do ligante, o que é favorável a obtenção de grãos protuberantes.

#### **2.6.4.4 Dressagem por jato abrasivo**

A técnica de dressagem com jato abrasivo agora é comum. Ela consiste em aplicar contra a superfície plana do rebolo um jato abrasivo com alta pressão e velocidade (100 a 200 m/s). Quando os grãos abrasivos se chocam contra o rebolo, eles removem os cavacos que ficam presos entre os grãos assim como o material do ligante e promovem a renovação da agressividade do rebolo. A dressagem por jato abrasivo promove a regeneração da superfície irregular.

O comportamento do desgaste de um rebolo depende da extensão da protuberância do grão durante retificação. Testes de retificação com diferentes velocidades, tem mostrado que a protuberância do grão após dressagem deve ser adequado para o esforço de corte sobre o grão abrasivo. Isto pode ser facilmente obtido com jato dressador através da seleção de parâmetros adequados.

#### **2.6.4.5 Dressagem com abrasivos livres**

Neste processo, o rebolo de CBN é mergulhado dentro de um tanque ou reservatório contendo grãos abrasivos de óxidos de alumínio misturado com óleo. Uma placa de dressagem exerce uma pressão constante na superfície do rebolo que é fixo em um eixo que o movimentam. Quando o eixo gira, o rebolo também gira e os grãos abrasivos livres começam a se movimentar. Alguns grãos aderem a superfície do rebolo e começam a escavar o material do ligante, promovendo a protuberância dos grãos abrasivos do rebolo (Coelho et al., 1998).

Existem outros novos métodos de dressagem em desenvolvimento e em processo de aperfeiçoamento que criam grandes expectativas para solucionar os problemas encontrados com os métodos convencionais de dressagem. Pode-se citar o método que emprega dressador *Cooltip*, o método que usa um cortador de segmentos, a

dressagem forçada ou de maneira geral métodos inteligentes de dressagens (Coelho et al.,1998).

Durante o processo de retificação, as decisões quanto a momento de dressagem e perfilamento do rebolo são normalmente tomadas pelo operador que na maioria das vezes se baseia apenas na sua experiência. É comum ver operadores de máquinas corrigirem parâmetros de corte para resolver determinados problemas como por exemplo ocorrência da queima da peça. Para tirar esta dependência dos operadores e automatizar a decisão correta que deve ser tomada, foram desenvolvidos, sistemas de monitoramento em retificadoras para possibilitar uma melhoria na confiabilidade das operações, aliada a um aumento de qualidade e redução de custo. Segundo Felipe Jr. (1996), as operações de retificação que possuem funções monitoradas por sistemas que são capazes de decidir ações corretivas são chamadas operações de Retificação Inteligente (RI).

Existem diversos métodos de monitoramento que podem ser utilizados no processo de retificação. Dependendo do que se deseja monitorar. Pode-se escolher qual o melhor método ou o mais adequado às condições particulares de cada problema e de cada empresa. Depois da identificação, é feita a escolha dos meios e técnicas a serem utilizados no monitoramento (Oliveira, 1995).

#### **2.6.4.6 Emissão acústica**

A emissão acústica (E.A) pode ser definida como ondas transientes de tensão geradas pela repentina liberação de energia de deformação ou pela liberação de energia de fricção de uma ou várias fontes localizadas numa estrutura. Um dos métodos de monitoramento da retificação mais estudadas nos últimos anos é, o que emprega a análise de sinal de Emissão Acústica.

Segundo Felipe Jr. (1996), uma das principais vantagens deste método é não interferir no processo, já que o sistema capta os sinais de emissão acústica gerados pela retificação através de um sensor fixado em algum ponta da máquina. Outra vantagem é que este tipo de sistema pode ser aplicado no monitoramento de diversos fenômenos

ocorridos durante a retificação, utilizando um único sensor fixado em um ponto que permite captar os sinais gerados por estes fenômenos. Como exemplo pode-se utilizar sensores de E.A e de vibração para determinar o fim de vida de um rebolo e portanto o momento ideal de se realizar a dressagem. A perda de agressividade do rebolo pelo desgaste dos grãos provoca uma alteração no ruído gerado pelo processo, devido ao maior atrito sem formação de cavaco existente ao longo do arco de contato grão-peça. Esse maior atrito causa uma maior geração de calor e o aparecimento de vibrações. Analisando o comportamento dos sinais gerados pelo processo, pode-se estabelecer limites aceitáveis para o nível de E.A e ou vibração que determine o fim da vida do rebolo.

#### **2.6.4.7 Exemplo de monitoramento de dressagem**

Neste processo, os passes de dressagem são apenas executados quando há contato entre rebolo e dressador, (Felipe Jr.,1996). Os passes são continuados até que o rebolo fique com o contorno desejado, isto é até que o primeiro movimento completo, sem defeito, seja detectado automaticamente. A operação de dressagem é então terminada e a máquina volta ao processo de retificação.

## Capítulo 3

### RETIFICAÇÃO DUPLA FACE COM MÁQUINA DE DISCO

#### 3.1 Métodos de retificação dupla face

É a retificação simultânea das duas faces paralelas de uma peça plana, mediante dois rebolos opostos, com eixos alinhados, ambos horizontalmente ou verticalmente. As peças a serem retificadas avançam entre os dois rebolos, de modo que os lados opostos são retificados simultaneamente. A totalidade da superfície da peça é retificada a um só tempo reduzindo possíveis deformações por tensões internas durante a remoção do material. Existem diferentes formas de alimentação das peças, utilizando diferentes dispositivos para cada uma delas, em função do formato da peça a retificar.

##### 3.1.1 Método de alimentação contínua com dispositivo rotativo

Neste método, a alimentação é feita mediante lâminas circulares ou transportadores rotativos, com aberturas para receber as peças que vão ser retificadas. Estas lâminas possuem guias laterais para manter as peças em posição, quando as mesmas não estão em contato com os rebolos. As peças são guiadas até o transportador rotativo que as leva até a área de retificação. As peças são giradas em um arco entre dois discos abrasivos posicionados para remover progressivamente o sobremetal. Este método é adequado para a retificação de grandes lotes de peças com espessura extremamente finas (por exemplo 0,75mm) e a máquina usa normalmente rebolos diamantados ou de CBN.

Este método pode ser utilizado tanto para peças que requeiram retificação apenas de uma face ou para peças que precisam ser retificadas ambas as faces ao mesmo tempo, como é o caso dos anéis de motores de combustão interna. A taxa de produção é de aproximadamente 1000 peças por hora com remoção de material de 0,127 mm a 0,254 mm de cada face, com uma tolerância de  $\pm 0,025$  mm. No caso de retificação de anéis de diâmetro externo igual a 28 mm e interno 3,56 mm a velocidade é de

aproximadamente 1700 m/min e são usados rebolos de diamante de granulação 220 (Woodard, 1997).

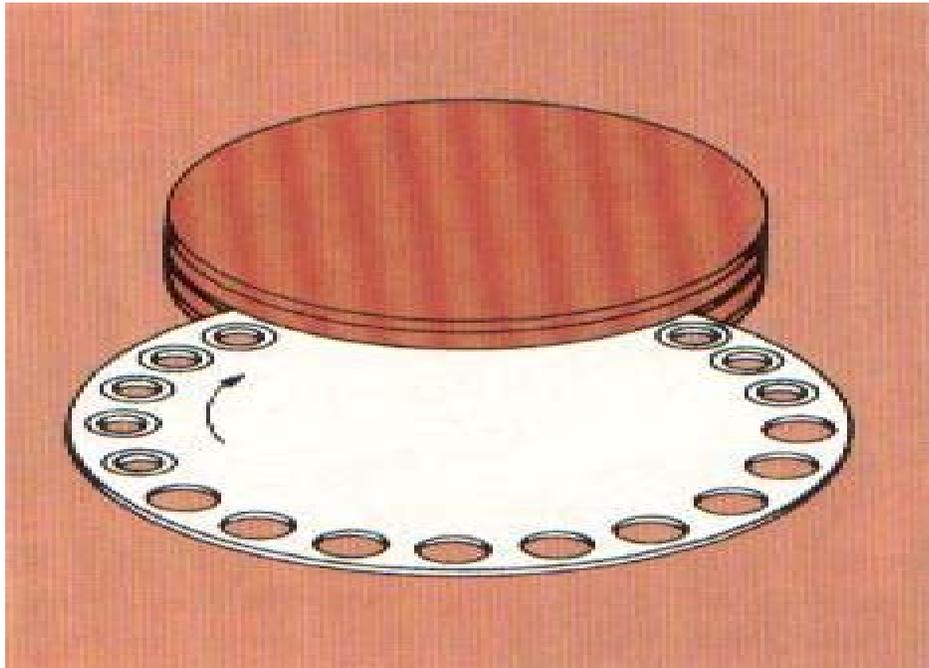


Figura 3.1: Método de alimentação contínua com dispositivo rotativo (Woodard, 1997)

### 3.1.2 Método de alimentação com dispositivo retilíneo

Neste método de retificação como mostra a figura 3.2, as peças são guiadas e transportadas entre os discos abrasivos opostos. Vários sistemas de transporte podem ser utilizados para a alimentação: correias acionadas, correntes, rolos, disco magnéticos, etc. Anéis cerâmicos ou de aço são retificados tipicamente através deste método com ambas as duas faces laterais retificadas a uma taxa de 10.000 a 16.000 peças/hora (Woodard, 1997). A máquina usa normalmente rebolos de diamante com aproximadamente 600 mm de diâmetro. Os rebolos de diamante devem ser operados em sentidos opostos um ao outro ( um no sentido horário e outro no sentido anti-horário) o que reduz o desgaste da ferramenta. A rotação oposta evita que os anéis

sejam girados na mesma velocidade em que os rebolos estão operando. Os abrasivos são ajustados com uma pequena angulação entre eles de tal forma que o anel que sai na retificação seja removido progressivamente através das faces abrasivas. Aproximadamente 0,254 mm de material é removido em um único passe. Este é o mais rápido dos métodos de retificação com disco duplo (Woodard, 1997).

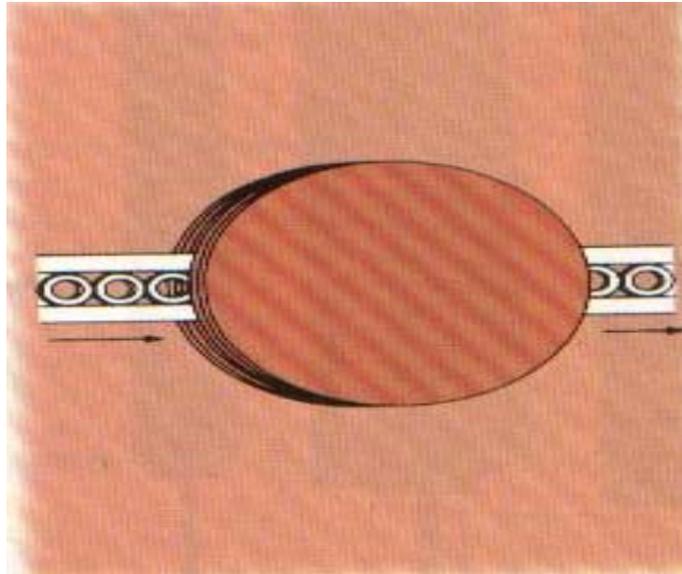


Figura 3.2: Método de alimentação com dispositivo retilíneo (Woodard, 1997)

### 3.1.3 Método de Alimentação descontínua com dispositivo oscilante

Este método é semelhante ao da fixação para fuso horizontal e vertical. No caso, as peças são animadas com movimento alternativo entre e através dos discos. A peça é mantida em um suporte (normalmente não é fixada) que tem um recorte com a forma do componente. O suporte é então avançado colocando o componente entre dois rebolos abrasivos. Conforme a peça é movida alternativamente, as profundidades de passes são dadas até a obtenção da dimensão desejada. A oscilação poderá se realizar pneumáticamente, hidraulicamente ou mecanicamente. Para esta operação, o mais

comum é o uso de rebolos diamantados de aproximadamente 600 mm de diâmetro e de granulação 100.

A dressagem programada e regular dos rebolos assegura um corte mais rápido e um menor consumo de potência pelos acionadores do fuso. Uma refrigeração adequada é imprescindível pois deve além fornecer estabilidade ao processo através do controle da temperatura, promover a expulsão do cavaco para fora da zona de retificação. Pelo controle da temperatura, é possível aumentar a vida do reboło abrasivo e reduzir a frequência de dressagem, permitindo portanto mais tempo de operação e custos mais baixos para as peças. Este método é recomendado para alta taxa de remoção de sobremetal, tolerâncias precisas e para lote pequenos.

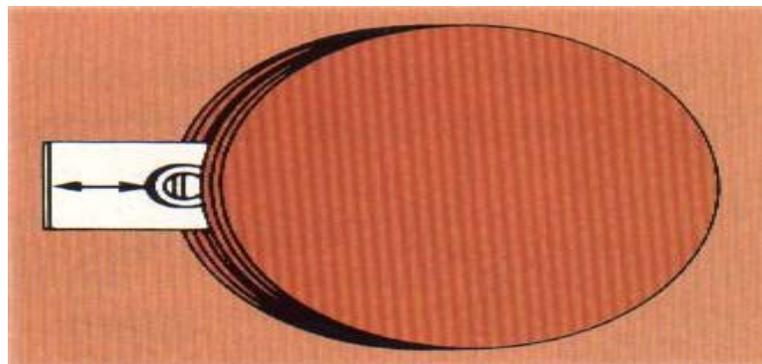


Figura 3.3: Método de alimentação com dispositivo oscilante (Woodard, 1997)

#### **3.1.4 Método vertical para fuso simples**

Neste método a retificação é feita com um fuso vertical e um único reboło abrasivo. Dependendo do tamanho da peça e do reboło, mais de uma estação de trabalho pode estar na área de retificação de tal forma que várias peças sejam retificadas simultaneamente (figura 3.4).

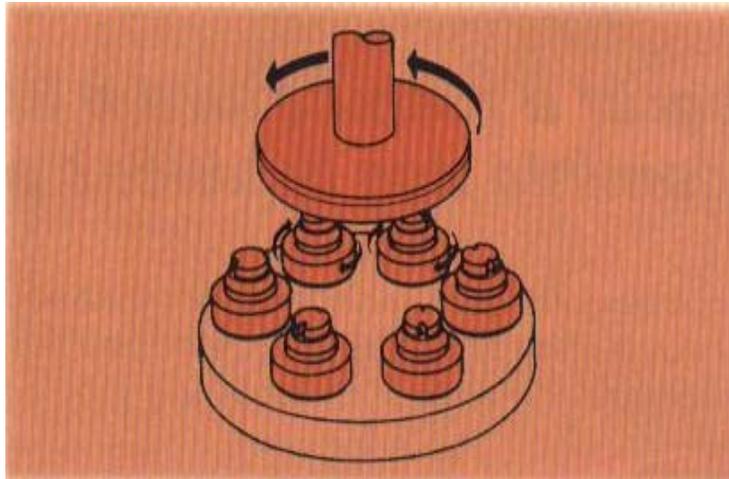


Figura 3.4: Método vertical para fusos simples (Woodard, 1997)

Durante a retificação, as estações individuais de fixação giram suas peças e quando uma certa profundidade é dada ao rebolo, ele penetra nas peças promovendo a remoção do material. As peças enquanto estão na zona de retificação somente giram em torno do eixo perpendicular a face de trabalho do rebolo e não sofrendo nenhuma distorção devido a fixação magnética ou mecânica.

#### **3.1.4 Método com fixação especial**

Este método é utilizado quando os métodos citados anteriormente não são adequados. Aplica-se em peças com tamanhos e formas bastante diferentes dos usuais e que não podem ser manuseadas com ferramentais usuais. São normalmente desenvolvidos projetos específicos para determinadas aplicações não convencionais.

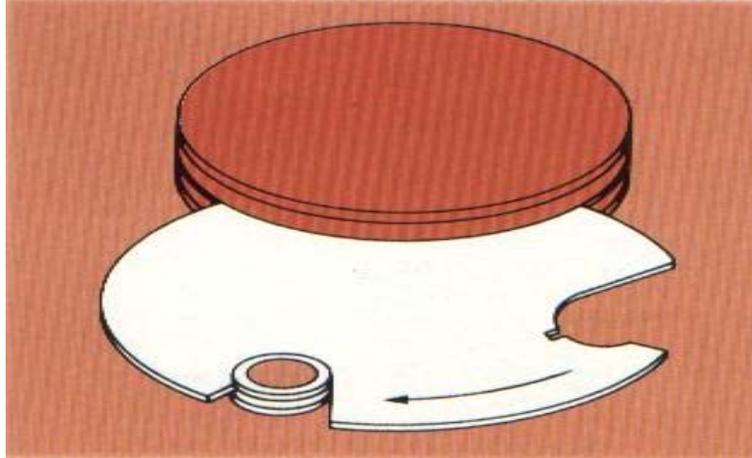


Figura 3.5: Método com fixação especial (Woodard, 1997)

### 3.2 Retificação dupla face com rebolo de CBN

A retificação com rebolos convencionais tem uma eficiência muito baixa na produção em série de componentes de precisão. Isto é uma das razões pelo qual foi desenvolvido o processo de retificação dupla face com disco duplo principalmente na indústria de manufatura. Muitas indústrias como a SPT (*Sealed Power Technologies*) em Barsinghausen na Alemanha, líder na produção de anéis de pistão de motores de combustão interna, buscam permanentemente soluções para otimização dos seus processos no objetivo de reduzir os custos de fabricação e aumentar a produtividade. Após realização de várias pesquisas, chegou-se à conclusão de que na retificação com disco duplo, os rebolos convencionais devem ser substituídos por rebolos de CBN.

O CBN foi a escolha natural para esta técnica de retificação. Rebolos diamantados também são utilizados na usinagem de materiais cerâmicos ou grafita e os resultados obtidos após experimentos são satisfatórios. Este novo processo tem uma aplicação em larga escala na indústria. Com esta técnica de retificação não há contato linear como nas operações realizadas em máquinas retificadoras de superfície com mesa de movimento alternativo. Na retificação de anéis de pistão por exemplo, as peças são alimentadas continuamente com uma velocidade uniforme até a área de retificação. Os rebolos podem remover em um único passe profundidade variando de 5 até 20  $\mu\text{m}$  a

uma taxa de 3.000 a 5.000 peças / hora. É importante que o rebolo seja compensado continuamente para garantir a repetibilidade dos resultados.

### 3.3 Aplicações de retificação dupla face

A figura 3.6 mostra a distribuição dos principais produtos retificados através do método de retificação dupla face. Este método se aplica na retificação de vários componentes mecânicos e principalmente na produção de peças internas de motores (Büthe et al., 1992).

#### 3.3.1 Distribuição de produtos retificados com máquinas com disco duplo

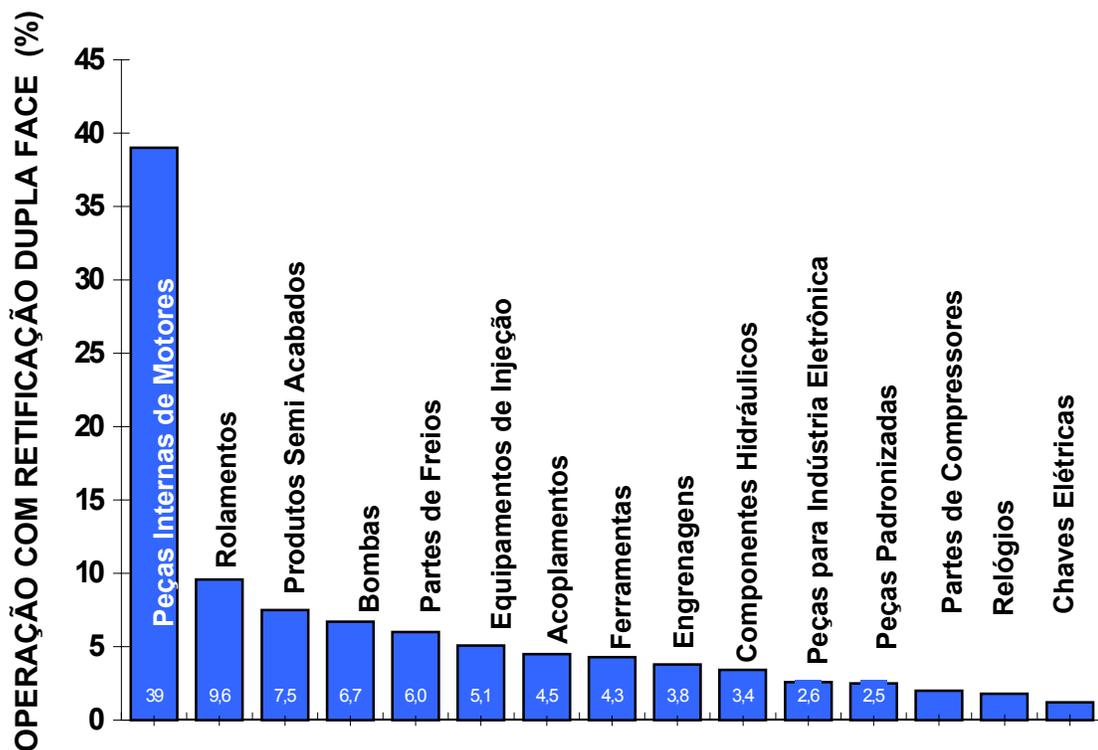


Figura 3.6: Distribuição de produtos retificados através do método de retificação dupla face (Büthe et al., 1992)

A figura 3.7 mostra diversos produtos retificados através do método de retificação dupla face. Entre estes, estão os anéis de pistão que são normalmente retificados através deste método em grande escala.

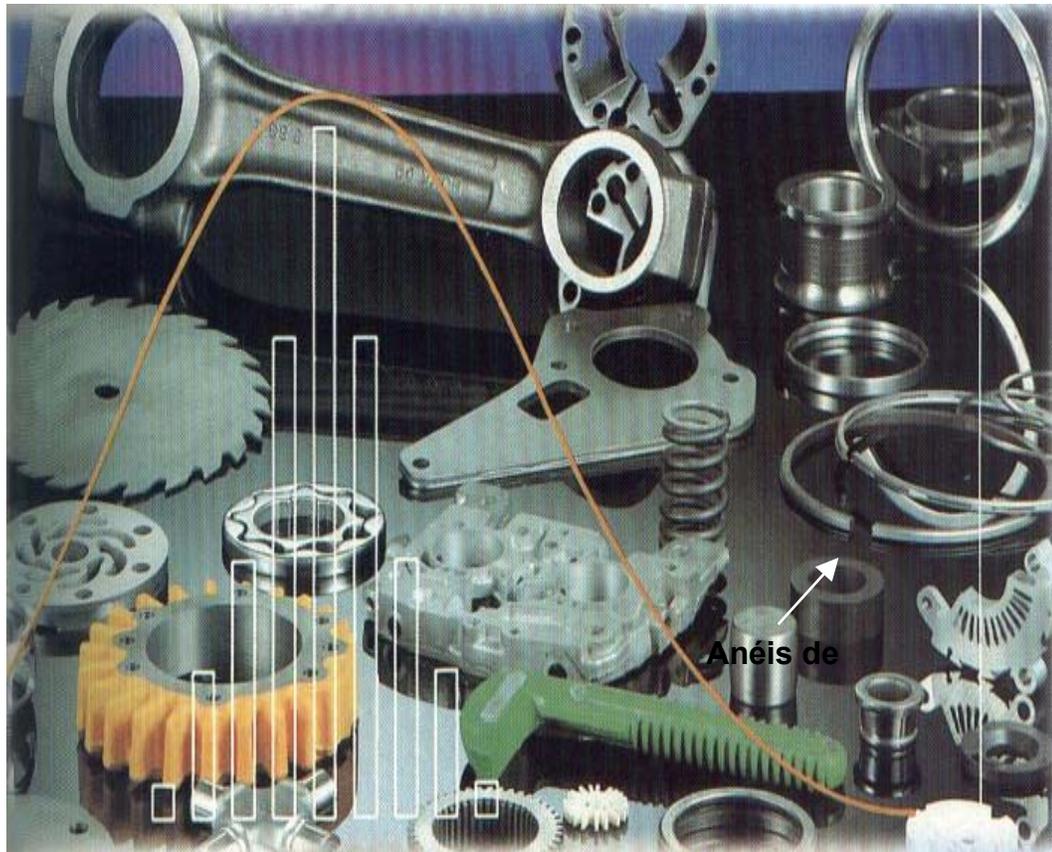


Figura 3.7: Produtos retificados através do método de retificação dupla face  
(Büthe et al., 1992)

## Capítulo 4

### INTEGRIDADE DE SUPERFÍCIE

#### 4.1 Importância da Integridade Superficial

O acabamento da superfície de uma peça tem influência significativa no funcionamento de uma peça. Entende-se por integridade superficial o efeito conjunto da rugosidade, das transformações estruturais e das tensões residuais sobre a superfície.

Quando se usina uma peça, deve se levar em consideração que a mesma possui dois importantes aspectos que devem ser definidos e controlados. O primeiro diz respeito às irregularidades geométricas da camada superficial e o segundo, às alterações metalúrgicas da camada superficial e subsuperficial, denominado, “ integridade superficial ”.

Integridade de superfície é o assunto que cobre a descrição e o controle de várias alterações possíveis, produzidas na superfície e na camada superficial durante o processo de retificação e inclui também o efeito dessas alterações nas propriedades dos materiais. O objetivo das investigações da integridade superficial de uma peça, é o desenvolvimento de controles de processo que possibilitam a obtenção de superfície não danificadas. As principais causas dessas alterações são: alta temperatura ou alta gradiente de temperatura, deformação plástica do material, reações químicas e transformações de fases.

## 4.2 Queima

Um dos tipos mais comuns de dano térmico é a queima da peça. A identificação de temperaturas, que na retificação podem variar de 1000 a 1500°C e chegam a atingir profundidade da ordem de décimos de milímetros conforme mostra a figura 4.1, motivou alguns autores como Shaw (1994) a estudarem os danos provocados na camada superficiais das peças retificadas.

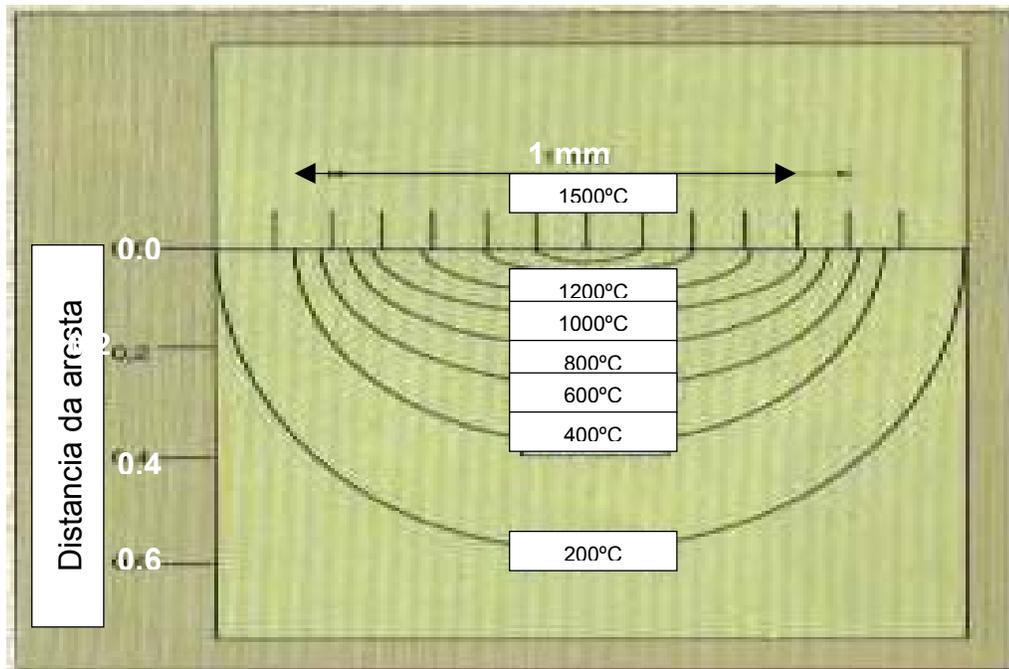


Figura 4.1: Gradiente de temperaturas na região de contato entre grão abrasivo e peça (Shaw, 1994 )

Dependendo do tipo de material, das características do rebolo e das condições utilizadas no processo de retificação, a temperatura na região de contato pode ser superior aos 700°C, suficiente para induzir alterações estruturais na material. Uma vez atingidas tais temperatura e devido ao rápido resfriamento que ocorre durante as operações de retificação, podem aparecer camada de martensita que, por serem extremamente frágeis, e metaestáveis, são indesejáveis e podem originar defeitos como trincas, variações dimensionais e alteração das propriedades mecânicas do material. O surgimento dessa fase ocorre geralmente quando o material fica exposto por tempo elevado a estas temperaturas. Entretanto, Shaw (1994) afirma que o surgimento da camada de martensita não é devido à exposição do material a elevadas temperaturas

por um longo período de tempo como ocorre nos tratamentos térmicos. Isto ocorre devido ao fato de que a matriz do material não se encontra em estado estacionário. Ela é deformada plasticamente ao mesmo tempo em que é momentaneamente aquecida. Não ocorre difusão, mas uma mudança coordenada dos átomos em curto espaço de tempo, Nishiyama (1978). Para compreender melhor esse comportamento, Shaw (1994) faz a seguinte analogia: quando uma porção de grão de açúcar é depositado em um copo contendo água ou café sem que ocorra agitação, é necessário um longo tempo até que os grãos se dissolvem e misturem-se ao líquido. Entretanto, se houver uma agitação, esse processo de dissolução e mistura será acelerado, graças ao deslocamento dos grãos provocado pela agitação. Quanto maiores forem os grãos do cristal de açúcar, mais tempo e mais esforços de agitação serão necessários para promover a dissolução e a mistura.

Um estudo conduzido por Vieira et al., (1999), mostra a zona termicamente afetada pelo calor e a transformação da martensita revenida de um aço 4340 temperado, revenido e retificado em condições abusivas de corte (figura 4.2). Tal estudo mostrou também que a zona termicamente afetada, é mais profunda quando as condições de dressagem forem mais agressivas.



Figura 4.2: Micrografia do aço 4340 após retificação (Vieira et al., 1999)

Aço 4340 – 28 HRC Parâmetros de retificação:  $a = 0,3$  mm,  $V_s = 30$  m/s,  $V_w = 0,12$  m/s - Dressagem agressiva

A queima ocorre durante o corte da peça pelo rebolo, quando a quantidade de energia gerada na área de contato, produz um aumento de temperatura suficiente para

provocar uma mudança localizada de fase no material da peça. A ocorrência pode ser observada visualmente pelo escurecimento da superfície, Malkin (1989). Quando a peça começa a queimar, existe uma tendência das partículas metálicas provenientes da peça se aderirem aos grãos abrasivos. A interferência destas partículas prejudica o corte e gera aumento das forças de retificação e deterioração da qualidade superficial da peça. A queima superficial da peça influencia na alteração da micro-estrutura do material. Medições de microdureza realizadas em aços temperados mostram que a queima induzida pelo processo de retificação é acompanhada por um processo de re-austenização do material. Para aços temperados retificados sem queima superficial, existe geralmente um amolecimento do material próximo a superfície, por terem sido atingidas temperaturas inferiores às de austenitização. Com a queima superficial, ocorre retempera do material, uma consequência da re-austenitização, seguida da formação da martensita não revenida. A sua constatação é feita por análise metalográfica, onde se pode verificar o aumento da microdureza superficial (Bianchi et al., 2001).

Como a ação de remoção de material em retificação é principalmente mecânica, o ponto de aplicação da energia decorrente do processo é precedido por uma onda de tensões seguida de uma onda de calor na zona termicamente afetada. A figura 4.3 mostra o eixo de propagação das tensões encontradas abaixo do rebolo de corte. O atrito e a ação de corte entre o rebolo e a peça são responsáveis pelo calor gerado. A zona termicamente afetada foi medida conforme mostra a figura 4.4. A profundidade e a intensidade da onda de calor também contribui nos efeitos das tensões residuais e a amplitude do calor é tal que o material pode sofrer alterações metalúrgicas (Bellows, 1983).

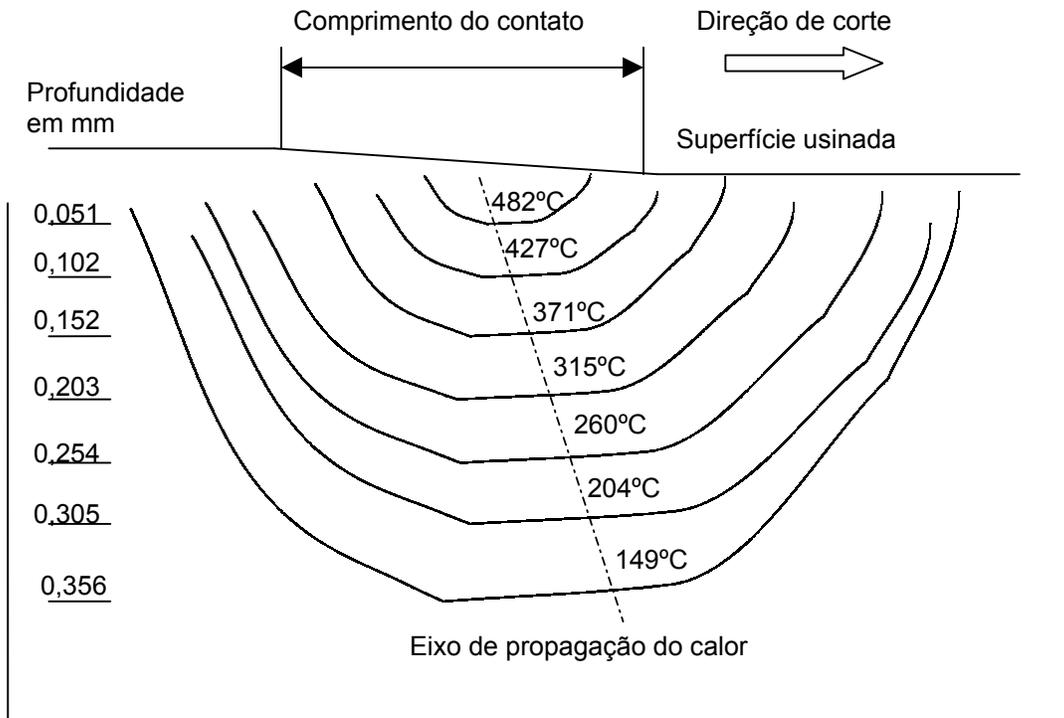


Figura 4.3 : Gradiente de temperatura na peça retificada (Bellows, 1983)

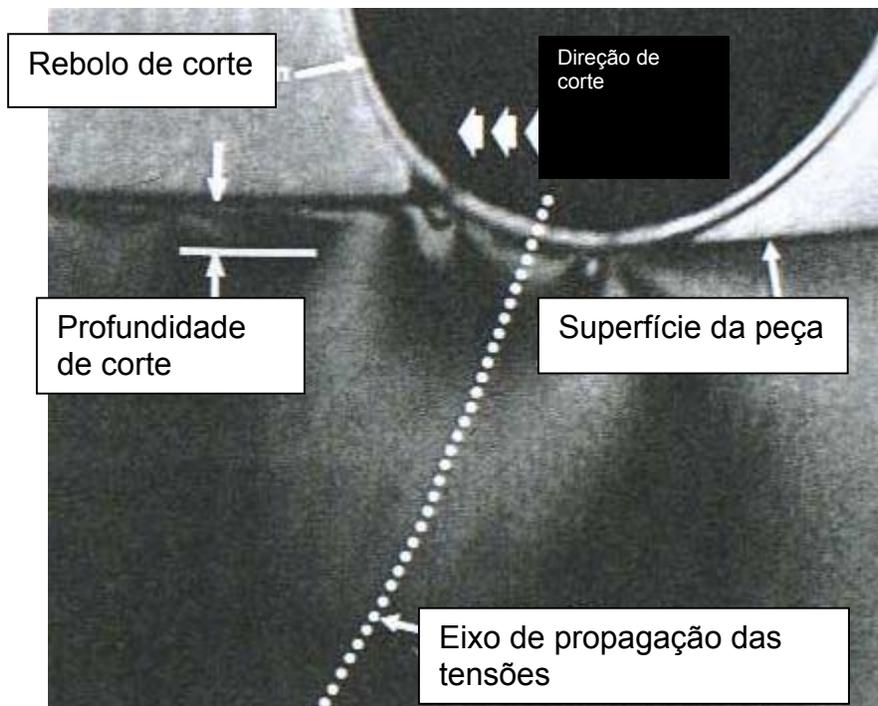


Figura 4.4 : Diagrama isocromática da Tensões durante a retificação (Bellows, 1983)

### 4.3 Trincas

Quando um material é retificado em condições de remoção inadequada, ele pode sofrer vários danos entre os quais trincas. As trincas superficiais são resultados do excessivo aquecimento durante a retificação. A severidade das trincas pode variar e até não ser visível imediatamente após a retificação. As trincas decorrentes de uma operação de retificação de alta tensão são visíveis em profundidade de 0,076 a 0,10 mm (Bellows, 1983). Em algumas superfícies submetidas a elevadas tensões de tração, as trincas irão se formar abaixo da superfície e não serão visíveis até que o topo seja atacado eletricamente, (Lucca et al., 1998). As tensões residuais de tração podem também provocar o início de trincas e conseqüentemente a diminuição da resistência à fadiga do material. As trincas também aumentam também a suscetibilidade da superfície do material ao ataque de processos corrosivos. Xu et al., (1996), estudaram a influência do tamanho do grão com relação aos esforços produzidos, rugosidade da superfície e danos na subsuperfície. Eles descobriram que grãos com 3 $\mu$ m de tamanho não causaram danos enquanto que grãos com 35 $\mu$ m, causaram trincas no material.

#### 4.4 Acabamento superficial

As modificações na textura das superfícies de peças usinadas são causadas por vários fatores conhecidos como erros microgeométricos. Esses desvios microgeométricos ou microirregularidades constituem a rugosidade das superfícies, sendo ela a mais importante na qualificação de seus acabamentos. A retificação é por definição um processo de acabamento, e como tal, deve proporcionar às superfícies retificadas, qualidades dimensionais e superficiais com baixas tolerâncias. A qualidade superficial, ou seja, uma baixa rugosidade, é um dos principais aspectos que se espera de uma operação de retificação. Esta rugosidade é influenciada por diversos fatores como a granulação do rebolo, seu estado de afiação, o tipo de operação, (mergulho ou passagem), o tempo de centelhamento (*spark-out*), o balanceamento do rebolo, a rigidez da máquina e as vibrações geradas durante a operação, (Felipe Jr. ,1996).

A rugosidade pode ser entendido como o conjunto de desvios na topografia da superfície. Ela é produzida diretamente na peça devido à ação da ferramenta de corte na superfície da peça de trabalho e é influenciada também pelo tipo de cavaco produzido. O jateamento e os tratamentos galvânicos diversos produzem um tipo de rugosidade diferente da produzida por processos de usinagem. Em materiais, no seu estado original, a rugosidade é caracterizada pela estrutura cristalina e textura superficial. Como a rugosidade se origina de fatores diferentes, e tem influências na função da peça, é adequado se poder medir e avaliar esta característica.

A rugosidade é medida em  $\mu$  (1/1000 mm) e micro-inch (1"/1000) dependendo do método usado e da norma. A seguir são comentados os sistemas e valores usados. O critério principal  $R_a$  (norma DIN) é a profundidade média da “aspereza” superficial, de acordo com a expressão:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_A^B y \, dx \quad \text{Eq. 4.1}$$

considerando os valores das superfícies reais, da parte superior e inferior da linha média  $OX$  (figura 4.5) que divide as áreas em partes iguais, ou seja  $R_a$  é praticamente a

altura média aritmética das ordenadas sobre uma longitude e de referência dividida em partes iguais ou em fórmula matemática:

$$R_a = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + \dots + Y_n}{n} \quad \text{Eq. 4.2}$$

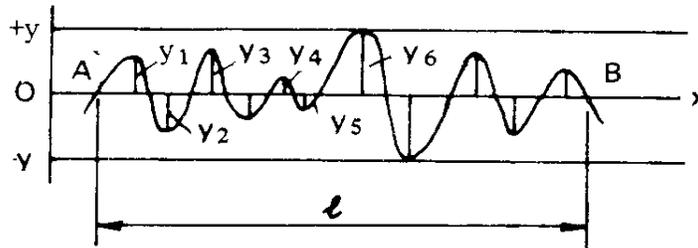


Figura 4.5: Critério para definição de Ra (DIN 4768)

Outra expressão do valor da rugosidade também é utilizada. É o Rz DIN, determinado como valor médio das alturas, distância entre o ponto mais alto ao mais baixo das cinco maiores irregularidades medidas numa distância L da linha de base.

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad \text{Eq. 4.3}$$

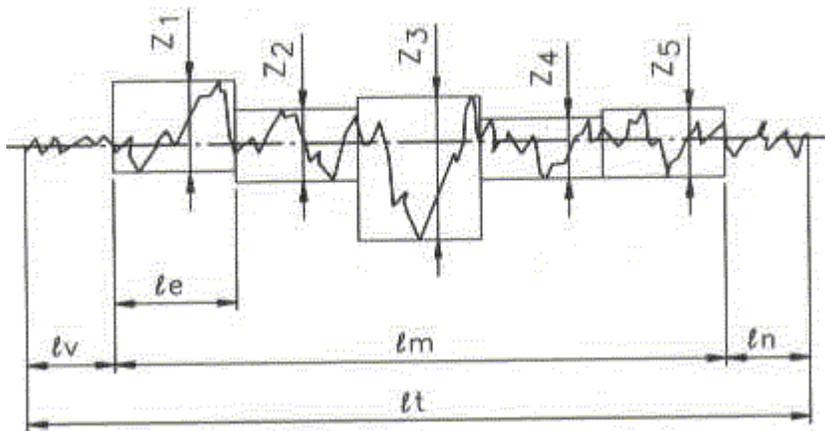


Figura 4.6: Critério para definição de Rz (DIN 4768)

## **4.5 Tensões residuais**

De modo geral, as tensões residuais são definidas como sendo aquelas que continuam permanecendo no material quando todas as forças externas atuantes forem removidas (Cohen, 1971). As tensões residuais estão sempre presentes nos materiais, em razão de seu processo de fabricação, de algum tratamento metalúrgico aplicado ou de um processo de deposição de camadas superficiais. Normalmente os processos convencionais de usinagem deixam tensões residuais na superfície e na subsuperfície do material usinado. O processo de retificação invariavelmente leva a tensões residuais nas adjacências da superfície acabada, as quais podem afetar o comportamento mecânico do material. As tensões residuais são induzidas por deformações plásticas não uniformes nas proximidades da superfície da peça (Bianchi et al., 2001).

Na operação de retificação a tensão residual na superfície tende a ser de tração quando as condições de trabalho são severas e de compressão quando elas são suaves. As tensões residuais de tração são causadas principalmente por tensões térmicas induzidas e pelas deformações associadas com a temperatura de retificação e seu gradiente da superfície para o interior da peça (Diniz, 1996). Tensões de compressão são desejáveis na superfície pois elas melhoram a resistência a fadiga do material. Geralmente é desejável controlar as condições de corte de maneira a induzir tensões residuais de compressivas ou, no mínimo, limitar a amplitude do pico das tensões de tração. Baixa taxa de remoção contribui significativamente na obtenção de tensões residuais compressivas. Na prática demandas por uma produção mais rápida e eficiente resultam em maiores tensões residuais de tração.

### **4.5.1 Origem das Tensões residuais**

Há dois tipos de tensões que podem ser aplicadas a um material: a tensão aplicada devido a forças externas atuando no material e a tensão residual. A tensão aplicada é dada simplesmente pela força aplicada por unidade de área em uma determinada seção. Quando a força externa é removida, a tensão desaparece e o material volta no seu estado inicial. A equação desta tensão é dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Eq. 4.4}$$

onde: F é a força externa aplicada

A é a área da seção transversal

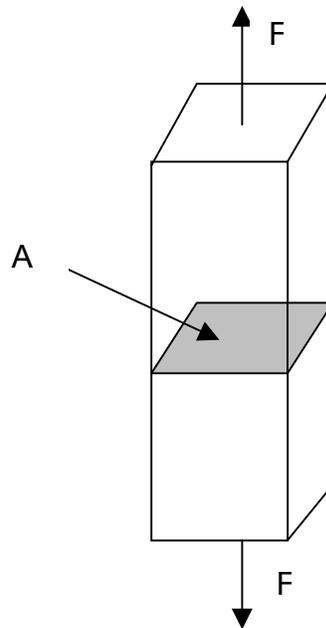


Figura 4.7: Haste sob tração

Em regime plástico onde ocorrem deformações, a tensão residual uniaxial é dada pela equação:

$$\sigma = -\frac{E}{\nu} \left( \frac{d_n - d_0}{d_0} \right) \quad \text{Eq. 4.5}$$

onde: E = módulo de elasticidade longitudinal

$\nu$  = coeficiente de Poisson

$d_n$  = distância interplanar do material tensionado

$d_0$  = distância interplanar do material sem tensão  
ambas referente ao mesmo plano (hkl).

A figura 4.8, 4.9 e 4.10 mostram o que pode ocorrer em uma viga sob carregamento externo na suas extremidades. Pode-se observar que ao longo da viga, as fibras superiores estão tracionadas e as inferiores comprimidas. As tensões atingem valores máximos na superfície externa e diminuem até o valor zero na linha neutro conforme mostrado no diagrama de tensões (Figura 4.8). Este diagrama mostra como a tensão longitudinal varia na secção AA', quando todas as partes da viga estão abaixo do limite elástico. Supondo que houve um aumento da carga aplicada suficiente para provocar deformação plástica do material não somente nas fibras superiores mas também numa considerável profundidade (Figura 4.9). Quando a carga total aplicada é removida (fig. 4.10), as tensões que surgiram tentam se aliviar no processo de volta às condições iniciais. Mas apenas parte destas tensões geradas são aliviadas. Assim se desenvolvem dentro do material tensões residuais de tração e de compressão, ( Cullity, 1978).

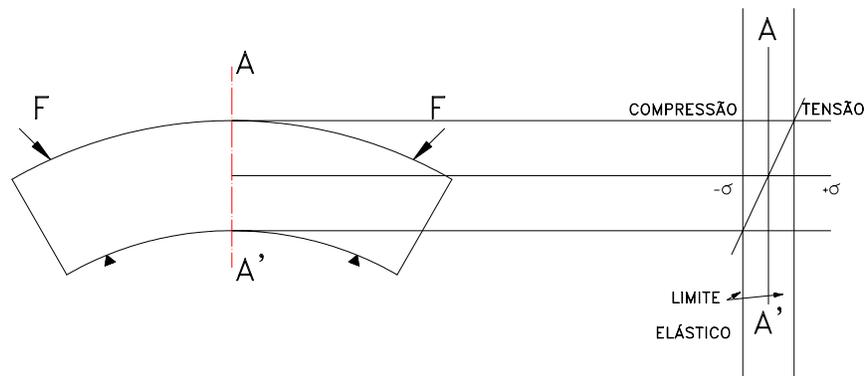


Figura 4.8: Carregamento abaixo do limite elástico (Cullity, 1978)

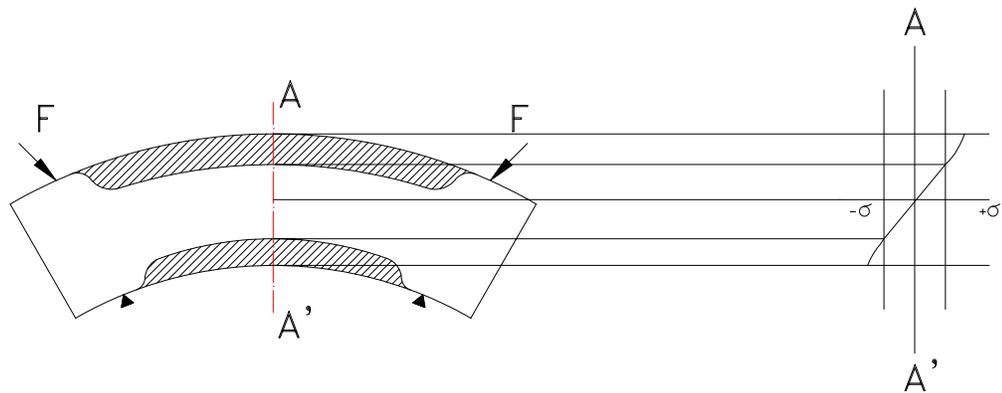


Figura 4.9: Carregamento acima do limite elástico (Cullity, 1978)

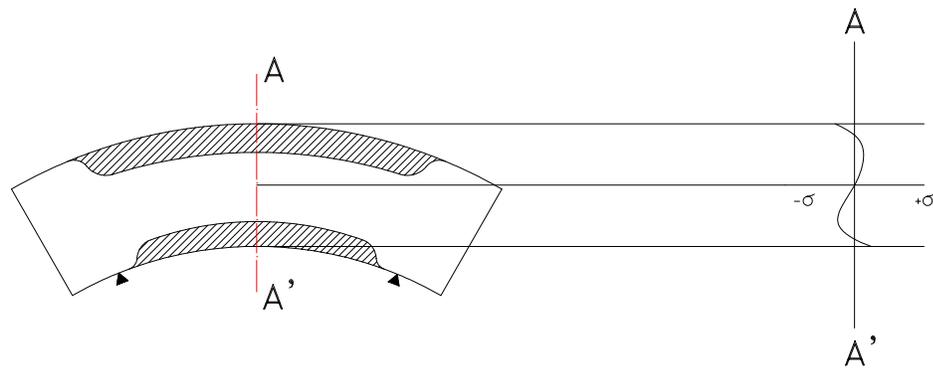


Figura 4.10: Sem carregamento ( material plasticamente deformado) (Cullity, 1978)

As tensões residuais podem surgir em materiais quando estes estão submetidos a processos mecânicos, térmicos, químicos ou uma combinação destes processos (Cohen, 1971). Como exemplo citamos os seguintes processos:

- A) Mecânico: a conformação mecânica ou a usinagem
- B) Térmico: a soldagem, a fundição ou o tratamento térmico
- C) Química: a oxidação, a corrosão
- D) Combinação dos processos acima

No processo de solidificação do aço, a região da superfície se resfria com velocidade diferente do núcleo. Essa diferença dá origem a grãos com formas diferentes entre si o que provoca tensões na estrutura do aço. As tensões residuais podem também ser originadas devido uma má fixação entre duas peças por exemplo mal rebitadas. Ao sofrer esforços externos, o rebite pode ser deformado permanentemente resultando tensões residuais no material. Processos de revestimento como a cromação também induzem tensões residuais nos revestimentos (Cohen et al., 1987). No processo de laminação ou forjamento de um material metálico, os grãos da estrutura que estavam mais ou menos organizados, são comprimidos uns contra outros sofrendo assim deformações permanentes que modificam suas propriedades mecânicas iniciais o que pode afetar o comportamento do material.

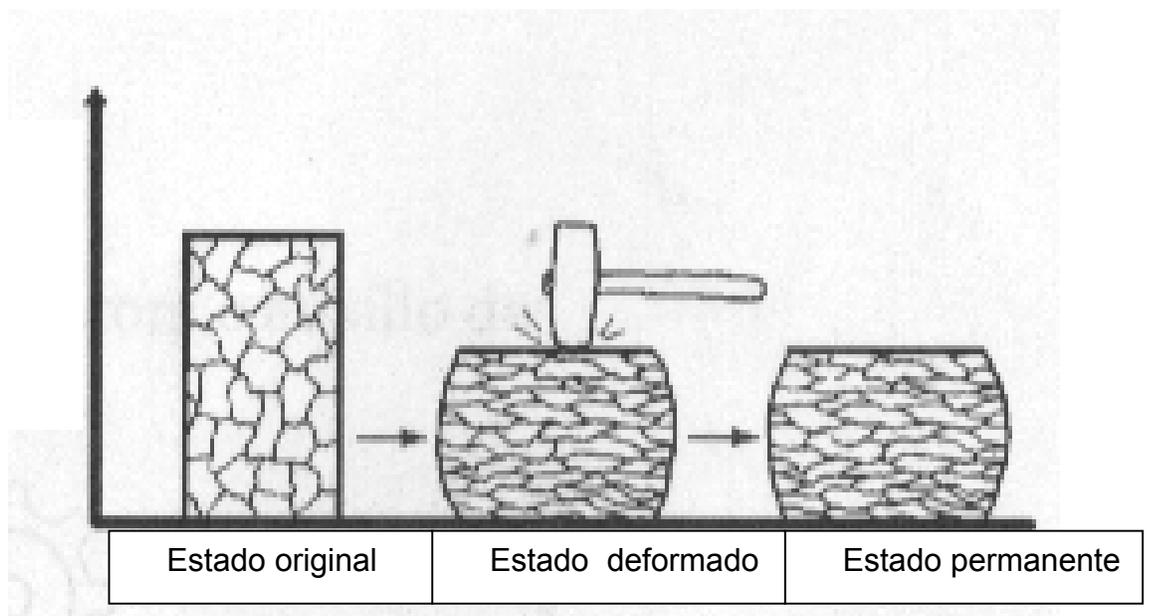


Figura 4.11: Ilustração de grãos deformados

Quando um material metálico policristalino é deformado plasticamente, ocorre escorregamento entre os grãos e cada um deles muda de forma com tendência de se alongar na direção do escorregamento (figura 4.11). A mudança de forma do grão é determinada não só pelas forças atuando na peça mas também pela coesão entre os grãos vizinhos. Devido a esta interação, nenhum grão fica livre às deformações provocadas pelas tensões.

De modo geral, deseja-se controlar a indução ou magnitude das tensões residuais através da adequação das condições de usinagem. A figura 4.12 mostra o perfil das tensões na subsuperfície em aço endurecido (Cohen, 1971).

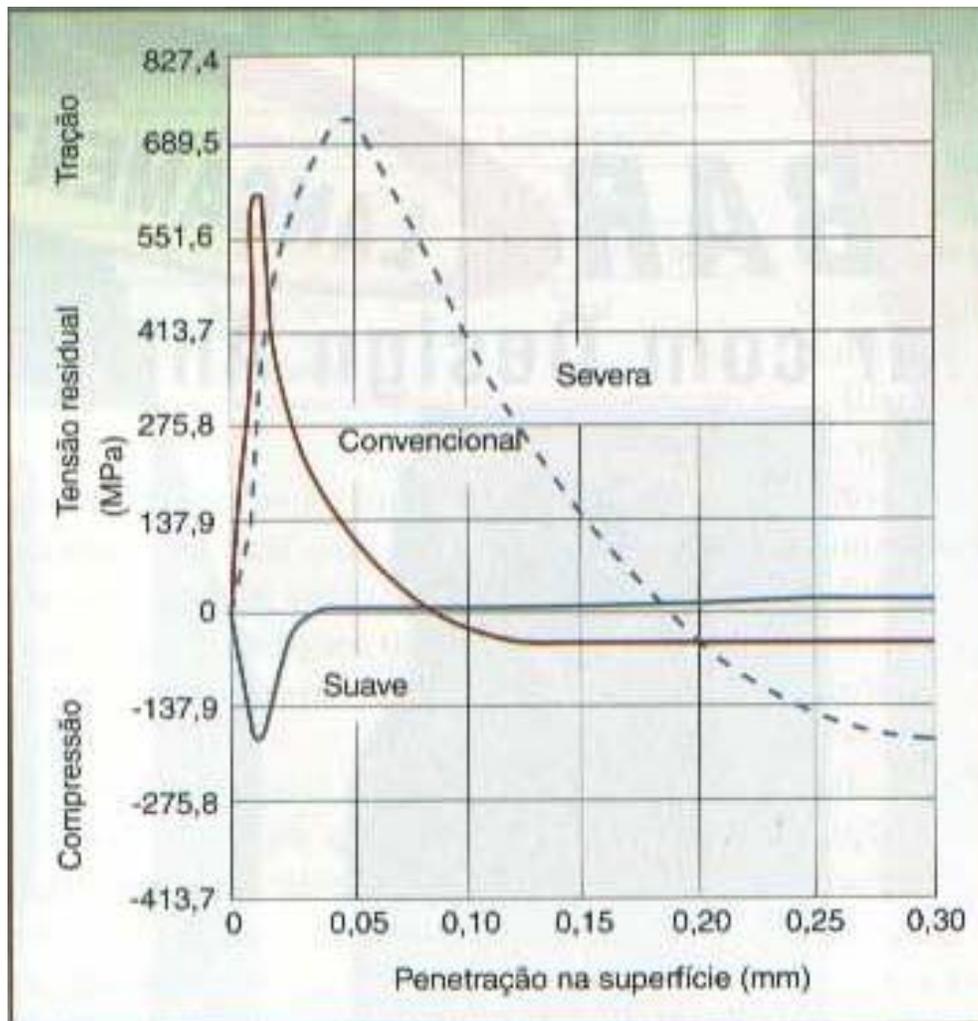


Figura 4.12: Distribuição de tensões residuais ocorridas após retificação através de condições suaves e severas em aços endurecidos (Cohen, 1971)

As tensões podem ocorrer em escala macroscópica sendo chamadas de macrotensões ou microscópico denominadas de microtensões (Cohen et al., 1987).

### **a) Tensões de primeira ordem**

As macrotensões ( $\sigma_1$ ) são também chamadas de tensões de primeira ordem ou do tipo I. Elas são homogêneas no material em pelo menos uma direção e causam deformações uniformes da rede cristalina, na região em que atuam. Sua extensão é relativamente grande com relação ao tamanho de um grão. Elas então atuam na escala de alguns tamanhos de grãos. Em geral são as tensões que despertam maior interesse na engenharia devido a sua grande influência no desempenho de um componente.

### **b) Tensões de segunda ordem**

São também chamadas de tensões do tipo II ou pseudo-macrotensões ( $\sigma_2$ ). Elas são quase homogêneas e tem pequena extensão. Sua dimensão é da ordem de um grão. Elas representam a média das microtensões onde a média é tomada acima de um volume estaticamente representativa, (Cohen et al., 1987).

### **b) Tensões de terceira ordem**

São também chamadas de tensões do tipo III ou microtensões ( $\sigma_3$ ) e são homogêneas em pequenas regiões. Elas são associadas às deformações que ocorrem na rede cristalina. Sua dimensão é menor que um grão. O estudo das microtensões homogêneas e não homogêneas são de grande interesse em ciências dos materiais.

O comportamento das tensões residuais, descreve as tensões que existem em pontos específicos abaixo da superfície de uma peça. König et al., (1993) examinaram uma variedade de processos que podem ser usados para usinar materiais duros tais como o torneamento, o fresamento, a furação e o brochamento. Eles descobriram que tensões de compressão são desenvolvidas na superfície das peças. Na subsuperfície estas tensões aumentam dependendo da camada afetada. Quando a ferramenta está desgastada, tensões de tração se desenvolvam na superfície enquanto que na subsuperfície as tensões de compressão aumentam. A figura 4.13 mostra o

comportamento das tensões na superfície e na camada superficial de um aço duro torneado. Pode-se observar que não há tensões residuais de tração na superfície quando a ferramenta de corte é nova, no entanto após um desgaste considerável, as tensões de tração chegam a 800 MPa na superfície e a maior tensão de compressão é encontrada a 50  $\mu\text{m}$  de profundidade.

Dados  
 Material: Aço 16 MnCr 5 E (62 HRC)  
 Material da Ferramenta: PCBN  
 Velocidade de corte: 125 m / min  
 Avanço: 0,05 mm / volta  
 Profundidade de corte: 0,25 mm  
 Sem fluido de corte

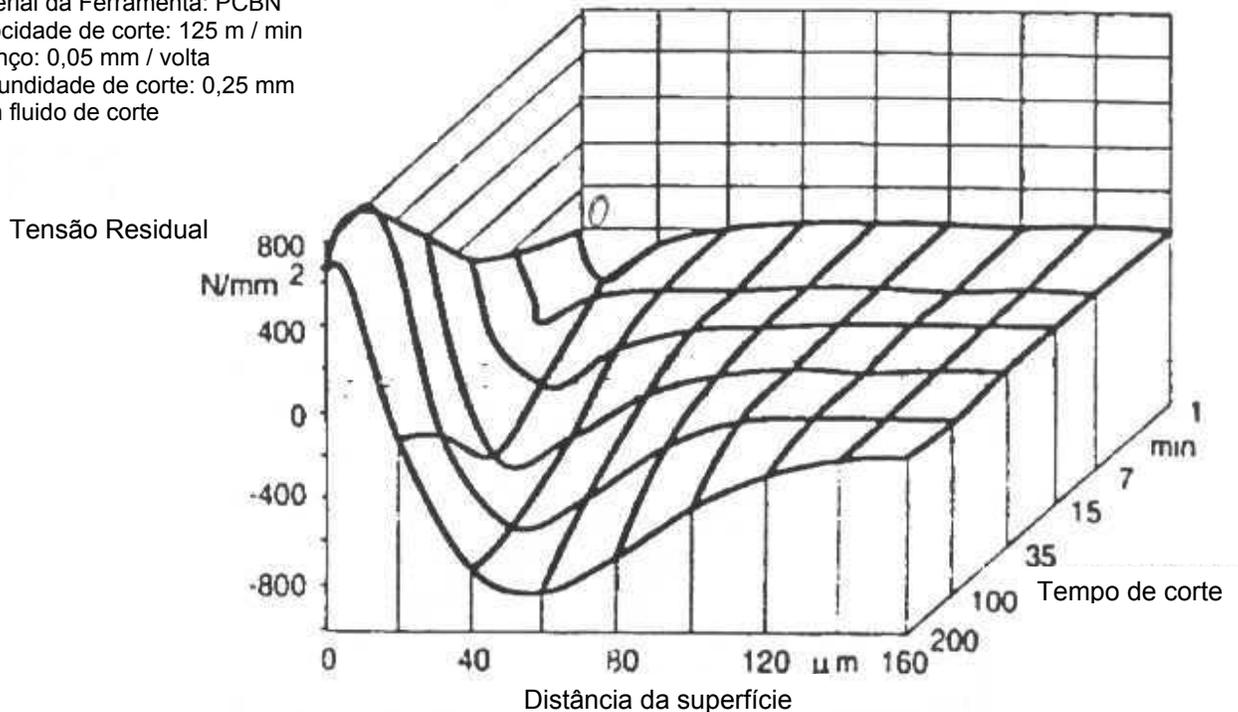


Figura 4.13: Progressão da distribuição de tensões residuais durante a vida da ferramenta em processo de torneamento (Konig, 1993)

#### 4.5.2 Efeitos das Tensões Residuais

Tensões residuais de tração são consideradas prejudiciais na medida em que elas favorecem o surgimento de trincas e a aceleração do processo de transformação de fase e corrosão. As tensões de compressão, tem um efeito contrário às de tração. Elas agem como se fossem barreiras, impedindo a nucleação e a propagação das trincas, Nelson et al., (1971). Desta forma elas tendem a aumentar a resistência a fadiga. Esta é a razão pela qual, tensões de compressão são desejáveis na superfície e na subsuperfície dos materiais. Tensões de compressão podem ser introduzidas

voluntariamente nos materiais. Em operações de usinagem, isto é possível com o uso de ferramentas e parâmetros de usinagem adequados (velocidade de corte, profundidade de corte, avanço, refrigeração etc.).

#### **4.5.3 Princípios básicos de medição de tensão residual por Difração de Raio-X**

Um dos métodos mais utilizados é o método de difração de raios x por ser um método confiável e não ser destrutivo. Este método tem a grande vantagem de proporcionar a possibilidade de efetuar medições repetidas na mesma amostra. Desta forma pode-se medir tensão residual antes e depois de um tratamento feito para verificar o seu comportamento. No entanto este método apenas permite determinar tensões residuais na superfície. Para determinar as tensões na subsuperfície, será preciso remover a camada superficial até a profundidade desejada e efetuar a medição. É recomendado que a superfície da peça seja bem limpa e lisa. As sujeiras ou escamas quando estão presentes na superfície podem ser removidas, mas qualquer remoção de material deve ser feita por um processo que não induz tensões que podem vir a modificar as tensões a serem avaliadas.

A operação de retificação ou a usinagem em geral induzem tensões residuais nos materiais em profundidades de aproximadamente 125  $\mu\text{m}$ . O único processo de remoção de material que garanta a não modificação das tensões é o processo de polimento eletrolítico, (Cullity, 1978).

Superfícies rugosas devem ser evitadas pois, os picos não são tensionados da mesma forma que as outras regiões e o que pode influenciar o resultado final da medição. Evidentemente existem casos em que a superfície vai ser rugosa devido a natureza do processo que foi aplicado. Nas avaliações os detalhes devem ser levados em consideração.

#### 4.5.4 Fontes de Raio - x

Os raios-X utilizados para difração são ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda entre 0,05 e 0,25 nm (0,5 e 2,5 Å). Para comparação, o comprimento de onda da luz visível é da ordem de 600 nm (6000Å). Para produzir raios-X, é necessário aplicar uma diferença de potencial da ordem de 35 kV, entre um cátodo e um alvo metálico que funciona como anodo, mantidos em vácuo. Quando um filamento de tungstênio do cátodo é aquecido, elétrons se libertam por efeito termoiônico que são acelerados através do vácuo pela diferença de potencial entre o cátodo e o anodo, ganhando assim energia cinética. Quando os elétrons se chocam com o alvo metálico (por exemplo molibdênio ou cobre), raios-X são libertados. Contudo, a maior parte da energia cinética (cerca de 98%) é convertida em calor, razão pela qual o alvo metálico tem de ser arrefecido exteriormente. Dado que os comprimentos de onda dos raios-X são aproximadamente iguais às distâncias entre os planos atômicos dos sólidos cristalinos, podem produzir-se picos reforçados de radiação, de diversas intensidades.

#### 4.5.5 Difração

Quando um feixe monocromático de raio-X de comprimento de onda  $\lambda$  é aplicado a matéria (conjunto de planos cristalográficos paralelos), uma parte dele é absorvido pelos átomos, enquanto que outros são enviados de volta em todas as direções da área irradiada. Isto é conhecido como dispersão ou espalhamento de raio-X. Quando o ângulo formado deixa os vários planos não em fase, não se produzirá qualquer feixe reforçado. Desta forma, ocorre uma interferência destrutiva. Se as ondas refletidas pelos vários planos estiverem em fase, então ocorre um reforço de feixe ou interferência construtiva. Este fenômeno é chamado de difração.

#### 4.5.6 Condições de difração – Lei de Bragg

Consideremos os raios-X incidentes 1 e 2 como indicado na figura 4.13. Para que estes raios estejam em fase, a distancia adicional percorrida pelo raio 2, que é igual a  $AB +$

BC, deve ser igual a um número inteiro de comprimento de onda  $\lambda$ , ou seja  $n\lambda = AB + BC$  onde  $n = 1, 2, 3, \dots$

Uma vez que AB e BC são iguais a  $d \cdot \sin\theta$  onde  $d$  é a distancia interplanar, a condição para que haja difração (ou seja para que se produza um pico de difração de radiação intensa) é:  $n\lambda = 2d \sin\theta$ .

Esta equação é conhecida como Lei de Bragg.

## A lei de Bragg

61

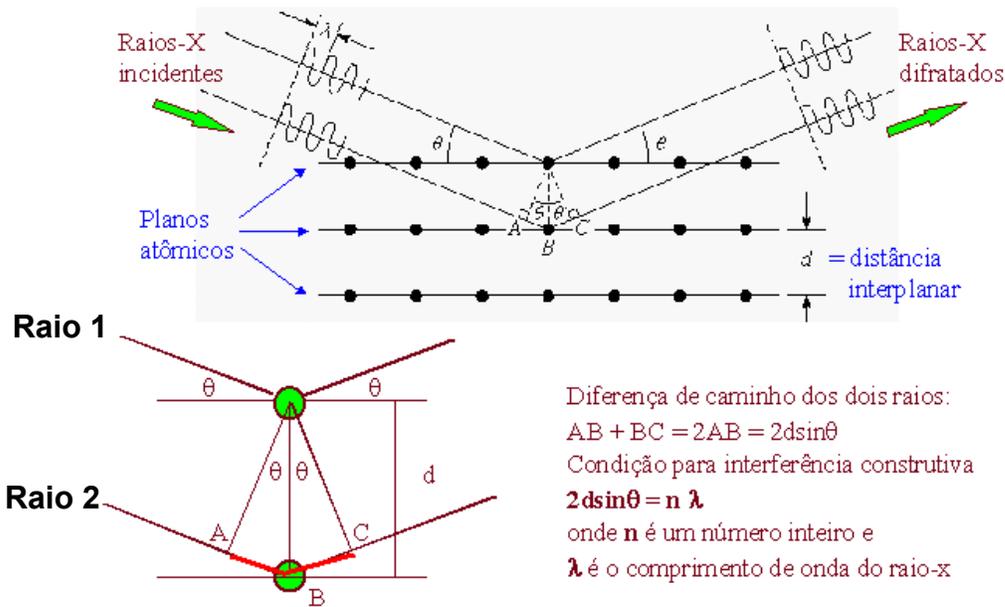


Figura 4.14: Reflexões de um feixe de raios x pelos planos (hkl) de um cristal

#### **4.6 Alterações metalúrgicas**

As mudanças estruturais na superfície dos materiais podem influenciar as propriedades mecânicas entre os quais a resistência à fadiga e à corrosão. Estas propriedades são geralmente as mais preocupantes pois podem provocar falhas prematuras do material. Na retificação, cada grão abrasivo age como uma ferramenta única cortando o material da peça, e a temperatura em cada grão pode atingir um valor bem elevado podendo chegar a 1600 °C quando as condições de usinagem forem severas. Altas temperaturas são indesejáveis pois podem provocar diversos problemas, alguns visíveis a olho nu, como a queima e as irregularidades geométricas e outros mais difíceis de serem diagnosticados como as alterações metalúrgicas na superfície e na camada superficial da peça. Em números médios, 85% do calor gerado vai para a peça, 5% para o cavaco e 10% para o rebolo (Diniz et al., 1999). O calor que vai para o rebolo não causa danos consideráveis, pois o rebolo é de material refratário, na maioria das vezes é bem grande e tem bastante área para dissipar o calor. O calor que vai para o cavaco também não causa preocupações. O problema maior está no calor que vai para a peça e que pode causar mudanças estruturais na superfície da peça que na maioria das vezes já recebeu tratamento térmico. Além disso o calor pode gerar erros de forma e dimensões na peça o que é muito grave, pois, em geral a retificação é o último processo de usinagem sobre a superfície, aquele que proporciona as dimensões finais da peça, isto é determina sua qualidade.

Os danos à integridade superficial de uma peça podem levar à aceleração do processo de fadiga, alteração à resistência à abrasão e à corrosão, ou ainda provocar surgimento e crescimento de trincas e micro trincas ou a formação de tensões residuais devido a variação brusca de temperatura. Estes problemas podem comprometer o funcionamento de peças de extrema importância funcional como o anel de pistão de motor de combustão interna, levando-a a falhas mecânicas.

Na operação de retificação, quando as condições de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) forem severas e a refrigeração inadequada, os danos a superfície são inevitáveis. Segundo Silva et al., (1998), a influência dos processos de usinagem na textura e na integridade superficial das peças, é dependente dos

parâmetros de usinagem, isto é: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, material da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta de corte e rigidez da máquina. Entende-se por refrigeração adequada, aquela que proporcione um volume de fluido refrigerante abundante, uma pressão elevada e um direcionamento do bico de refrigeração, de modo que o refrigerante chegue na interface grão / peça e elimine o excesso de calor gerado.

O óleo ainda é a única escolha prática de refrigerante para obter maior vida dos rebolos e melhor acabamento, embora estejam em curso pesquisas com refrigerantes sintéticos a base de água. O óleo tem uma viscosidade muito mais alta (80 – 150 SSU) do que a água (10 SSU) e piores propriedades térmicas (Hitchiner, 2001).

Dos vários processos de remoção de material estudados, a operação de retificação é que mais tem efeitos indesejáveis. Em geral os processos que geram maior taxa de remoção de material, envolvendo maior energia, tendem a afetar mais a integridade de superfícies. A retificação em baixa tensão, é um processo que utilize parâmetros especiais de usinagem que produzem superfícies com alta integridade superficial. As superfícies geradas neste processo são livres de danos e tem baixas Tensões Residuais (Bellows, 1983).

## Capítulo 5

### PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

O projeto e análise de experimento ou DOE (*Design Of Experiments*) é uma técnica essencialmente estatística. Ele não permite determinar os parâmetros ótimos de trabalhos. No entanto o método utilizado, abra os caminhos para facilitar o alcance aos parâmetros otimizados. Ele pode ser considerado a priori como um refinamento a partir do qual pode se tirar conclusões bastante úteis sobre o intervalo em que o ou os parâmetros em estudo devem ser especificados. Quando é desconhecida uma tolerância de uma dada característica, ou seja quando um determinado processo vai ser realizado pela primeira vez onde não se conhece o potencial de execução da tarefa, este método torna-se uma ferramenta muito útil na medida em que ela é capaz de fornecer o valor em torno do qual estão os valores pesquisados com um certo nível de confiança a respeito.

Um experimento delineado é um teste ou uma seqüência de testes onde variáveis de influência em potencial de um processo são sistematicamente alteradas de acordo com uma matriz de projeto prescrito. A resposta de interesse é avaliada sob várias condições para:

- identificar as variáveis de influência entre aquelas testadas;
- quantificar os efeitos através da gama representada pelos níveis das variáveis;
- obter uma melhor compreensão sobre a natureza do sistema de causa em andamento no processo;
- comparar os efeitos e interações.

A aplicação antecipada no ciclo de desenvolvimento de um produto ou processo pode resultar em alguns benefícios como:

- rendimento do processo aprimorado;
- variabilidade reduzida em torno de um valor objetivo nominal;

- tempo de desenvolvimento reduzido;
- custo total reduzido.

## 5.1 Limitações

Existem muitos pontos que devem ser considerados na seleção de um DOE. Custo, material e outros fatores podem diminuir o poder de um DOE. Idealmente, um ótimo DOE iria considerar um grande número de fatores com uma alta resolução e um número mínimo de experimentos. Obviamente isso frequentemente é impossível de se alcançar simultaneamente e uma escolha deve considerar isso. A figura 5.1 esboça relações que devem ser consideradas nessa escolha. Não existe, contudo, uma equação matemática que define a relação entre o número de experimentos, a resolução do experimento e o número de fatores.

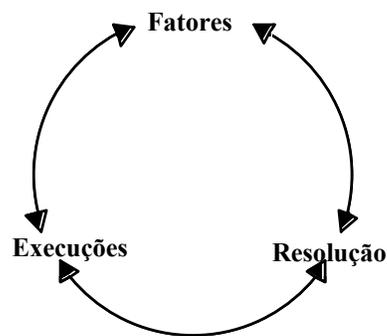


Figura 5.1: Esquema de relações que devem ser consideradas na seleção de um DOE

Algumas dessas relações podem ser assim descritas:

- Para se ter um grande número de fatores em alta resolução o número de experimentos aumenta.
- Para se ter um grande número de fatores em baixa resolução o número de experimentos diminui.
- Para se ter um pequeno número de fatores em alta resolução o número de experimentos diminui.

Duas importantes questões a serem consideradas na definição dos fatores, da resolução e do número de experimentos de um DOE são mostradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Guia auxiliar para um planejamento de experimento

	<b>O que/ Quem define?</b>	<b>Como são definidos?</b>
<b>Fatores</b>	Especialistas (Engenheiros, operadores, técnicos, ...)	<i>Brainstorming</i> , Fluxograma, Matriz Causa e efeito, diagrama
<b>Resolução</b>	As interações potenciais	Teoria estatística
<b>Número de Experimentos</b>	Recursos disponíveis, prioridades do sistema sob estudo.	Variabilidade, amplitude do efeito.

Diversas ferramentas complementares podem ser usadas em resposta às questões da tabela 5.1. Os especialistas em processo (com muitas vezes pouquíssimos conhecimentos em estatística) são chamados a dar a sua contribuição no planejamento de um DOE. Como mencionado anteriormente, os recursos disponíveis muitas vezes vão definir o número máximo de experimentos realizáveis. O resultado da análise da amplitude do efeito é a regra geral para se definir o poder da escolha do número de experimentos de um DOE.

## 5.2 Amplitude do Efeito (Poder de um experimento)

Similar ao cálculo do tamanho de uma amostra conveniente para se ter o Poder de um teste de hipóteses, a amplitude do efeito de um DOE pode ser calculada pela relação abaixo

$$\text{Amplitude do Efeito} = 7,68 \times (\text{Desvio Padrão}) \div \sqrt{\text{Número de Experimentos}} \quad \text{Eq. 5.1}$$

De forma simplificada, adotando valores padrão definidos por Wheeler (1974) ela pode ser reescrita como:

$$\text{Amplitude do Efeito} \approx 8S_p / \sqrt{N} \quad \text{Eq. 5.2}$$

Onde:

- $S_p$  é um valor estimado do desvio padrão da resposta do DOE;
- $N$  é o número de experimentos do DOE fatorial
- 7,68 (geralmente aproximado para 8) é um número tabelado em função de diversas variáveis como nível de significância (padrão de 5%), coeficiente de Confiança (padrão de 95%), e graus de liberdade definidos pelo Número de Pontos Centrais, Número de Pontos Extremos e número de blocos.

O que se busca aqui é um compromisso entre o mínimo efeito que se busca detectar executando um DOE fatorial e uma certa confiança nos resultados. Se a confiança for muito pequena, é perda de tempo executar o DOE.

Determinar o número de experimentos possíveis de serem realizados geralmente não é tarefa complicada e depende em muito dos recursos disponíveis. Determinar, contudo, o desvio padrão não é algo imediato e as opções mais clássicas para tal estimativa são:

- Resultados experimentais anteriores (por exemplo a partir de cartas de controle estatístico de processo);
- Resultados experimentais de um lote piloto
- Valor atribuído por um especialista (comumente chamado de boa adivinhação – *Educated Guess*)

Quando não se tem idéia de tal desvio padrão, o que se faz é considerar a amplitude do efeito em termos de desvio padrão. A tabela 5.2 explora tal relação.

Tabela 5.2: Relação entre Número de experimentos e Amplitude do Efeito

N	Amplitude do Efeito
8	2,8 $S_p$
16	2 $S_p$
32	1,4 $S_p$
64	1 $S_p$

### 5.3 Planejamento Fatorial $2^k$

É muito comum nos trabalhos experimentais, encontrar dificuldades para determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre uma variável de interesse. Todo o cuidado é pouco na determinação das variáveis mais significativas pois, existe a possibilidade de valorizar as variáveis menos significativas em detrimento das mais significativas.

O planejamento fatorial  $2^k$ , onde o número 2, representa os níveis superior (+) e inferior (-) e k os fatores ou variáveis controladas, é de grande utilidade quando se deseja investigar a influência destes fatores sobre a resposta. Ele é bastante utilizado pois, sua idéia básica é executar um conjunto de experimentos, de modo a considerar todas as possíveis variações dos fatores em estudo, extraindo o máximo de informação utilizando um número mínimo de experimentos.

Como o sucesso de um experimento depende do planejamento feito antes da sua realização, Montgomery (1984) recomenda os seguintes passos.

- Conhecimento e exposição do problema;
- Escolha dos níveis e fatores;
- Seleção da(s) variáveis resposta(s);
- Escolha do tipo de experimento;
- Execução do experimento;
- Análise estatística dos resultados do experimento;
- Conclusões e recomendações.

## Capítulo 6

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 6.1 Metodologia experimental

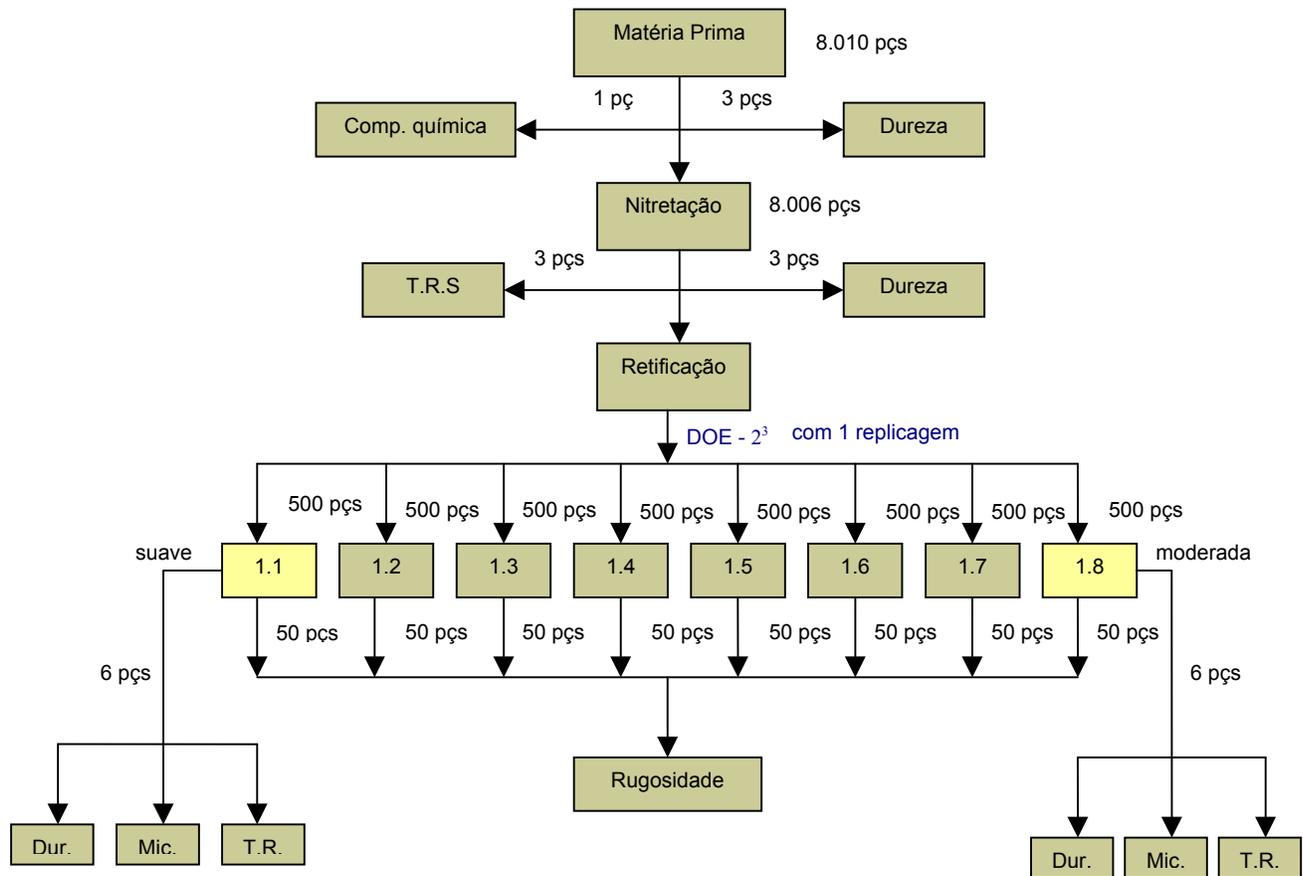


Figura 6.1 : Visão geral do procedimento experimental

A figura 6.1 dá uma visão geral sobre a sequência e a ordem em que as tarefas foram executadas. A matéria prima utilizada nos experimentos era composta por 8.010 peças brutas. Antes de iniciar os experimentos, foram segregadas aleatoriamente 4 peças. Destas 4 peças, uma foi utilizada para avaliar a composição química do material e as outras 3, a dureza na superfície e na subsuperfície. As 8.006 peças restantes foram levadas à operação de nitretação para elevar a dureza superficial. Após a nitretação, foram segregadas novamente 6 peças entre as quais 3 foram utilizadas para medir a

dureza e as outras 3, as tensões residuais na superfície (TRS). As outras peças já nitretadas, seguiram para a operação de retificação. Foram retificadas 8.000 peças em diversas condições sendo uma chamada de condição suave e a outra de condição moderada. Foram no total 16 experimentos incluindo uma replicagem. Após cada experimento, foram segregadas sistematicamente 50 peças para avaliar a rugosidade superficial. Especificamente, foram coletadas 6 peças das que foram retificadas em condição suave e moderada para reavaliar a dureza, a microestrutura e a distribuição das tensões residuais na superfície e na subsuperfície do material.

Sabe-se que o acabamento superficial de uma peça retificada depende de vários fatores entre os quais a velocidade de corte, o avanço da peça e a profundidade de corte. Estes fatores tem influência direta no acabamento e interferem na qualidade das peças fabricadas. Uma vez que eles podem ser controlados diretamente na máquina, a aplicação da técnica Projeto e análise de experimentos pode auxiliar a conhecer seus efeitos quando seus níveis forem alterados. Neste trabalho, serão identificadas as variáveis mais significativas, a interação entre elas e seus respectivos níveis ótimos. Como o sucesso de um experimento depende do planejamento feito antes da sua realização, serão seguidos os seguintes passos conforme recomendação de Schneider e Flesch (1982):

- Planejamento
- Preparação
- Execução
- Processamento

### **6.1.1 Planejamento**

O trabalho a ser realizado busca uma melhoria do acabamento superficial dos anéis através da otimização da velocidade de corte, do avanço da peça e da profundidade de corte. O acabamento das peças retificadas será avaliada através do parâmetro vertical de Rugosidade  $R_z$ . A rugosidade é produzida diretamente na superfície das peças usinadas e é bastante influenciada pelos parâmetros de corte em estudo. Uma baixa rugosidade é sinônimo de bom acabamento e é um dos principais aspectos que se

espera de uma operação de retificação. A rugosidade baixa na face lateral do anel de pistão é muito importante pois, ele proporciona um atrito menor entre o anel e o canaleta do pistão. Quando esta rugosidade for alta, ocorre o desgaste prematuro do canaleta do pistão e também do anel, gerando assim o chamado “ *blow by* ” ou perda de eficiência do motor. Neste estudo, as variáveis a serem controladas são a velocidade de corte, o avanço da peça e a profundidade de corte. A resposta a medir é a Rugosidade Rz.

Adotou-se um planejamento fatorial  $2^k$  estabelecendo dois níveis para cada variável. Estes níveis foram determinados a partir das recomendações do fabricante de rebolo, a NORITAKE, a TIROLIT, a MITSUI e dos especialistas em processamento de anéis da empresa Mahle Cofap Anéis do Brasil. De posse a estas informações, foram definidos os níveis superiores e inferiores para cada variável conforme tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Fatores de usinagem e seus respectivos níveis

Fatores	Nível inferior ( - )	Nível superior ( + )
Velocidade de corte ( m/s )	11	28
Velocidade de avanço ( m/s )	0,11	0,33
Profundidade de corte ( mm )	0,018	0,032

A análise das tensões residuais foi feita considerando apenas as condições extremas de corte. Estas condições são chamadas de retificação suave e moderada. A condição de retificação é moderada quando todos os fatores estiverem em seus níveis mais altos e suave em caso contrário.

### 6.1.2 Preparação

A máquina utilizada para realizar os experimentos é uma retificadora de disco que usa dois rebolos de CBN de diâmetro 585 mm que retificam simultaneamente as duas faces do anel. Observa-se na figura 6.4 e 6.5 que neste método de retificação, a alimentação das peças é feita através de um alimentador rotativo que leva as peças até a área de retificação.

Alguns cuidados foram tomados antes de realizar os experimentos. Para minimizar os efeitos do desgaste dos rebolos, eles foram dressados antes de iniciar cada ensaio. A profundidade de corte, a rotação dos rebolos e do alimentador foram controladas numericamente para garantir uma confiabilidade na replicagem dos ensaios. As peças ensaiadas são todas do mesmo lote de fabricação e os ensaios foram realizados nas mesmas condições ambientais. O medidor de altura utilizado para medir a altura dos anéis foi calibrado antes de ser utilizado. Durante os ensaios, não houve troca de operador nem substituição dos instrumentos de medição utilizados. Isto para evitar a introdução de novas variáveis que podem afetar os resultados. Após finalização dos ensaios e medições, todos os equipamentos foram recalibrados e não foi detectado nenhuma anomalia que pudesse mascarar os resultados.

### 6.1.3 Execução

A tabela 6.2 representa a matriz de planejamento do experimento. Para obter resultados estatisticamente confiáveis, foi feita uma replicagem de todos os tratamentos do experimento. A replicagem foi feita aleatoriamente com o objetivo de não privilegiar determinada condição.

Tabela 6.2 - Matriz de planejamento dos experimentos

Ordem de execução		Tratamento	Velocidade de corte (Vs)	Velocidade de avanço (Vw)	Profundidade de corte ( $a_p$ )
1	6	1	-	-	-
2	3	2	+	-	-
3	8	3	-	+	-
4	5	4	+	+	-
5	4	5	-	-	+
6	7	6	+	-	+
7	2	7	-	+	+
8	1	8	+	+	+

#### 6.1.4 Processamento

Antes da operação de retificação, foram analisadas em 3 peças do lote produzido, as tensões residuais na superfície e na subsuperfície. Em cada peça foram realizadas 3 medições em três ângulos diferentes (90°, 180° e 270°) para avaliar as tensões superficiais conforme mostrado na figura 6.2. As tensões na subsuperfície foram medidas em apenas 1 ponto.

Foram retificadas em cada experimento 500 peças. Após a execução de cada tratamento, foi retirada uma amostra de 50 peças para a medição da rugosidade. Estas peças foram colhidas sistematicamente para varrer todo o lote para se ter uma boa representação estatística. Em cada peça foi efetuada na face superior e inferior três medições em 90°, 180° e 270° com relação a abertura das pontas conforme figura 6.2.

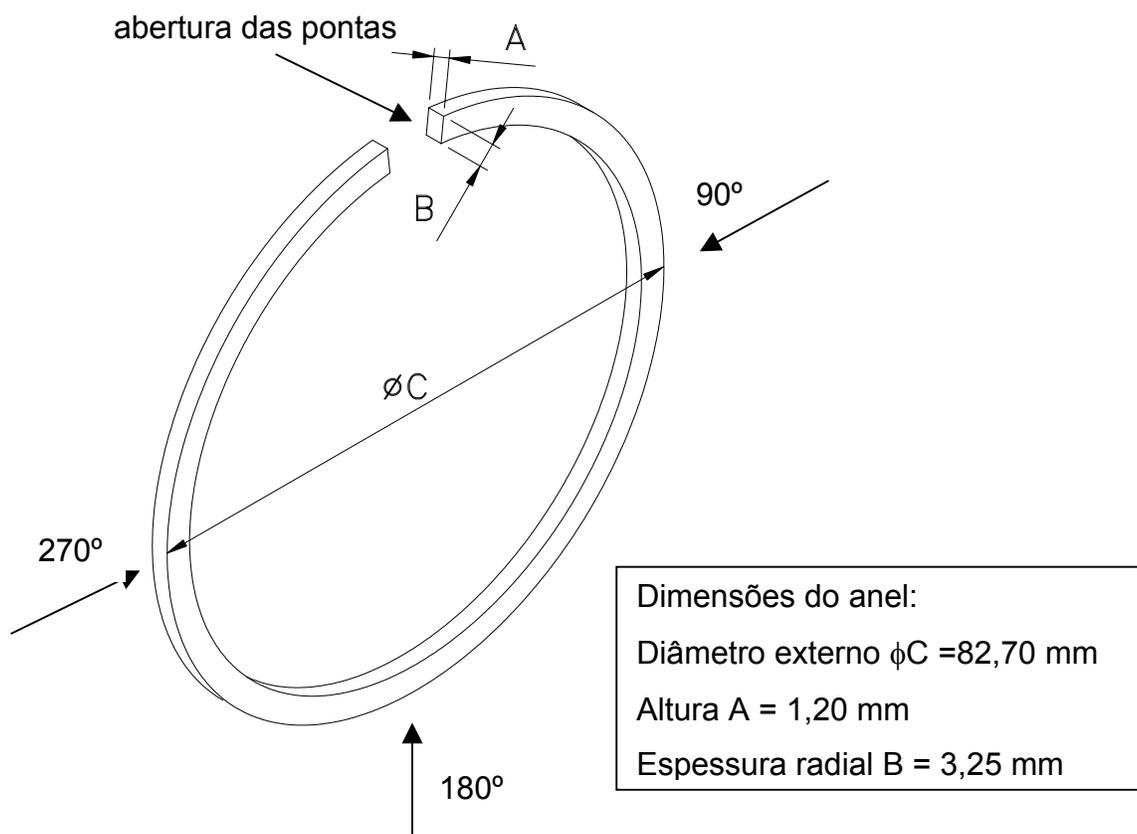


Figura 6.2: Esquema do anel de pistão

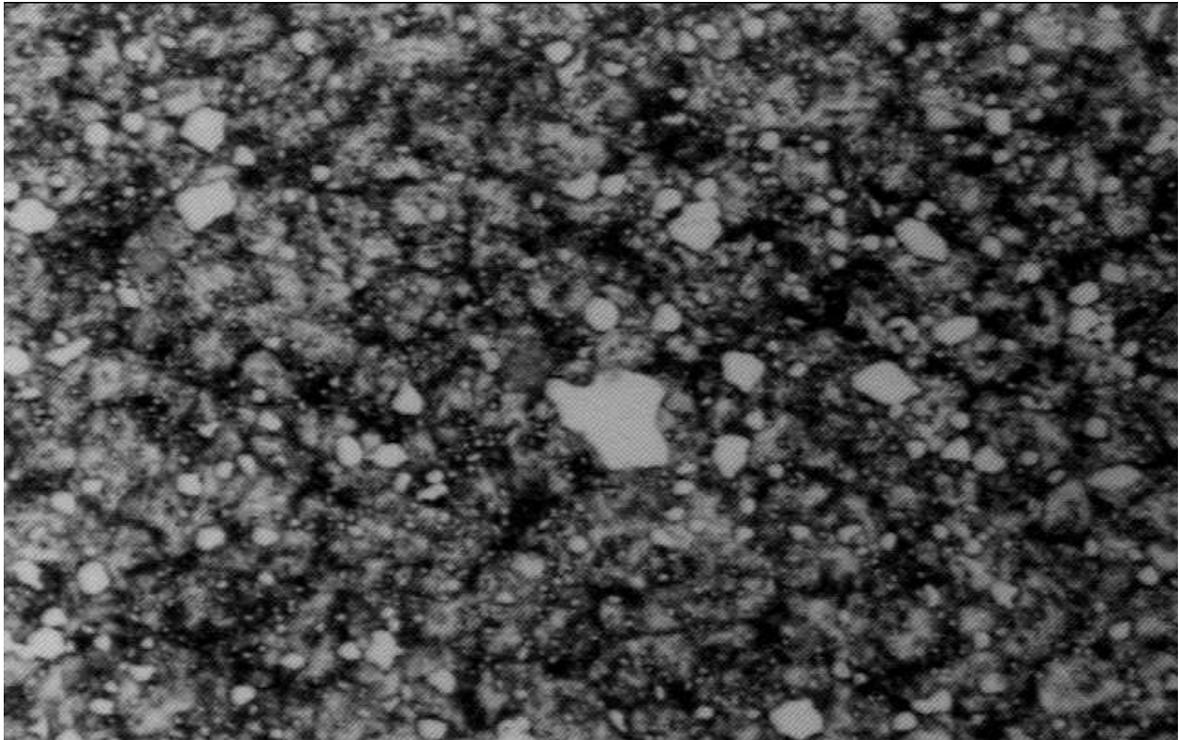
## 6.2 Material

O material do anel pertence à classe dos aços inoxidáveis ISO 6621-3 – subclasse MC 66. Este aço é utilizado em grande escala para os novos desenvolvimentos de anéis de pistão para atender as exigências atuais dos motores modernos de combustão interna. A microestrutura do aço está representada pela fotomicrografia da figura 6.3. e apresenta pequenos carbonetos distribuídos uniformemente.

Os anéis usinados foram anteriormente submetidos ao processo de tratamento termo químico de nitretação. O tratamento é feito em uma atmosfera gasosa contendo Nitrogênio ( $N_2$ ) e Hidrogênio ( $H_2$ ) à temperatura de 570 °C durante 8 horas. Os resultados do tratamento são caracterizados pelo aumento da dureza superficial devido a presença de elementos de liga formadores de nitretos que aumentam significativamente a resistência ao desgaste por atrito. Também a nitretação proporciona ao material um aumento da sua resistência à corrosão. Uma outra vantagem da nitretação é a ausência de problemas de destacamento do revestimento, uma vez que a camada na nitretação é contínua à matriz do material base. A tabela 6.3 mostra os diferentes elementos químicos que compõem o material assim com suas respectivas porcentagens

**Tabela 6.3: Composição química do aço inoxidável ISO 6621-3 Subclasse MC 66**

elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
% em peso	0.83	0.42	0.34	0.027	0.001	17.35	1.11	0.09



**Figura 6.3: Micrografia do aço inox ISO 6621-3 Subclasse MC 66 – 1000 X**

### **6.3 Equipamentos de medições**

#### **6.3.1 Equipamento de medição de Rugosidade**

Rugosímetro: Mahr – Perthen; modelo Perthometer; resolução de  $0,01\mu\text{m}$ , faixa de medição 4,8mm.

#### **6.3.2 Equipamento de medição de Tensões Residuais**

Difratômetro de Raios-X Jeol modelo JDX-11 A

#### **6.3.3 Equipamento de medição dureza**

Microdurômetro, modelo HMV 2, Capacidade 2 Kg, Fabricante: SHIMADZU

### **6.3.4 Equipamento de análise micrográfica**

Microscópio ótico para análise de microestrutura, marca LEICA, modelo DMIRM.

## **6.4 Procedimentos de medições**

### **6.4.1 Procedimento de medição de rugosidade**

O rugosímetro utilizado nas medições, trabalha conforme o princípio de ponta apalpadora, que é o mais comum na indústria mecânica. O sistema consiste num apalpador conduzido por uma unidade de avanço, com velocidade constante, em uma trajetória retilínea sobre a peça. O apalpador, enquanto se move em uma linha teoricamente reta, guiada pelo plano de referência da unidade de avanço, permite que a agulha explore todo o relevo da superfície, entrando e saindo em um movimento vertical, enquanto o conjunto se move em movimento horizontal.

O movimento vertical da agulha é transformado pelo apalpador (indutivo) em um sinal elétrico analógico. Este sinal analógico passa para uma unidade de amplificação, onde é preparado para ser conduzido para uma unidade de registro gráfico ou ser mostrado como um valor digital, já no parâmetro desejado. O registrador gráfico reproduz o perfil explorado pelo apalpador para uma visualização e análise gráfica.

A medição da rugosidade superficial foi realizada fundamentando-se no parâmetro Rz (média de cinco pontos da altura das irregularidades) que é o mais utilizados na avaliação do acabamento dos anéis de pistão. As amostras foram medidas na direção radial que proporciona o maior valor possível para os parâmetros de rugosidade vertical. Procurou-se também abranger toda a superfície de cada corpo de prova.

#### **6.4.2 Procedimento de medição das Tensões Residuais**

As medições de tensões residuais foram efetuadas na direção tangencial a face lateral do anel. Nesta face, foram feitas janelas de 10 x 10 mm, onde os raios x incidiram para possibilitar a medição das tensões.

Para obter as tensões na subsuperfície, foi necessário atacar o material com uma solução contendo 15% de ácido nítrico + 1% de uréia em 100 ml de água. Para remover uma camada de 0,005 mm as peças foram submersas dentro da solução durante 17 segundos. Foram realizadas 4 medições na subsuperfície nas profundidades de 5, 15, 20 e 25  $\mu\text{m}$ .

O difratômetro utilizado é interligado a um computador munido de um software desenvolvido a partir da norma SAE J784a que efetua todos os cálculos e as correções necessárias para determinar as tensões residuais. Em função disso, não apresentaremos cálculos e sim análise dos resultados das medições em forma de tabelas e gráficos no capítulo 7.

#### **6.4.3 Procedimento de avaliação das superfícies**

Para avaliar as superfícies usinadas e as camadas formadas após nitretação, os anéis foram cortados e embutidos. Todas as peças foram lixadas e polidas antes de serem avaliadas microscopicamente. A revelação da microestrutura foi obtida, atacando o material com uma solução de Marble contendo 10g de  $\text{CuSO}_4$ , 50 ml de  $\text{HCl}$  e 50 ml de  $\text{H}_2\text{O}$  destilada, durante 10 segundos. Para evidenciar as camadas formadas na subsuperfície, os anéis foram atacadas por uma solução de Nital contendo 97 ml de ethanol e 3 ml de  $\text{HNO}_3$  durante 50 segundos. Com o auxílio de um analisador de imagem, fotos com ampliação de até 1000 vezes foram tiradas para analisar a integridade da superfície.

#### **6.4.4 Procedimento de preparação e medição de dureza**

Antes de realizar as medidas de dureza, as amostras foram preparadas de acordo com a seguinte sequência:

1. Coletar amostras
2. Embutir as amostras
3. Retificar a face a ser avaliada
4. Lixar a face a ser avaliada com lixa grana 120, 320, 400, e 600 até obter uma superfície lisa.
5. Polir a face a ser avaliada com grãos de óxido de alumínio até obter uma superfície polida.
6. Lavar o corpo de prova com álcool
7. Secar o corpo de prova
8. Atacar o material com Nital 3%
9. Medir a dureza superficial
10. Medir a dureza na subsuperfície com o auxílio de um micrômetro digital.

#### **6.5 Máquina Retificadora**

Tipo de máquina: Retificadora de faces de duplo disco com eixo vertical.

Modelo da máquina: V-5C

Fabricante: Nissei

Método de alimentação: Sistema com disco carregador

Alimentação de energia elétrica: CA 440  $\pm$  10% 60 Hz, Painel de controle CA 110V & CC 24V

##### **6.5.1 Capacidade dos motores**

Motor do fuso principal:	CA 220- KW X 4 P	2 unidades
Motor do disco carregador:	CA 0,4 KW X 4 P	1 unidade
Motor de avanço do rebolo:	CA 1,2 KW Servomotor	2 unidades
Motor do braço dressador:	CA 0,2 KW X 4 P	1 unidade

Motor da bomba do hidráulico:	CA 0,75 KW X 4P	1 unidade
Motor da bomba de lubrificação:	CA 0,02 KW X 2P	1 unidade

### **6.5.2 Cabeçote do rebolo**

Disco de montagem do rebolo:  $\varnothing 585 \times 30$  mm

Rotação do fuso do rebolo: 300 a 910 rpm

Direção de rotação do rebolo: Reversível

Máxima distância entre rebolo superior e inferior: 80 mm para rebolos convencionais e 140 mm para rebolos de CBN

Sistema de lubrificação dos rolamentos do fuso principal: Graxa permanente

Sistema de lubrificação das guias deslizantes do cabeçotes: unidade de lubrificação centralizada.

### **6.5.3 Sistema de avanço do cabeçote porta rebolo**

Indicador de posição de rebolo: indicador digital de 6 dígitos  $\pm 000,000$  mm.

Velocidade de avanço rápido do rebolo: 200 mm / min acionado por um servomotor CA

Seletor de velocidade de avanço do rebolo: rápido – médio – lento.

Avanço por pulso pelo botão de comando: 0,001 mm / pulso.

Valor de ajuste do avanço de compensação na retificação: 0,001 a 0,099 mm (preajustado conforme necessidade)

Valor de ajuste do avanço de compensação na dressagem: preajuste conforme necessidade.

Memória de posicionamento: Posição de retificação e de dressagem podem ser memorizadas.

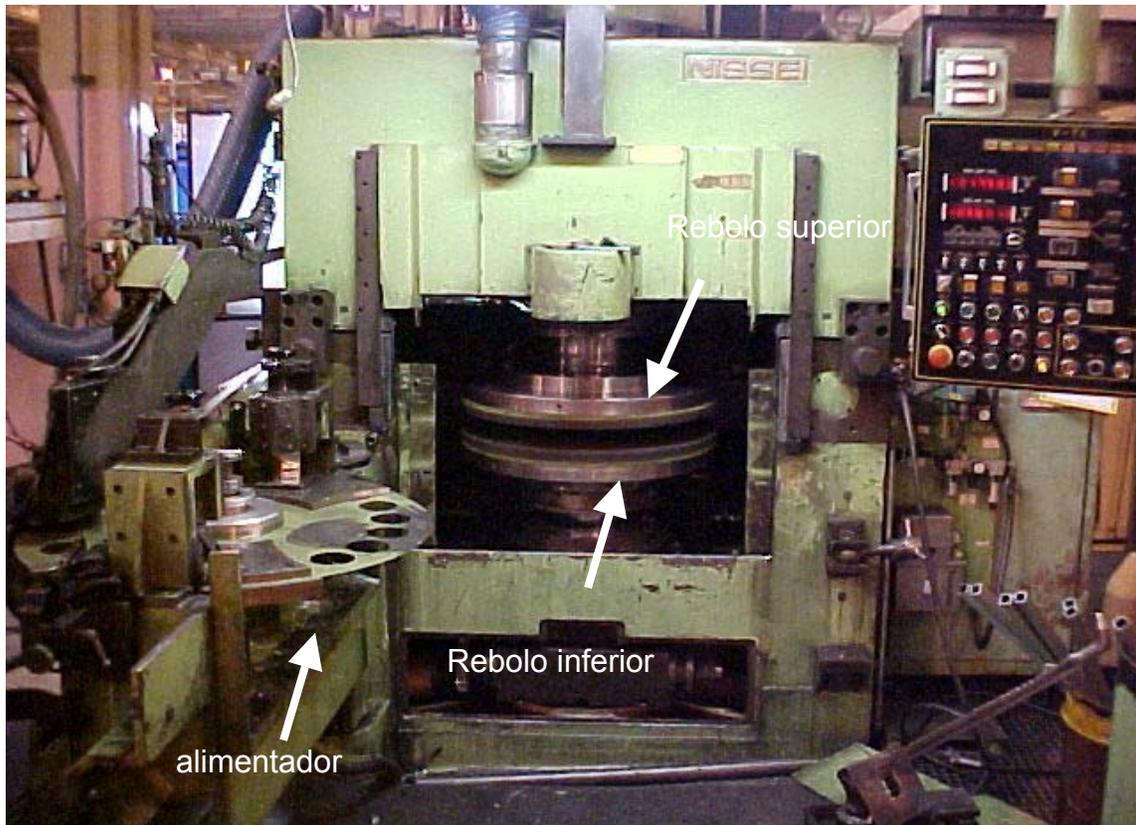


Figura 6.4: Retificadora de disco com eixo vertical

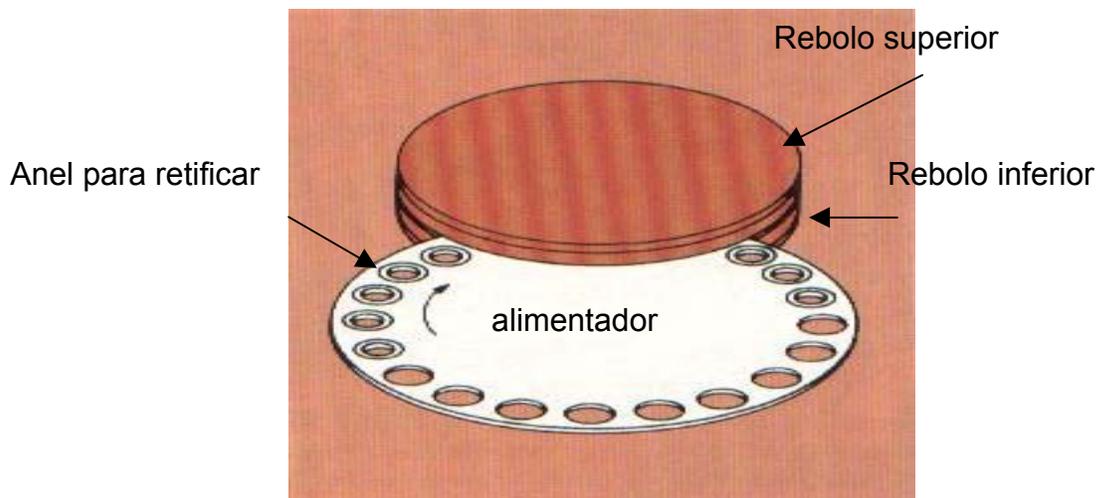


Figura 6.5: Esquema de retificação de disco com alimentador rotativo

## **6.6 Ferramentas de usinagem e dressagem**

### **6.6.1 Rebolo de corte**

A ferramenta de corte é um rebolo de CBN com ligante resinoide de 585 mm de diâmetro.

Fabricante: Noritake

Especificação: Noritake Grinding Wheel **CBN 200 / 230 P75 B38 3.0**

Onde :

<b>CBN:</b>	Nitreto Cúbico de Boro
<b>200/230:</b>	Tamanho do grão abrasivo
<b>P:</b>	Dureza do rebolo (médio)
<b>75:</b>	Concentração
<b>B:</b>	Ligante (Resinóide)
<b>38:</b>	Ligante especial
<b>3.0:</b>	Espessura da camada de CBN

### **6.6.2 Dressador**

Dressador: Óxido de alumínio: AA220 G8 VL

Fabricante: Sivat

Dimensões: 25,4 x 50 x 125 mm

### **6.6.3 Fluido de corte**

Óleo integral AGM 5 Fornecedor FL Brasil

Densidade 0,82 - 0,86 para temperatura T = 20 a 24°

Viscosidade 3 – 6 cst para temperatura T = 40°

Ponto de fulgor = 110° mínimo

## Capítulo 7

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 7.1 Análise da microestrutura

A camada nitretada tem 0,10 mm de profundidade e é formada por três camadas: a camada branca, a camada de difusão e a camada intermediária.

A camada branca é camada formada na superfície dos materiais após a operação efetiva de nitretação. Ela contém puro nitreto de cromo e apresenta uma dureza bastante elevada da ordem de 1300 HV. Ela tem uma espessura de 0,005 mm e tem boa resistência ao desgaste e também a oxidação. Por outro lado, ela acelera o processo de desgaste das ferramentas de corte e pode gerar também riscos em camisas e conseqüentemente aumentar o consumo de óleo em motores de combustão interna.

A camada de difusão é a camada abaixo da camada branca. Ela apresenta também uma elevada dureza mas menor do que a camada branca.

A camada intermediária é a camada que se apresenta entre o metal base que não foi afetada pela nitretação e a camada de difusão. Ela tem uma dureza menor do que a camada de difusão. As três camadas estão apresentadas na figura 7.1.

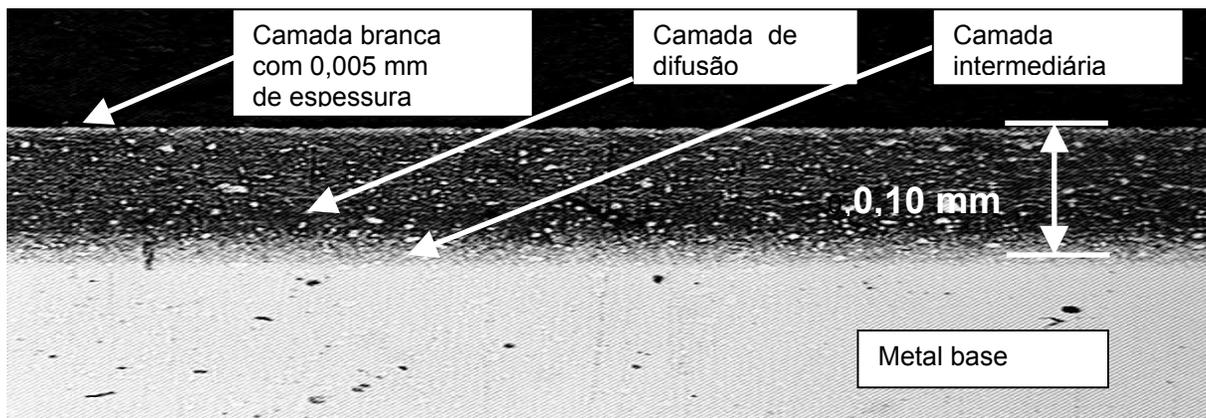


Figura 7.1: Micrografia da camada branca, de difusão e intermediária – 200 X  
Aço inoxidável ISO 6621-3 subclasse MC 66 - nitretado

As figuras 7.2 e 7.3 apresentam os resultados referentes à microestrutura do núcleo do material antes e após retificação moderada. Foi verificado em ambos os casos que a matriz continua sendo martensítica com pequenos carbonetos distribuídos uniformemente.

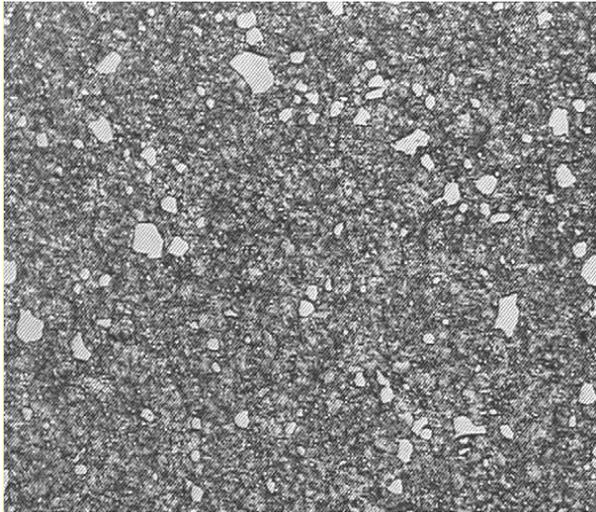


Figura 7.2: Microestrutura do material antes Retificação (1000 X)

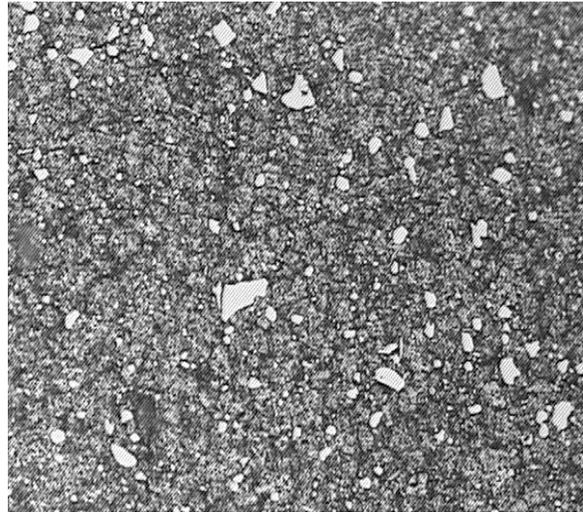


Figura 7.3: Microestrutura do material após Retificação (1000 X)

Já as figuras 7.4 e 7.5 mostram a microestrutura da superfície antes e após retificação moderada. Ambas as duas figuras apresentam uma estrutura martensítica caracterizada pela área escura. Na figura 7.4, destacam-se grandes regiões brancas representando a camada branca decorrente da operação de nitretação. Na figura 7.5, esta camada não aparece pois durante a operação de retificação, ela é totalmente removida favorecendo o aparecimento dos carbonetos distribuídos uniformemente. Os carbonetos de cromo aparecem predominantemente na estrutura e são caracterizados pelas regiões mais claras.

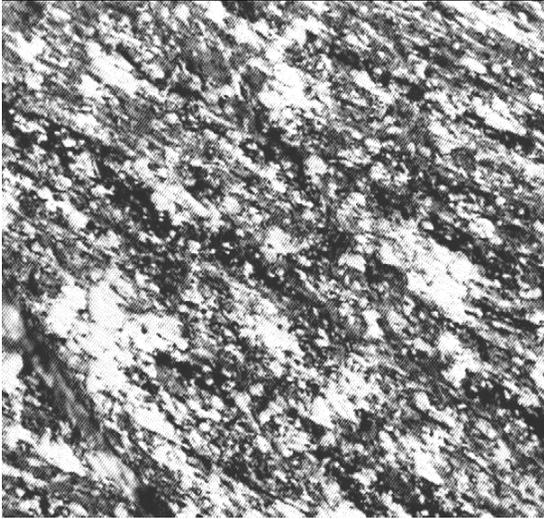


Figura 7.4: Microestrutura da superfície antes Retificação – 1000 X

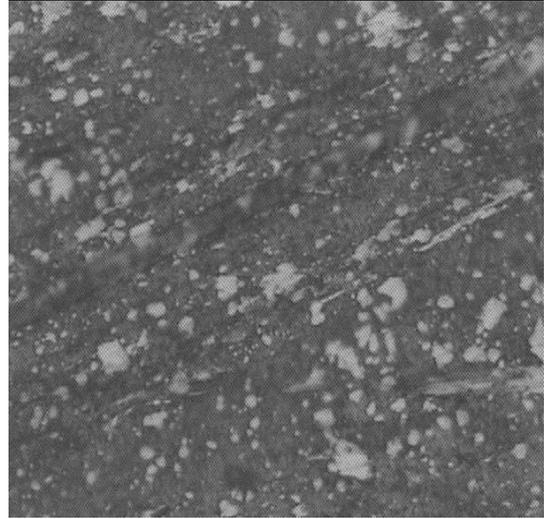


Figura 7.5: Microestrutura da superfície após Retificação – 1000 X

Não foi observado nenhuma alteração metalúrgica tanto na superfície quanto na subsuperfície. Também não houve danos térmicos. Isto se justifique pela boa qualidade do óleo refrigerante e lubrificante, da abundância do volume, da pressão e do bom direcionamento do fluxo para a região de contato entre o rebolo a peça. A isenção de danos térmicos mostra que não houve superaquecimento do material. Não houve monitoramento da temperatura de trabalho durante os ensaios mas a do óleo de corte antes da operação foi 20°C contra 25°C na saída. Estas baixas temperaturas são bons indicadores e mostram que a temperatura na interface entre o grão e a peça foi efetivamente baixa. O poder de lubrificação e refrigeração do fluido de corte utilizado proporcionou uma menor geração de calor o que impediu que as peças atingissem temperaturas elevadas a ponto de causar danos térmicos. Isto traz benefícios a maior facilidade de dissipação do calor gerado no processo.

Evidentemente o óleo integral tem uma ação predominantemente lubrificante mas os grãos abrasivos são de CBN e têm uma elevada condutividade térmica. A facilidade de dissipação de calor do rebolo de CBN aliada com a excelente lubrificação, proporcionou à superfície retificada uma boa conservação da sua integridade.

As figuras 7.6 e 7.7 mostram o acabamento da camada superficial das peças após a operação de retificação suave e moderada. Pode-se observar nos dois casos os diferentes caminhos percorridos pelos grãos através da existência de vários riscos decorrentes da operação. Cada caminho ou risco é caracterizado pela sua direção, largura e profundidade influenciado respectivamente pelo método de alimentação, tamanho e penetração do grão abrasivo.

Na retificação moderada conforme figura 7.7, os sulcos são mais profundos do que na retificação suave devido à profundidade de corte ser maior.

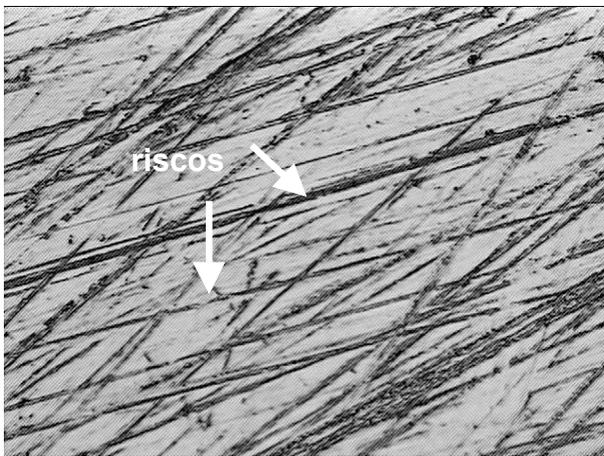


Figura 7.6: Acabamento da superfície após Retificação Suave (500 X)

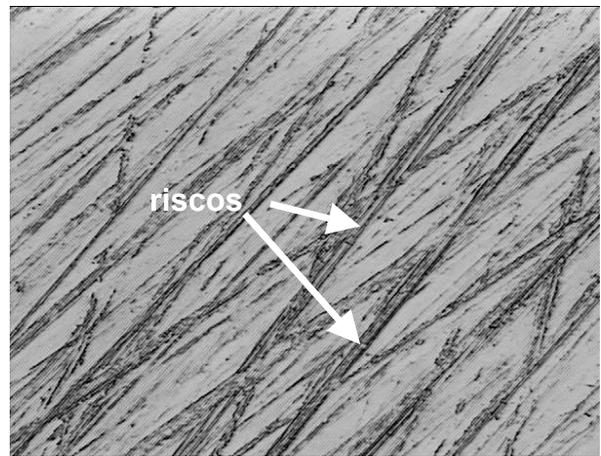


Figura 7.7: Acabamento da superfície após Retificação moderada (500 X)

## 7.2 Análise das Tensões Residuais

Antes da operação de retificação, foram analisadas as tensões residuais na superfície e na subsuperfície. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 7.1 e na figura 7.8.

Tabela 7.1: Tensões residuais superficiais antes da operação de retificação

Peça	Angulo de medição			Tensão média (MPa)
	0°	90°	180°	
Peça 1	- 450	- 430	- 390	- 423
Peça 2	- 425	- 400	- 395	- 407
Peça 3	- 405	- 385	- 446	- 412

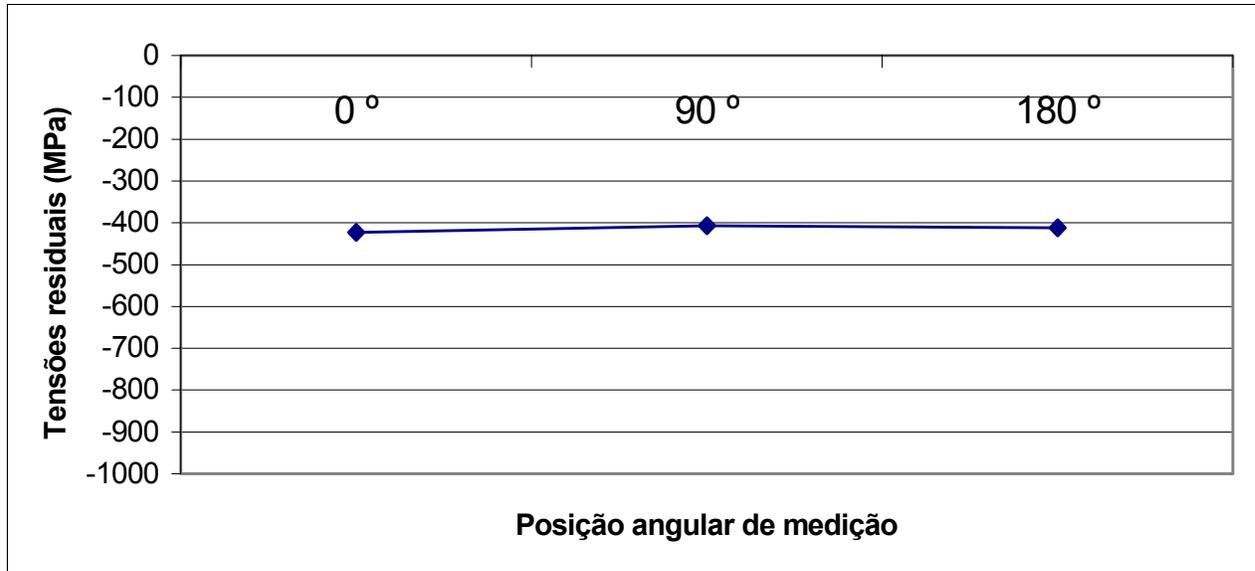


Figura 7.8: Tensões residuais na superfície antes da operação de retificação

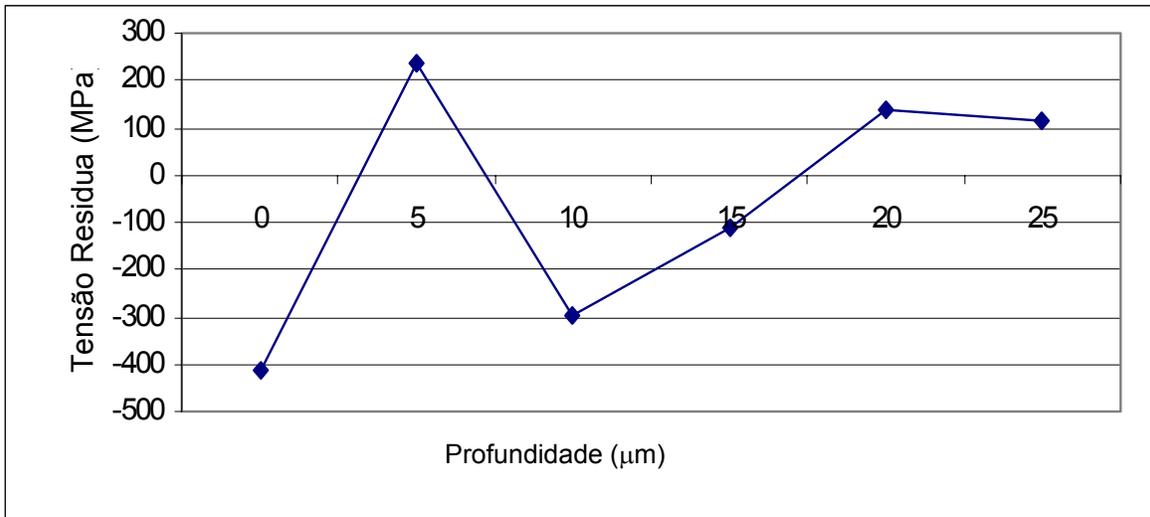


Figura 7.9: Distribuição das tensões residuais antes da operação de retificação

Observa-se que a tensão residual superficial média após a operação de nitretação é de compressão (- 414 MPa). Este resultado era esperado pois, geralmente um material passando por um processo de nitretação apresenta uma tensão residual da ordem de - 475 MPa (Regone, 2000). Nota-se que as tensões residuais na subsuperfície assumiram valores positivos e negativos. Isto significa que foram desenvolvidas na subsuperfície tensões de tração e de compressão. O desenvolvimento dessas tensões ocorreu da seguinte maneira. Durante a operação de nitretação, ocorre uma alimentação contínua de nitrogênio. A difusão dos átomos de nitrogênio dentro do material no espaço inter-atômico provoca reações e alterações das células já formadas conforme a figura ilustrativa 7.10.

Quando a célula A e A1 são alimentadas com nitrogênio, elas se expandem, reagindo uma contra a outra favorecendo o aparecimento de tensões de compressão. Como existe uma forte interação entre as células, nenhuma delas fica livre com as deformações. Desta forma as células A e A1, devido a expansão sofrida, provocam o deslocamento das células vizinhas B e B1, resultando em surgimento de tensões de tração. A célula B por sua vez desloca a célula C1 que comprime a célula C. Esta forte interação entre as células resulta em desenvolvimento de tensões residuais de compressão e de tração na subsuperfície. Estas tensões tendem a decrescer com a profundidade de nitretação e a se estabilizar em um nível menor do que o inicial.

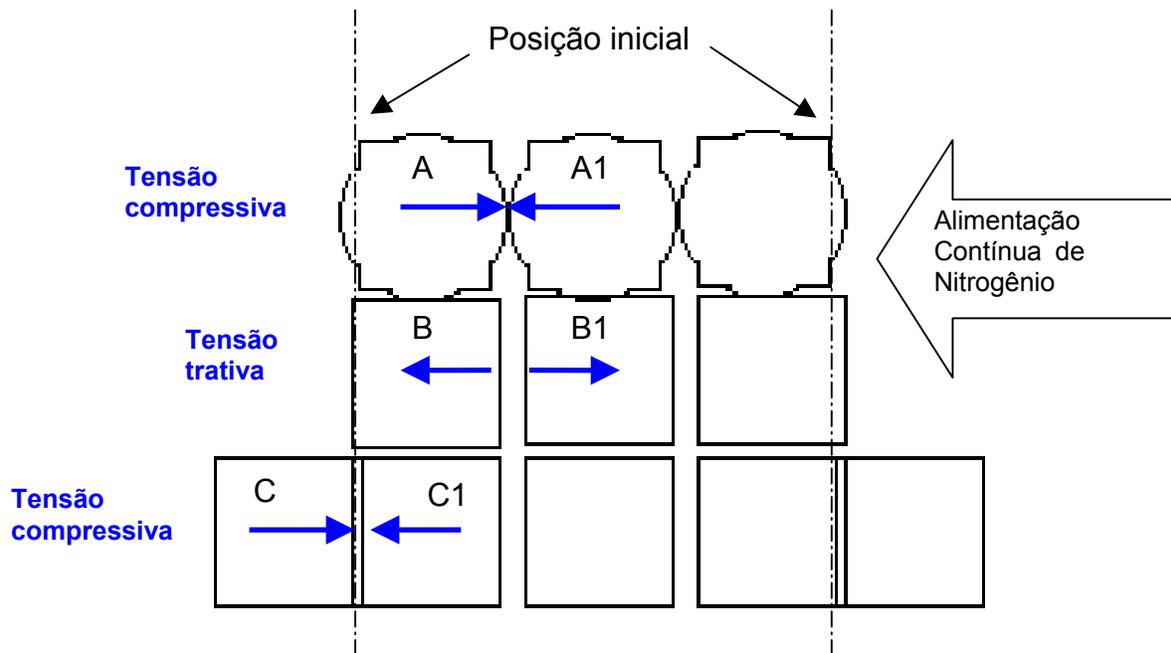


Figura 7.10: Ilustração do mecanismo de formação das tensões residuais

Na figura 7.9, pode-se observar que tanto as tensões de compressão quanto as de tração decrescem com a profundidade tendendo a se estabilizar a um valor bem menor do que o valor inicial. Este comportamento é típico para tensões residuais em camadas nitretadas.

Como em operação de retificação dupla face, as peças são retificadas através de dois rebolos que trabalham simultaneamente, torna-se relevante a apresentação dos resultados das medições realizadas nas duas faces da peça (face superior e face inferior). Os principais resultados das tensões residuais obtidas são apresentados na tabela 7.2 e 7.3.

Tabela 7.2: Tensões residuais superficiais após retificação suave ( $V_s = 11$  m/s;  
 $V_w = 0,11$  m/s;  $a_p = 0,018$  mm)

Identificação		Angulo de medição			Tensão média (MPa)
Peça	Face	0°	90°	180°	
Peça 1	Face superior	-213	-256	-158	-172
	Face inferior	-77	-190	-135	
Peça 2	Face superior	-133	-208	-104	-167
	Face inferior	-82	-167	-310	
Peça 3	Face superior	-167	-349	67	-151
	Face inferior	-216	-256	15	
Peça 4	Face superior	-93	-220	-51	-182
	Face inferior	-234	-258	-239	
Peça 5	Face superior	-174	-163	-109	-145
	Face inferior	-199	-249	27	
Peça 6	Face superior	-82	-98	-147	-131
	Face inferior	-294	28	-195	

Tabela 7.3: Tensões residuais superficiais após retificação moderada ( $V_s = 28$  m/s;  
 $V_w = 0,33$  m/s;  $a_p = 0,032$  mm)

Identificação		Angulo de medição			Tensão média (MPa)
Peça	Face	0°	90°	180°	
Peça 1	Face superior	-813	-730	-609	-712
	Face superior	-701	-750	-668	
Peça 2	Face superior	-949	-806	-783	-828
	Face superior	-924	-779	-729	
Peça 3	Face superior	-920	-702	-698	-758
	Face superior	-801	-727	-700	
Peça 4	Face superior	-704	-819	-538	-661
	Face superior	-747	-610	-550	
Peça 5	Face superior	-879	-855	-922	-864
	Face superior	-703	-918	-908	
Peça 6	Face superior	-594	-896	-551	-688
	Face superior	-706	-679	-704	

A figura 7.11 apresenta as tensões residuais médias na condição de retificação suave e moderada na superfície das peças.

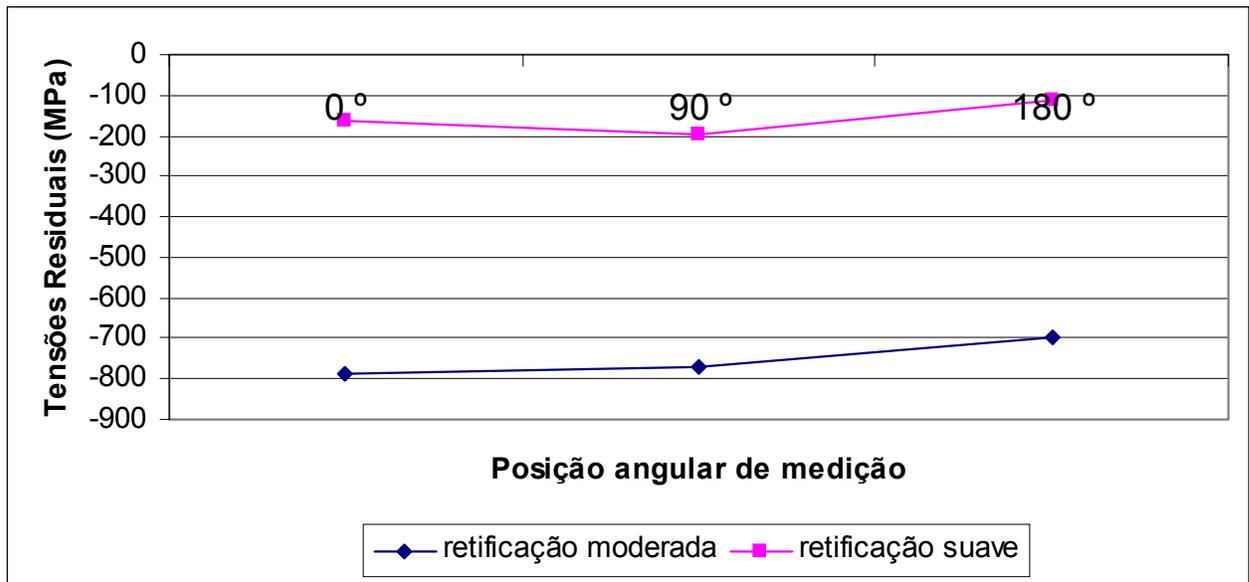


Figura 7.11: Tensões residuais superficiais médias após retificação suave e moderada

Pode-se verificar na figura 7.11 que para a condição de retificação moderada, elevadas tensões residuais foram geradas na superfície das peças. No entanto elas são todas de compressão. As tensões residuais compressivas desenvolvidas na superfície se justificam pelo baixo calor induzido na superfície retificada. Provavelmente, a grande parte do calor gerado durante o atrito entre a peça os grãos abrasivos, foi rapidamente removido pelo fluido refrigerante e pelo rebolo de corte feito de CBN.

O CBN, além de ter a propriedade de usinar os materiais suavemente devido a sua geometria pontiaguda, ele tem uma alta condutividade térmica ( $3,3 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}$ ) que contribui significativamente para o resfriamento da superfície da peça. A boa refrigeração durante a operação aliada com a alta condutividade térmica do rebolo, provavelmente impediram que o calor gerado se propagasse no material. Tal fato minimiza o aparecimento de tensões residuais de tração que são principalmente causadas por tensões de origem térmica.

Na condição de retificação suave, as tensões desenvolvidas na superfície também são predominantemente de compressão porém em magnitude menor do que na condição de retificação moderada. Isto se justifica pelos parâmetros de corte empregados estarem em níveis muito baixo. Os parâmetros são: a velocidade de corte (11 m/s), o avanço (0,11 m/s) e a profundidade de corte (18  $\mu\text{m}$ ). A retificação foi tão suave que não houve praticamente indução de tensões mas apenas um alívio mecânico das tensões residuais presentes no material. Estas tensões foram induzidas dentro do material na operação de nitretação, portanto antes da operação de retificação. Pode-se observar que após retificação suave, as tensões não são uniformes na superfície ou seja os seus valores não são próximos. Elas são predominantemente de compressão mas em determinadas regiões da superfície, elas são de tração. Esta dispersão pode ser explicado justamente por ter ocorrido um alívio mecânico, onde o processo se realiza em um curto espaço de tempo, envolvendo variações bruscas de temperaturas na superfície retificada. Nas regiões onde houve maior carga térmica aplicada ou seja onde houve maior interação entre grãos abrasivos e peça, as tensões sofreram maior alívio. Nestas regiões de maior alívio, houve um decréscimo do valor inicial das tensões, suficiente para alterá-las de compressão tração. Nas regiões de menor alívio, também houve decréscimo de tensão mas em amplitude menor. Por isso, nestes casos as tensões continuaram sendo de compressão.

A remoção rápida do calor desenvolvido na região de corte pode ser avaliada também pelo comportamento da dureza na superfície e na subsuperfície da peça. Se houver amolecimento do material ou seja excesso de calor induzido no material, a dureza tenderá a valores menores do que obtidos antes da operação de retificação. A figura 7.12, mostra a distribuição da dureza média do material antes e após retificação. Pode-se observar que a camada nitretada apresenta uma elevada dureza na superfície, seguida de uma queda gradual até aos valores de dureza do núcleo do material.

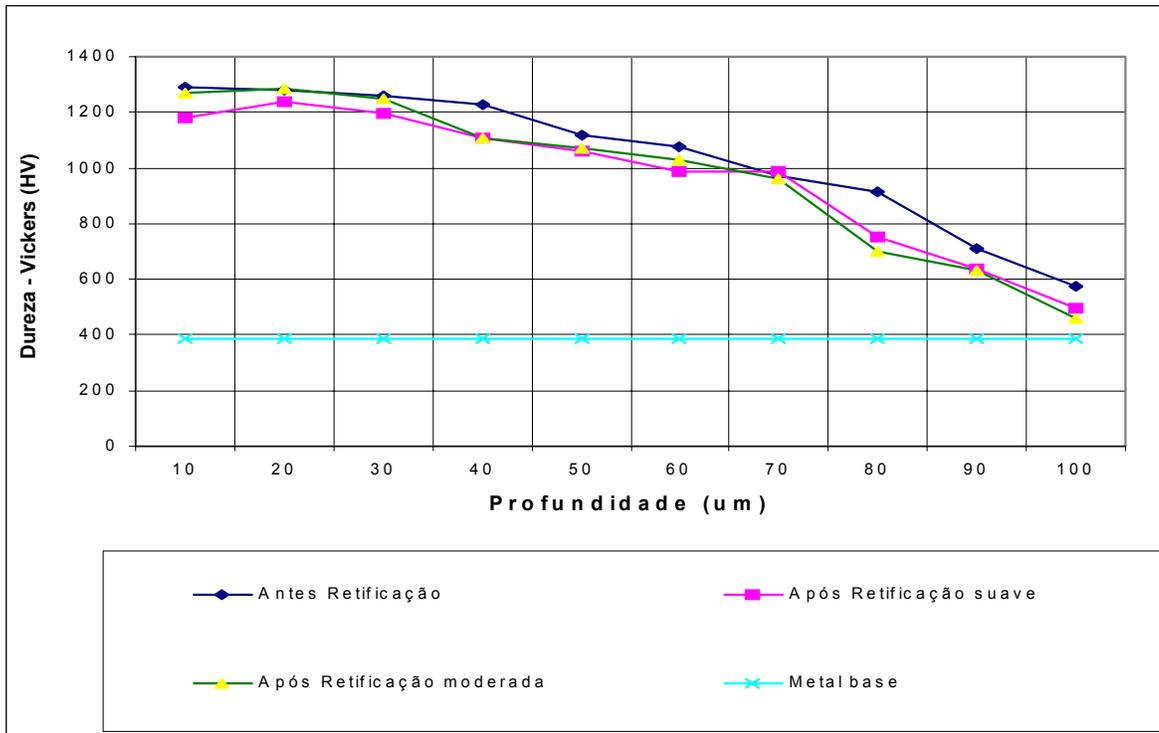


Figura 7.12: Dureza da peça em diversas profundidades em relação à superfície

Observa-se que as curvas mantiveram o mesmo perfil antes e após retificação com valores praticamente iguais. Isto evidencia que não houve superaquecimento ou seja não houve amolecimento do material. Isto já era esperado em virtude da baixa temperatura de trabalho e da excelente manutenção da capacidade de corte do rebolo de CBN. Evidentemente as curvas não estão perfeitamente alinhadas mas isto é admissível. Ocorre que durante qualquer medição, alguns erros são inevitavelmente introduzidos no processo. Entre esses erros inerentes a qualquer processo de medição, pode-se citar o erro de leitura do operador, o erro de manuseio e principalmente a não homogeneidade do material em avaliação. Estas variáveis são dificilmente controladas e influenciam a leitura final de uma determinada medida. Neste trabalho as suas influencias não afetaram os resultados significativamente. Com base nisto, pode se afirmar que o material manteve a integridade da sua dureza.

A presença das tensões residuais de compressão é mais um fato para comprovar a eficiência da condutividade térmica do CBN. Outro fator que contribui a este resultado é a baixa taxa de remoção do material. Convém também salientar que o CBN também tem a característica de induzir tensões de compressão ao invés de tração em aços endurecidos ( Ogawa Kogi, 2000). Testes realizados mostraram que as tensões residuais obtidas, quando da utilização de rebolos de CBN e diamantados, foram predominantemente de compressão enquanto os rebolos convencionais tendem a propiciar, tensões residuais de tração (Bianchi et al., 2001).

O desenvolvimento de tensões residuais de compressão na superfície do anel é desejável pois, elas tem efeito benéfico nas propriedades de resistência mecânica. De fato as tensões residuais compressivas aumentam a resistência a fadiga do material e consequentemente a confiabilidade com relação a ocorrência de falhas repentinas ou imprevisíveis. O material em estudo é um anel de compressão de motor de combustão interna e é destinado a suportar cargas muito elevadas em alta temperatura. Como ele trabalha com alta velocidade em movimento alternado, ele está sujeito a quebrar, caso ele não apresentar uma boa resistência à fadiga. Dentro do material, as tensões de compressão agem como se fossem barreiras impedindo a nucleação e a propagação de possíveis trincas que podem provocar o rompimento do material.

Observa-se na figura 7.13, que as tensões residuais geradas em condição de corte suave são pequenas. Isto significa que as deformações geradas também são pequenas, o que proporciona uma melhor estabilidade dimensional das peças retificadas. Ao contrário das peças retificadas em condição moderada, as altas tensões revelam que houve maiores deformações. A tabela 7.4 e a figura 7.13 mostram que quando se aumenta os esforços de corte através do aumento em conjunto dos parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, as tensões residuais induzidas também aumentam consideravelmente. Neste trabalho, conforme mostra a tabela 7.4, aumentando a velocidade de corte e o avanço em torno de 3 vezes e a profundidade aproximadamente 2 vezes, as tensões residuais aumentaram em média de -158 para -751 MPa, o que representa um aumento de 375 %.

Tabela 7.4: Tensões residuais na superfície em função dos parâmetros de corte

Condição Retificação	Vs (m/s)	Vw (m/s)	A <sub>p</sub> (mm)	Tensão (Mpa)	Crescimento da Tensão
Suave	11	0,11	0,018	-158	375%
Moderada	28	0,33	0,032	-751	

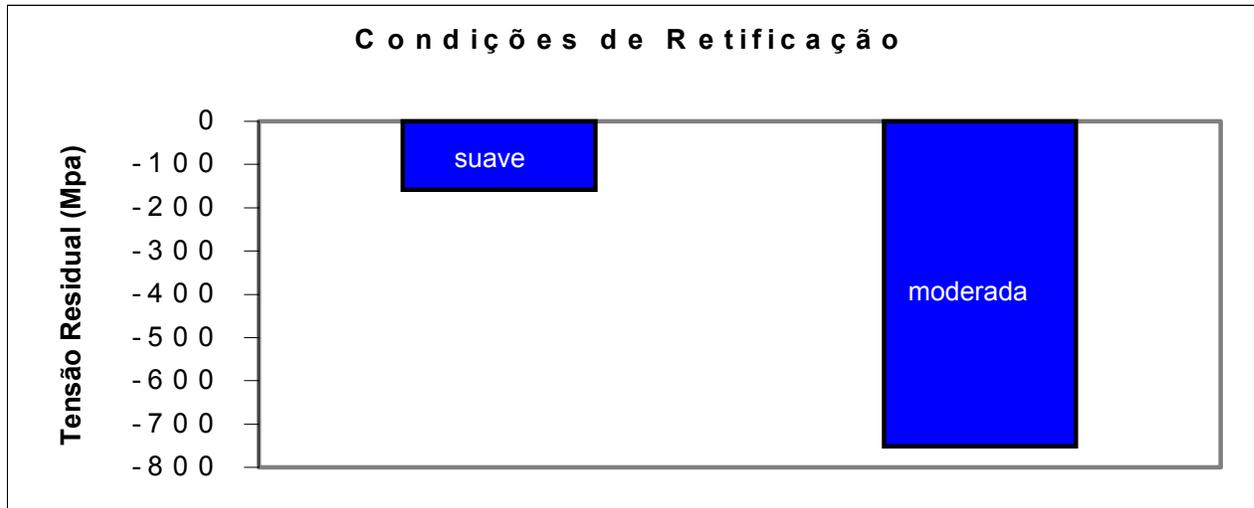
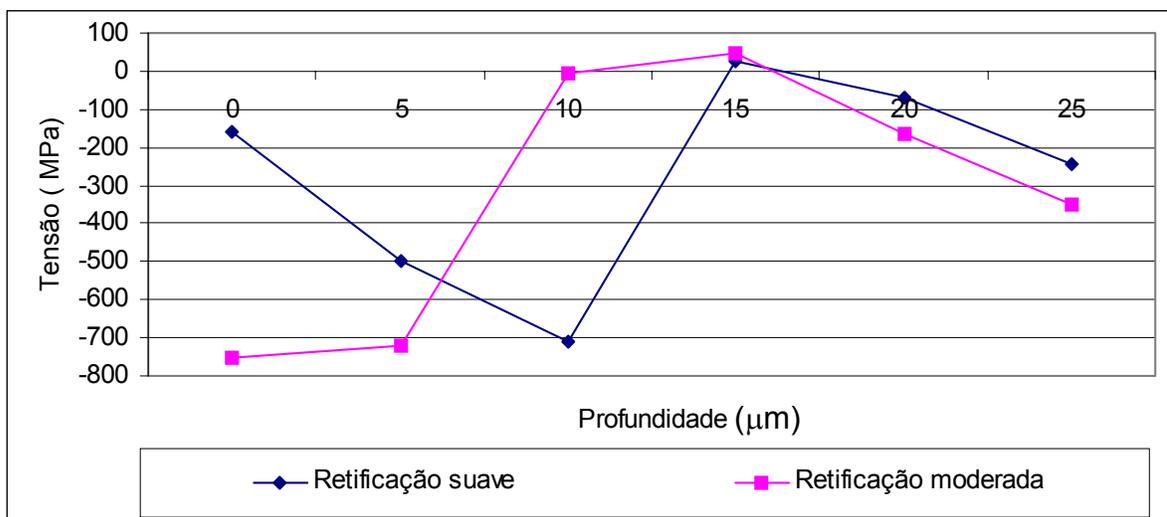


Figura 7.13: Níveis de tensões residuais em condições de retificação suave e moderada

A figura 7.14 apresenta a distribuição das tensões residuais médias na superfície e na subsuperfície em profundidade de 5, 10, 15, 20 e 25  $\mu\text{m}$ .



Distribuição das tensões residuais na superfície e na subsuperfície

Ao analisar a figura 7.14, composta por resultados obtidos na retificação suave e moderada, pode-se observar-se que as tensões residuais na subsuperfície tem perfil similar nas duas condições de retificação. Elas assumiram valores negativos até a profundidade menor que  $10\mu\text{m}$ . Em profundidade de  $15\mu\text{m}$ , as tensões passaram de compressão para tração e em seguida tenderam para compressão. Convém salientar que tensões residuais de compressão são desejáveis não somente na superfície mas também na subsuperfície. No entanto observe-se que houve um pico de tensão residual de tração tanto na condição de retificação suave, quanto na moderada mas em pequena magnitude. Segundo Diniz (1996), na zona de retificação, a expansão térmica do material mais quente próximo à superfície é parcialmente restrita pelo material mais frio da subsuperfície que, se suficientemente grande, causam um fluxo plástico. Durante o resfriamento subsequente, depois do passe do rebolo, o material plasticamente deformado tende a contrair mais que o material da subsuperfície, mas o requisito de continuidade do material faz com que tensões de tração se desenvolvam numa fina camada da superfície.

### **7.3 Acabamento superficial**

#### **7.3.1 Análise comparativa da rugosidade das duas faces do anel**

As tabelas 7.5 e 7.6 apresentam os parâmetros de corte e a rugosidade média obtida a partir dos resultados das medições de rugosidade. O que na maioria das vezes é esperado quando se replica um experimento realizado através de um processo robusto e estável, é obter resultados iguais ou bastante similares. Entretanto o fato de obter resultados diferentes após a replicagem de um experimento não deve ser visto como uma surpresa ou uma ocorrência anormal. Essa variação de resultados de ensaio para ensaio denominada erro experimental, é inerente a qualquer operação de usinagem. Em operação de retificação este erro ocorre freqüentemente como ocorreu neste trabalho. Observa-se nas tabelas 7.5 e 7.6 que enquanto a rugosidade obtida no ensaio 1.1 está na ordem de  $1,33 \mu\text{m}$ , a replicagem 2.1 apresenta rugosidade na ordem de  $1,03\mu\text{m}$ . Este desvio de rugosidade ocorre normalmente em processo de retificação devido à introdução de variáveis não controladas como a dressagem por exemplo ou não controláveis e principalmente às mudanças topográficas do rebolo.

Antes de iniciar cada ensaio, o rebolo foi dressado nas mesmas condições justamente para manter a mesma agressividade afim de minimizar os desvios de medidas de rugosidade. Durante a operação de dressagem, os grãos abrasivos distribuídos aleatoriamente na superfície são geometricamente alteradas. Além disso, durante a operação de retificação, enquanto alguns desses grãos são fraturados ou arredondados outros se soltam favorecendo o aparecimento de novos outros grãos que tornam o rebolo mais agressivo. Tudo isto ocorre de uma forma aleatória fazendo com que não se consegue manter constante a agressividade do rebolo. A topografia do rebolo muda sempre que se executa uma dressagem. Este fenômeno é inerente a operação de retificação e tem influência direta na qualidade do acabamento das superfícies geradas.

Tabela 7.5: Resultados das medidas de rugosidade após o 1º ensaio

Ensaio	Parâmetros de corte			Respostas	
	Vs (m/s)	Vw (m/s)	ap (mm)	Rz Sup. (µm)	Rz Inf.(µm)
1.1	11	0,11	0,018	1,33	1,37
1.2	28	0,11	0,018	1,01	0,99
1.3	11	0,11	0,032	1,01	1,14
1.4	28	0,11	0,032	0,91	0,99
1.5	11	0,33	0,018	1,10	1,11
1.6	28	0,33	0,018	0,90	0,88
1.7	11	0,33	0,032	1,30	1,30
1.8	28	0,33	0,032	1,06	1,06

Tabela 7.6: Resultados das medidas de rugosidade após o 2º ensaio (replicagem)

Ensaio	Parâmetros de corte			Respostas	
	Vs (m/s)	Vw (m/s)	ap (mm)	Rz Sup. (µm)	Rz Inf.(µm)
2.6	28	0,33	0,018	1,35	1,43
2.3	11	0,11	0,032	1,10	1,08
2.8	28	0,33	0,032	1,12	1,04
2.5	11	0,33	0,018	0,86	0,83
2.4	28	0,11	0,032	1,37	1,34
2.7	11	0,33	0,032	0,98	1,06
2.2	28	0,11	0,018	1,08	1,15
2.1	11	0,11	0,018	1,03	1,10

Os valores de rugosidade apresentados nas figuras 7.15 e 7.16, representam as médias das medições nos 16 ensaios realizados. Comparando estes valores, percebe-se que a rugosidade obtida na face superior e inferior do mesmo anel é praticamente a mesma. Não houve variação significativa com relação ao acabamento superficial das duas faces. Isto mostra que os dois rebolos trabalham praticamente nas mesmas condições e proporcionam os mesmos efeitos nas superfícies retificadas.

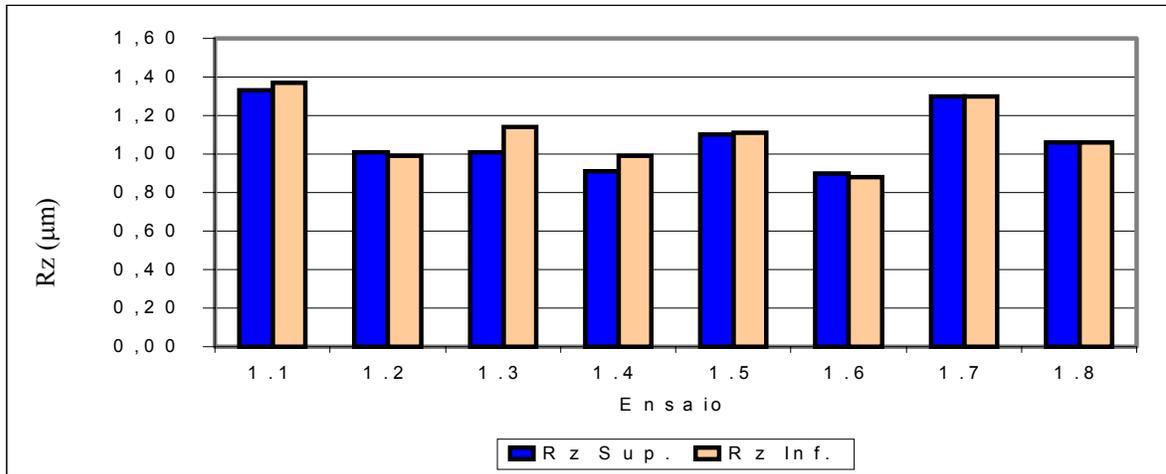


Figura 7.15: Rugosidade média na face superior (Rz Sup.) e inferior (Rz inf.)

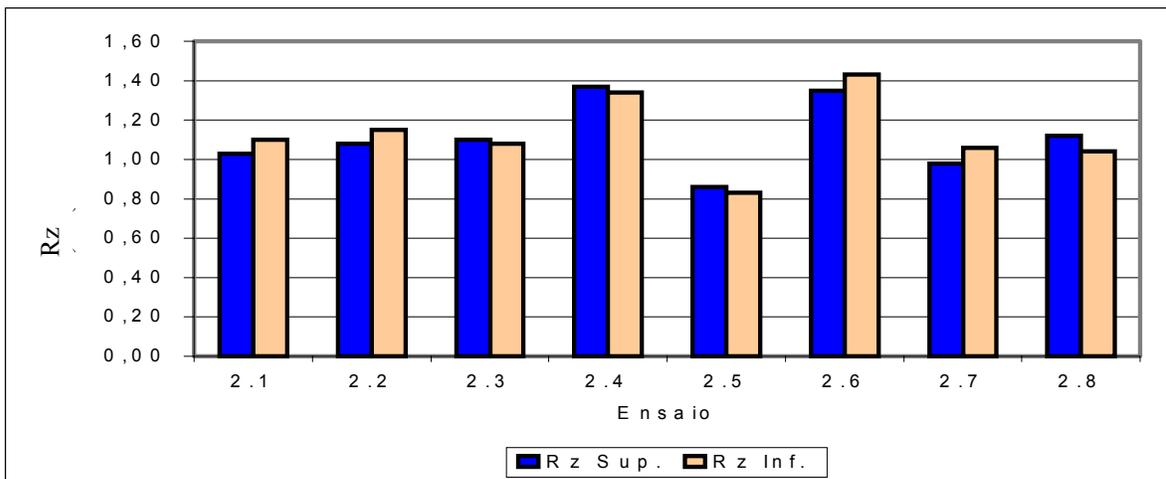


Figura 7.16: Rugosidade média na Face superior (Rz Sup.) e inferior (Rz inf.) após o segundo ensaio (replicagem)

### 7.3.2 Análise dos efeitos

Os principais resultados obtidos após processamento dos dados através do software MINITAB, opção " *Design Of Experiment* " (DOE), são apresentados a seguir em forma de tabela e figuras. Os gráficos normais dos efeitos padronizados (figura 7.17 e 7.18 ) permitam fazer uma avaliação primária dos resultados obtidos. Pode-se observar que, alguns pontos não estão alinhados com relação a reta traçada e são distantes da região central. O afastamento destes pontos da reta evidencia a existência de efeitos que normalmente são significativos. Estes pontos aparentam ser significativos com nível de significância  $\alpha=0,1$ .

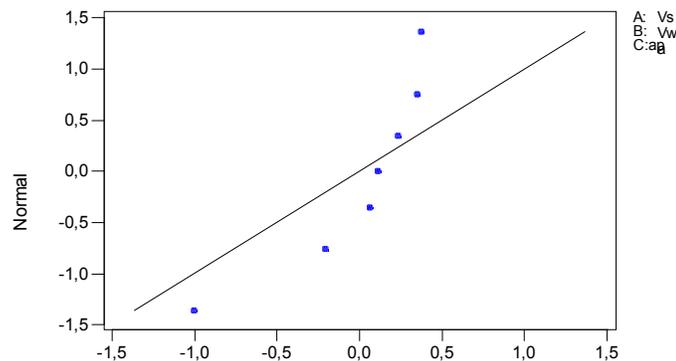


Figura 7.17: Gráfico de probabilidade normal dos efeitos padronizados da rugosidade Rz sup.

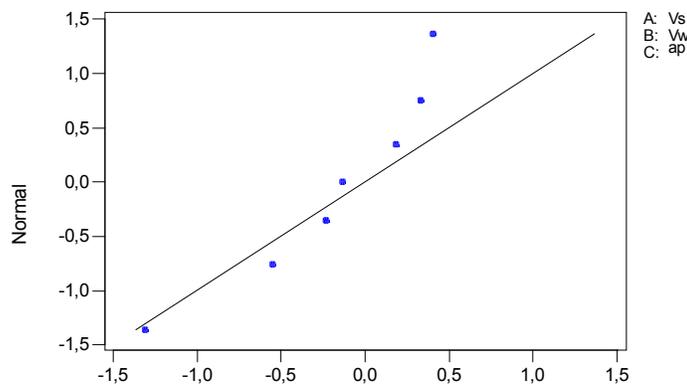


Figura 7.18: Gráfico de probabilidade normal dos efeitos padronizados da rugosidade Rz inf.

Outros resultados para a análise da relevância dos fatores são apresentados na tabela 7.7. Tais resultados são obtidos através do cálculo do efeito de cada variável assim como a interação entre as variáveis.

Tabela 7.7: Efeitos para análise da relevância dos fatores

Fatores	Efeitos (Rz Sup.)	Valor P (Rz Sup.)	Efeitos (Rz Inf.)	Valor P (Rz Inf.)
Vs	- 0,07625	0,642	- 0,1012	0,531
Vw	-0,10875	0,510	- 0,1437	0,380
a	- 0,06375	0,697	- 0,0687	0,669
Vs * Vw	0,12375	0,455	0,1288	0,420
Vs * a	0,09375	0,569	0,0638	0,691
Vw * a	0,12625	0,446	0,1213	0,456
Vs * Vw * a	- 0,19125	0,260	- 0,2212	0,191

O valor absoluto associado ao efeito de cada variável indica quanto esta variável está influenciando os resultados. Quanto maior for este valor, maior será a magnitude dos efeitos gerados. Pode-se observar na tabela 7.7 que cada fator influencia a rugosidade produzida na superfície das peças mas a interação entre todos eles é que mais influencia.

Através dos gráficos de pareto (figura 7.19 e 7.20), pode-se notar que as variáveis tem pouca influência sobre o acabamento quando são tratadas isoladamente. Os principais efeitos são decorrentes da interação entre as três variáveis. Este resultado era esperado pois, é típico de uma operação de retificação. Isto mostra que o desempenho desejado de uma operação de retificação, não pode ser obtido alterando-se apenas um dos parâmetros. É preciso otimizar todos os parâmetros envolvidos ao mesmo tempo e segundo uma combinação bem elaborada (König, 1980). Isto mostra também que a operação de retificação é muito sensível aos parâmetros de corte e que deve-se

entender muito bem como eles podem influenciar os resultados quando seus níveis forem alterados.

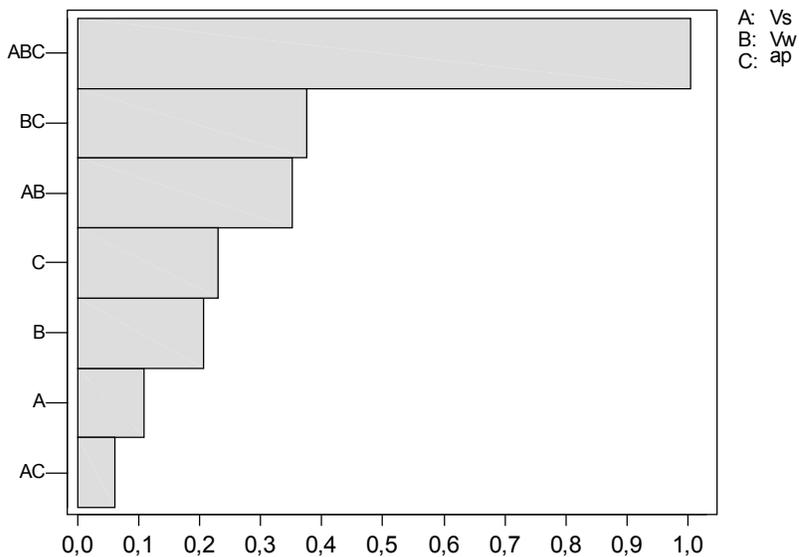


Figura 7.19: Gráfico de Pareto para Rz sup.

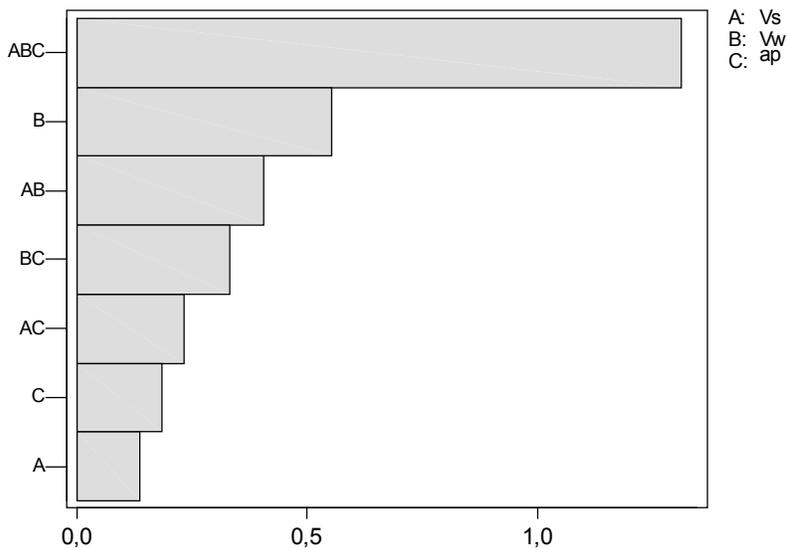


Figura 7.20: Gráfico de Pareto para Rz inf.

Pode-se observar nos gráficos de pareto (figura 7.19 e 7.20) o baixo nível de influência da velocidade de corte quando ela não interage com as outras variáveis. No entanto estas figuras mostram que a sua interação com o avanço ou com a profundidade também não influenciou praticamente a rugosidade. Isto significa que o acabamento das superfícies geradas, praticamente não foi afetada pela variação de velocidade de corte. As figuras 7,21 e 7.22 mostram que a rugosidade tende a ser menor quando a velocidade de corte é menor. Por outro lado, sabe-se que quando a velocidade de corte é elevada, um mesmo grão passa a remover um menor volume de cavaco pelo aumento da sua frequência de contato com a peça. Portanto o número de grãos ativos é maior. A espessura dos cavacos removidos é menor diminuindo os esforços de corte pela menor solicitação sobre cada grão abrasivo e o desgaste do rebolo (Bianchi, 1997). Além disso, rebolos de CBN normalmente quando trabalham com velocidade de corte elevada, proporcionam superfícies menos rugosas. Existe então um grande potencial de redução de rugosidade e principalmente de desgaste do rebolo quando se trabalha com velocidade de corte elevada.

As figuras 7.21 e 7.22 também mostram que a rugosidade em profundidade de corte igual a 0,018 mm é menor do que em profundidade de 0,032 mm. Este resultado era esperado pois, profundidades de corte menores normalmente resultam em superfícies menos rugosas pois, os grãos abrasivos penetram menos nas peças removendo uma quantidade de material menor. Disso resultam cavacos menores o que facilita sua expulsão. Além disso há também um menor atrito e riscamento entre cavacos removidos e a peça, proporcionando assim uma sensível melhoria no acabamento superficial.

Pode-se observar também nas figuras 7.21 e 7.22 que o nível mais elevado da velocidade de avanço, proporcionou uma superfície menos rugosas. Este resultado é interessante pois resulta diretamente em um aumento na quantidade de peças produzidas por unidade de tempo. Este aumento na velocidade de avanço representa um ganho potencial em produtividade.

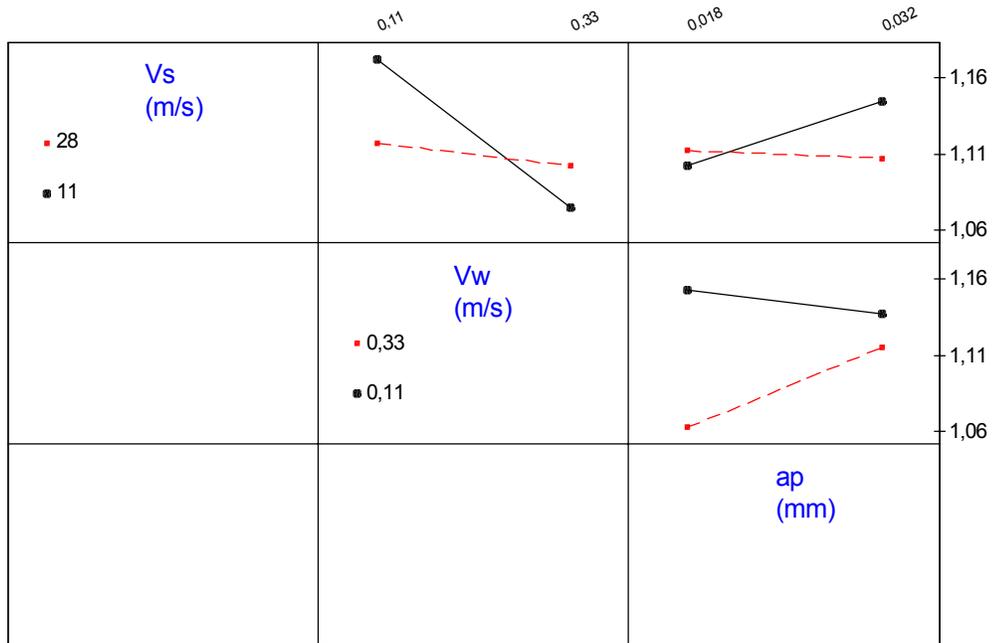


Figura 7.21: Gráfico de interações entre as variáveis para Rz inf.

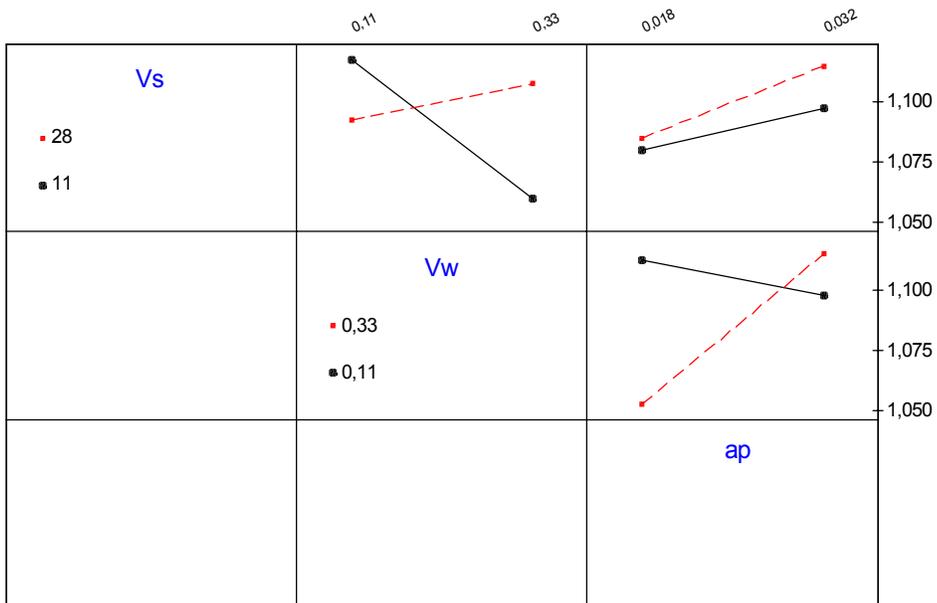


Figura 7.22: Gráfico de interações entre as variáveis para Rz sup.

### 8.3.3 Parâmetros de corte propostos

Visto que a interação entre as variáveis foi o fator mais importante neste trabalho, surge então a necessidade de propor parâmetros de corte que proporcionam um melhor acabamento. Com o auxílio do software Minitab, opção "response optimizer", foram encontrados os parâmetros otimizados que são apresentados na tabela 7.8.

Tabela 7.8: Parâmetros de corte otimizados

Velocidade de corte (m/s)	Velocidade de avanço (m/s)	Profundidade de corte (mm)
11	0,33	0,018

Estes valores propostos poderão abrir os caminhos para encontrar novos valores mais próximos dos pesquisados e que proporcionarão um acabamento melhor na superfície das peças retificadas. Portanto eles estão sujeitos a alterações.

## Capítulo 8

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

As condições de corte utilizadas têm influência direta na integridade das superfícies geradas;

Nas várias condições de retificação ensaiadas, não houve alterações metalúrgicas bem como de dureza do material;

As tensões residuais desenvolvidas na superfície do anel após a operação de retificação com rebolos de CBN são menores quando as condições de retificação forem suaves -158 (Mpa) e tendem a ser de compressão em magnitude maior quando as condições de retificação deixam de ser suave -751 (MPa);

A operação de retificação em condição suave, reduziu o nível das tensões residuais superficiais de - 475 (Mpa) a - 151 (Mpa) com relação a operação de nitretação;

A indução de tensões residuais de compressão, aliada com a baixa rugosidade superficial e isenção de danos térmicos proporcionaram ao material usinado, uma boa integridade superficial o que viabiliza tecnicamente o emprego de rebolos de CBN neste processo;

A interação entre as variáveis velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte tem maior influência no acabamento das superfícies geradas do que suas ações isoladas;

Em operação de retificação dupla face, o rebolo superior e inferior trabalham em condições praticamente iguais deixando nas superfícies retificadas os mesmos efeitos em termos de integridade de superfície.

### **SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Analisar a integridade superficial na retificação dupla face do anel de pistão com material de ferro fundido.

Utilizar o método de medição bidimensional para caracterizar melhor a distribuição das tensões residuais na superfície e na subsuperfície até 100  $\mu\text{m}$  de profundidade.

Estudar a influência de outros de fluidos de corte (sintéticos) na integridade superficial.

## Referências bibliográficas

Bellows G, Low stress grinding for quality production, second edition, MDA 83, 1983, 117p.

Bianchi, E. C. Ação da geometria teórico do cavaco no desgaste de rebolos de CBN com ligante Resinóide, São Carlos, EESC, USP, tese de Doutorado, 1992.

Bianchi E. C. et al., A contribuição de rebolos superabrasivos com ligantes resinóides e vitrificado, Máquinas e Metais, março de 1999, 25 p.

Bianchi E. C. et al., A contribuição dos rebolos de CBN para a melhoria da competitividade e qualidade, Máquinas e Metais, abril de 2001, 27p.

Bianchi E. C. et al., Comportamento entre rebolos superabrasivos e convencionais, Máquinas e Metais, abril de 2002, 27 p.

Bianchi E. C. et al., Atuando sobre os parâmetros de entrada na retificação de aços frágeis e ductéis, Máquinas e Metais agosto de 1997, 22p.

Bianchi E. C. et al., Como e quanto lubrificar e refrigerar no processo de retificação, Máquinas e Metais, Agosto de 2001, 11p.

Bianchi E. C., Oliveira J. F. G., Controle da geometria do cavaco gerado por rebolos de CBN, Máquinas e Metais , Julho de 1993

Büthe et al., Double disc CBN grinding of piston rings, Metal working, 1992, 4p.

Cullity, Elements of X-Ray Diffraction , second edition 1978, 555p.

Carius, Super-revestimentos para superabrasivos, Máquinas e Metais, abril de 1999, 9p.

Cohen J. B. et al., Residual Stress Measurement by Diffraction and interpretation, 1987, p.47 – 73.

Cohen J. B., Residual stress measurement by X-ray diffraction , SAE handbook, J784a, Society of Automotive Engineers, 1971.

Coelho R. T., Silva Jr. C. E., Dressagem de rebolos para aplicações de precisão, Máquinas & Metais, outubro de 1998.

Diniz A. E., Marcondes F. C., Coppini N. L., Tecnologia da usinagem dos materiais, 1ª edição, 1999, 242p.

Diniz A. E. , Tópicos em processos de fabricação – Retificação, apostila de Curso de Pós - Graduação, Unicamp, 1996.

Damasceno, Análise das Tensões Residuais após Torneamento e Retificação do aço ABNT 52100 endurecido, Campinas, UNICAMP, 1993, Dissertação de Mestrado.

Diamante RVG: - Superabrasivos – Produtos para retifica. GE Company USA, 1998, p.41.

Felipe J. Jr., Contribuição para implementação de funções inteligentes (RI) utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústicas, São Carlos, EESC USP, 1996, Tese de doutorado.

Green, R.G., Grinding machine innovation boost productivity. Tooling and Production, 50 (7), October 1984.

GE Company USA, Borazon CBN: - Superabrasives – Produtos para Retífica, 1998, p 14.

Hitchiner M., O emprego da alta velocidade com rebolos de CBN, Máquinas e Metais, setembro de 2001, 17p.

Hahn, R, S, & Lindsay, R.P., The wheel removal parameter. Principles of grinding. Machinery: 33 – 39, setembro, 1971. Parte III.

Krur S. F., Ratterman E., Superabrasives, Grinding and machining with CBN and Diamond, MC Graw-Hill, Inc., USA, 1990, 196p.

Klocke, F., König, W.: Appropriate conditioning strategies increase the performance capability of vitrified-bond CBN, grinding wheels. Annals of the CIRP vol. 44/1/, 1995, p 305 – 310.

Keeg, R. L., Industrial problems in grinding. In: Annals of the CIRP, 32/2, 1983, p559 – 561.

König, W., Tecnologia de fabricação: retificação , brunimento e lapidação. Tradução Weingaertner, W.L., VDI Verlag, Dusseldorf, Alemanha 1980.

König, W., Klinger, M., Link, R., Machining hard materials with geometrically defined cutting edges – Field of application and limitations. Annals of the CIRP, 39/1, 1990, p61-64.

Konig, W., Komanduri, R., Tonsshoff, H.K., Ackersshott, G., Machining of Hard Materials, Annals of the CIRP, 39/2, 1990, p417 – 427.

Konig, W, Berktold, A., Koch, K. F., Turning versus grinding – A comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies. Annals of the CIRP, 42/1, 1993, p39 – 43.

Lindsay, R.P., The effect of contact time on forces, weelwear rate and G – ratio during internal and external grinding. In: Annals of the CIRP, 33/1, 1984, p. 193 – 197.

Lucca D. A., Brinksmeier E. and Goch G., Progress in assessing surface and subsurface integrity. Annals of the CIRP Vol. 47/2/, 1998.

Montgomery, DC: Design and Analysis of Experiments. New York: Georgia Institute of Technology, 1984.

Malkin, S.: Grinding mechanism e grinding temperatures and thermal damage. In: Malkin, S. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives 1<sup>a</sup> edition, Chichester, Ellis, Horwood limited, 1989, p. 108 – 171.

Malkin, S.: Grinding technology theory and applications of machining with abrasives. Ellis Horwood Limited Chichester, 1989.

Machado, A. R. e Silva, M. B. Usinagem dos Metais. Editora da Universidade Federal de Uberlandia, 1998, 172p.

Montgomery, D. C., Design and analysis of experiments. New York: Georgia Institute of technology, 1984.

Nishiyama, Z. – Martensitic Transformation Acad. Press, 1978.

Nelson D.V.; Rickers, R. E.; Evans W. P. Residual stresses in quenched and tempered plain carbon steel – SAE tech. paper series (710243): 1 – 9, 1971.

Noyan I. C, Croyen J. B., Residual stress measurement by diffraction and interpretation, 1987, 275p.

Nussbaum G. C., Rebolos & abrasivos tecnologia básica volume 1, 1988, 97p.

Oliveira J. F. G. Soares D. D., Meireles G. S. C. Monitoramento e otimização no chão de fábrica via diagnóstico remoto, Máquinas e Metais, setembro de 2000, 15p.

Ogawa K., Optimum Truing and Dressing of CBN Wheels and Grinding Characteristics of CBN Wheels, Noritake Company, 2000.

Oliveira, J.F.G.: Monitoramento de operações de retificação de precisão, São Carlos, EESC, USP, tese apresentado em concurso para professor titular, 1995.

Oliveira, J. F. G. Tópicos avançados sobre o processo de retificação, EESC, São Carlos, 1989.

Regone N. N. Determinação da tensão interna em camadas superficiais, Campinas, UNICAM, Fevereiro de 2000, Dissertação de mestrado.

Shaw, M. –Heat Affected Zone in Grinding Steel. Annals of the CIRP, v 43/1, 1994, p 279 – 282.

Schneider, C. A – Flesch C. A : Técnica de pesquisa experimental. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Santa Catarina, 1982.

Subramanian K. The system approach for Industrial processes. A strategy to survive and succeed in the global economy. A technology awareness presentation. Higgins Grinding Technology Center, Saint Gobain Abrasives, São Paulo, Brazil, september, 1999.

Surface Texture (surface roughness) Waviness and Lay ”, ASME B. 46.1 – 1995, American Society of Mechanical Engineers, 1985.

Vieira M. Jr. Metodologia para determinações das condições de usinagem e de operação na processo de retificação. EESC, USP, São Carlos Dissertação de mestrado, 1992.

Vieira Jr. M. , Libardi R., Cancilieri H. A, Lima A., - Como o calor pode afetar a integridade de superficial das peças, Máquinas e Metais, Fevereiro de 1999, 8p.

Xu, H. H. K., Wei, L., Jahanmir, S., 1996, Influence of Grain size on the Grinding response of alumina ., Journal of the American Ceramic society 79: 1307 – 1313.

Woodard R. L., American machinist, february 1997, 5p.