

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL D  
TESE DEFENDIDA POR RENATO DEDINI  
COMISSÃO JULGADORA EM 19.04.2000

ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Otimização de um ciclo de retificação  
cilíndrica de mergulho de virabrequins na  
produção.**

Autor: Renato Dedini

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

55/00

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE**  
**PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**

**Otimização de um ciclo de retificação  
cilíndrica de mergulho de virabrequins na  
produção.**

Autor: Renato Dedini

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

Curso: Engenharia mecânica

Área de concentração: Processos de fabricação

Dissertação de mestrado apresentada à Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2000  
S.P. - Brasil

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE



1. CHAMADA:  
 T/UNICAMP  
 19.36.8  
 / Ex.  
 OMBO BC/ 42660  
 ROC. 16/278/00  
 C ☐ D ☒  
 PREC. R\$ 11,00  
 DATA 11/10/00  
 V. CPD

CM-00146930-2

3113 ID 276965

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
 BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D36o

Dedini, Renato

Otimização de um ciclo de retificação cilíndrica de  
 mergulho de virabrequins na produção / Renato  
 Dedini. --Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Otimização matemática. 2. Retificação e  
 polimento. 3. Processos de fabricação. 4. Controle de  
 processo. 5. Qualidade dos produtos. I. Diniz,  
 Anselmo Eduardo. II. Universidade Estadual de  
 Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.  
 Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

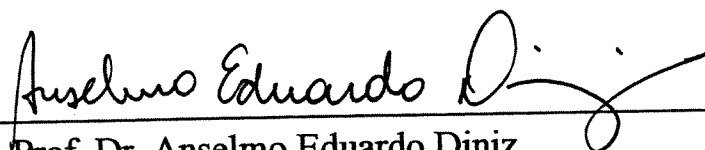
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE**  
**PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

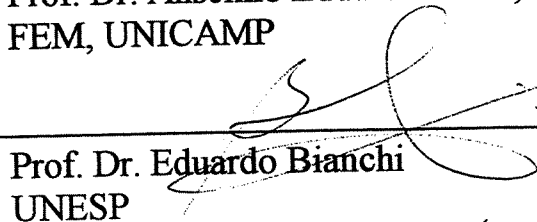
**Otimização de um ciclo de retificação  
cilíndrica de mergulho de virabrequins na  
produção.**

Autor: Renato Dedini

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz,  
FEM, UNICAMP



Prof. Dr. Eduardo Bianchi  
UNESP



Prof. Dr. Olívio Novaski  
FEM, UNICAMP

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

Campinas, 19 de Abril de 2000

## **Dedicatória**

Dedico esta trabalho à minha família, que sempre me incentivou para a conclusão deste trabalho.

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ter sido concluído sem a ajuda de diversas pessoas, às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais, que sempre me incentivaram;

Ao meu orientador, que me mostrou o caminho;

À Ford Motor Company, que permitiu a realização dos testes em ambiente produtivo.

# RESUMO

Dedini, Renato, “Otimização de um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho de virabrequins na produção”; Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000, 90 p. Dissertação (Mestrado)

O processo de retificação tem larga utilização na indústria automobilística, principalmente na usinagem de componentes de motores, que demandam por alta qualidade dimensional. Normalmente as máquinas de retificação são máquinas chave nas linhas de usinagem e, por representarem altos investimentos, em grande parte dos casos acabam se tornando o gargalo da linha, ou seja, a operação com maior tempo de ciclo. No caso específico deste trabalho estará sendo estudada uma operação de retificação de mancais de virabrequins de motores comerciais de 4 cilindros, cujo tempo de ciclo é um dos maiores da linha.

A redução no tempo de ciclo desta operação será conseguida através da otimização das velocidades de avanço de corte e da operação de dressagem, sem prejuízo à qualidade final da peça. Os experimentos foram feitos em ambiente de produção e os valores de qualidade dimensional avaliados foram os erros de circularidade e rugosidade.

Os resultados mostraram que a otimização do ciclo de retificação em ambiente produtivo pode trazer grandes vantagens com relação ao tempo de ciclo da operação e muitas vezes com consequências na capacidade produtiva de toda a linha de usinagem, com investimento próximo de zero. Com relação à operação de dressagem, os resultados foram positivos quanto à possibilidade de otimizações, no que se refere aos passos de dressagem, tendo logicamente como limitador a rugosidade resultante na peça, pois não houve grande influência dos parâmetros de dressagem nos resultados de circularidade e diâmetro.

*Palavras chave:* otimização, retificação, produção, qualidade.

# ABSTRACT

Dedini, Renato, "Optimization of one crankshaft plunge cylindrical grinding operation in the production environment", Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000, 90 p., (Dissertação (Mestrado))

The grinding process is being largely used in the automobile industry, mainly in the machining of engine components, that require high dimensional quality. Normally the grinding machines are key machines in the machining lines and, due to represent high investments, in most of the cases they are the line bottleneck, that means they are the operation with the highest cycle time. In the specific case of this study it will be studied a grinding operation performed in the main journals of 4 cylinders engine crankshafts, whose cycle time is one of the highests in this line.

The cycle time reduction in this operation will be achieved by the optimization of the cutting feed rates and the dressing operation, without damaging the final quality of the part. All tests were processed in production environment and the quality results evaluated were the out of roundness and roughness characteristics.

The results showed that the optimization of the grinding cycle in industrial environment can bring great advantages regarding the operation cycle time and frequently with consequences in the production capacity of the whole line, with investments close to zero. Regarding the dressing operation, the optimization possibilities had positive results, mainly regarding to the dressing feed and, of course, the roughness resulted in the part was the limit, because there was no great influence of the dressing parameters in the out of roundness results.

*Key words:* optimization, grinding, production, quality.



# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – Introdução</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 – O processo de retificação</b>	<b>3</b>
2.1 – Introdução	3
2.2 – Os abrasivos	4
2.3 – O rebolo	6
2.4 – As máquinas de retificação	14
2.5 – Energia específica	16
2.6 - Mecanismo de formação do cavaco	16
2.7 - Forças de corte	18
2.8 - Potência de corte	23
2.9 - Deformações no sistema máquina-rebolo-peça	24
2.10 - Diagrama do ciclo de retificação	30
2.11 - Operação de dressagem	35
2.12 - Retificação de virabrequins	46
<b>CAPÍTULO 3 - Otimização do ciclo de retificação</b>	<b>49</b>
3.1 – Introdução	49
3.2 – Diminuição de tempos improdutivos	49
3.3 – Minimização do coeficiente $\mu$	52
3.4 – Utilização de sistemas transientes	54

3.5 – Sistemas de monitoramento	56
<b>CAPÍTULO 4 – Otimização de um ciclo de retificação na produção</b>	<b>59</b>
4.1 – Introdução	59
4.2 – Metodologia dos ensaios	60
4.3 – Sumário dos testes realizados	70
4.4 – Resultados e discussões	71
<b>CAPÍTULO 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros</b>	<b>83</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>89</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1 - Similaridade entre a partícula abrasiva e uma esfera	4
2.2 - Diversas durezas de um rebolo	7
2.3 - Estruturas do rebolo	8
2.4 - Tamanhos de grãos	9
2.5 - A ação do tamanho de grão na retificação	9
2.6 - Desgaste do rebolo (G) x heq	13
2.7 - O mecanismo de formação de cavaco	17
2.8 - Força de corte x profundidade de corte	20
2.9 - Forças na retificação	23
2.10 - Deformações no sistema máquina-rebolo-peça	25
2.11 - Sistemas com valores grande e pequeno de $\mu$	27
2.12 - Penetração do rebolo numa operação de mergulho	28
2.13 - Remoção de material para vários valores de $\mu$	29
2.14 - Curva avanço x tempo na retificação	30
2.15 - Remoção de material no centelhamento	32
2.16 - Potência x profundidade de corte no centelhamento	33
2.17 - Rugosidade x profundidade de corte no centelhamento	34
2.18 - Ciclo de retificação com medição em processo	34
2.19 - Entradas e saídas no processo de retificação	36
2.20 - Força de corte x volume de material removido na dressagem	38
2.21 - Contato entre dressador e rebolo	39
2.22 - Força de corte e rugosidade x grau de recobrimento	40
2.23 - Topografia do rebolo x grau de recobrimento	41
3.1 - Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho	50
3.2 - Otimização do avanço de aproximação	51
3.3 - Influência de $\mu$ no tempo de retificação	52
3.4 - Ciclo de retificação com centelhamento acelerado	55
4.1 - Operação de retificação de mancais de virabrequim	61
4.2 - Ciclo de retificação em estudo	64
4.3 - Rugosidade x número de peças retificadas	71
4.4 - Circularidade x número de peças retificadas	72
4.5 - Gráficos do teste 1	74
4.6 - Rugosidade x número de peças retificadas	74
4.7 - Circularidade x número de peças retificadas	75
4.8 - Gráficos do teste 2	76
4.9 - Rugosidade x número de peças retificadas	77
4.10 - Circularidade x número de peças retificadas	77
4.11 - Rugosidade x número de peças retificadas	78
4.12 - Circularidade x número de peças retificadas	79

## **LISTA DE TABELAS**

2.1 - Propriedade dos abrasivos	5
2.2 - Valores de $H'$ e $S'$ para vários tamanhos de grão	21
2.3 - Influência do macro e micro efeito na agressividade do rebolo	42

# NOMENCLATURA

A	- Relação entre as constantes de Hahn e Tlustý
$A_s$	- Área real de contato dos grãos
A	- Profundidade de corte
$A_d$	- Profundidade de dressagem
b	- Largura do rebolo
$b_d$	- Largura de atuação do dressador
$b_{dr}$	- Largura real de atuação do dressador
d	- Diâmetro médio do grão abrasivo
$D_e$	- Diâmetro equivalente
$D_w$	- Diâmetro da peça
$F'_n$	- Força normal
$F'_{no}$	- Força normal no início do corte
G	- Parâmetro de desgaste do rebolo
$h_{eq}$	- Espessura de corte equivalente
$h_m$	- Espessura de cavaco médio
$K_a$	- Elasticidade no contato rebolo/peça
$K_e$	- Elasticidade efetiva do sistema máquina/rebolo/peça
$K_m$	- Elasticidade da máquina
$K_s$	- Elasticidade do rebolo/máquina
$K_w$	- Elasticidade da peça/máquina
P	- Potência de retificação
$P'_{ch}$	- Potência na formação do cavaco
$P'_{pl}$	- Potência de riscamento
$P'_{sl}$	- Potência de atrito entre peça e rebolo
R	- Constante de proporcionalidade
$r_p$	- Raio de ponta do dressador
S	- Número de tela
$S_d$	- Passo de dressagem
$V_f$	- Velocidade de avanço
$V_w$	- Velocidade periférica da peça
$V_s$	- Velocidade periférica do rebolo
U	- Energia específica
$Z_w$	- Volume de material removido
$Z_s$	- Volume de rebolo desgastado
$Z_w'$	- Volume de material removido por unidade de largura
$W_t$	- Ondulação teórica
$U_d$	- Grau de recobrimento
$U_m$	- Declividade de retorno do rebolo
$u_l$	- Declividade de avanço do rebolo

- $y$  - Parcela deformada do sistema
- $\lambda_w$  - Constante
- $\varepsilon$  - Deformação do sistema máquina/rebolo/peça
- $\mu$  - Constante de rigidez do sistema máquina/rebolo/peça

# Capítulo 1 - Introdução

O processo de retificação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria moderna e normalmente é onde se consegue o acabamento especificado para a produção de uma peça. Devido ao tipo de ferramenta utilizada (rebolo) que possui uma infinidade de grãos abrasivos e, portanto, múltiplas arestas de corte, este processo tem uma complexidade maior que os demais processos de usinagem.

Devido à sua complexidade e ao nível de qualidade requerido, os sistemas de retificação são bastante dispendiosos e em linhas de produção muitas vezes se tornam os gargalos das linhas e é, portanto, de grande interesse que se minimize o tempo de ciclo de uma operação de retificação.

Existem algumas diretrizes de como se conseguir otimização do tempo de ciclo, porém cada caso apresenta suas peculiaridades e, portanto, nem sempre é possível seguir uma diretriz e obter sucesso. As diretrizes mais simples para se conseguir otimizar o tempo de ciclo são a diminuição dos tempos improdutivos, onde não há remoção de cavaco, e a melhoria na rigidez do sistema, através da otimização do processo abrasivo. Neste segundo ponto entra a operação de dressagem que gera a agressividade do rebolo e influi diretamente nas forças de corte alterando portanto, a qualidade da peça. Outra maneira de se reduzir tempo de ciclo, já em utilização hoje, são os sistemas transientes, onde são inclusos os ciclos com centelhamento acelerado; porém são maneiras mais complexas de reduzir o tempo de ciclo, que normalmente são auxiliadas por sistemas de monitoramento.

Este trabalho tem por objetivo:

- Estudar a operação de retificação, o rebolo, o ciclo de retificação, a operação de dressagem, a retificação de virabrequins, além de conhecer possíveis métodos de otimização.
- Evidenciar os resultados de otimização obtidos através da variação dos diversos avanços e sobremetais utilizados em um ciclo.
- Propor novas oportunidades de otimizações, viáveis de aplicação em ambiente produtivo, sem dispêndio de recursos financeiros.

O trabalho foi dividido nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1: Introdução
- Capítulo 2: O processo de retificação – Neste capítulo procura-se descrever os princípios do processo de retificação, os parâmetros que o envolvem, o diagrama de ciclo e a operação de dressagem.
- Capítulo 3: Otimização do ciclo de retificação – Aqui são descritas algumas diretrizes possíveis de serem utilizadas na otimização do ciclo de retificação
- Capítulo 4: Otimização de um ciclo de retificação na produção – Aqui analisa-se o comportamento de um ciclo de retificação industrial antes e após a otimização das velocidades de avanço e sobremetais programados.
- Capítulo 5: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros – Neste capítulo são apresentadas as conclusões relativas aos testes feitos no capítulo 4 e sugestões para trabalhos futuros.



## **Capítulo 2 – O processo de retificação**

### **2.1) – Introdução**

A retificação é um dos processos de usinagem que usam abrasivos como meio de retirada de material e está envolvido em 20 a 25% de todos os processos de usinagem usados atualmente, pois além de seu uso como um processo particular de usinagem é largamente usado na afiação de ferramentas aplicadas em outros processos de usinagem como torneamento, furação, fresamento etc. (Malkin, 1989).

O processo de retificação de precisão é o mais utilizado pela indústria metalmeccânica para a obtenção de altos níveis de qualidades geométricas, dimensionais e superficiais em lotes de peças. Entretanto, é também o menos dominado e conhecido dos processos de fabricação, ficando o seu desempenho extremamente dependente da habilidade e experiência do operador. Esta grande dependência da mão-de-obra hábil e experiente é mais crítica na produção de pequenos e médios lotes onde as frequentes mudanças nas condições de usinagem exigem montagens previsíveis, rápidas e corretas.

Devido à multiplicidade das arestas de corte e sua geometria irregular, às altas velocidades e pequenas profundidades de corte, que variam de grão para grão, os estudos no campo da retificação tem sido poucos e difíceis. Tem sido considerado nos estudos um grão médio, o que facilita as análises e interpretações das últimas descobertas.

Poucos são os engenheiros capazes de solucionar problemas críticos que ocorrem no dia-a-dia da retificação e os dados e resultados obtidos em trabalhos científicos normalmente não tem muita aplicabilidade dentro de uma indústria.

Com as tendências modernas da indústria de bens de consumo de trabalhar com grandes diversificações em baixos e médios lotes, baixo inventário em processo e altos níveis de automação, as operações de retificação tem se tornado o gargalo da produção em diversas situações. Na retificação de pequenos lotes, o tempo para se fazer o ajuste dos parâmetros de usinagem e obter-se a primeira peça aceitável é normalmente maior que o tempo para a produção de todo o lote. Neste caso as montagens são feitas por tentativas e seu sucesso depende fundamentalmente da habilidade e talento de um operador experiente (Greem, 1984).

## 2.2) - Os abrasivos

As partículas abrasivas são blocos de cristais que de uma certa forma parecem com uma esfera com muitas arestas de corte. Na figura 2.1 é ilustrada esta comparação:

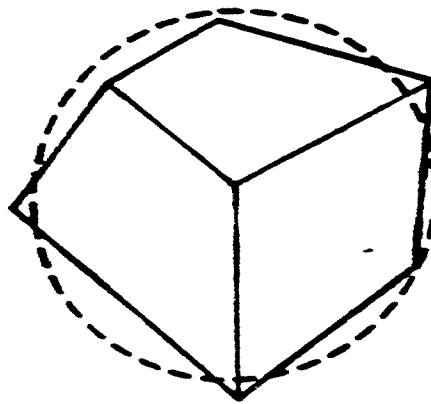


Fig. 2.1: A similaridade entre um bloco de partícula abrasiva e uma esfera (Shaw, 1996)

O tamanho de um grão abrasivo é expresso em termos do número de tela S, que corresponde ao número de aberturas por polegada quadrada em uma tela.

A história da retificação começou com a descoberta dos materiais abrasivos e tem continuado com o desenvolvimento de novos produtos abrasivos e máquinas ferramenta para satisfazer as necessidades do homem na manufatura.

Os principais materiais utilizados como grãos abrasivos são: o óxido de alumínio, o carbeto de silício, o diamante e o CBN (nitreto cúbico de boro). A tabela 2.1 apresenta um comparativo entre algumas propriedades dos abrasivos mais conhecidos usados comercialmente.

	<b>Óxido de Alumínio</b>	<b>Carboneto de Silício</b>	<b>Nitreto Cúbico de Boro</b>	<b>Diamante</b>
<b>Estrutura Cristalina</b>	<b>Hexagonal</b>	<b>Hexagonal</b>	<b>Cúbica</b>	<b>Cúbica</b>
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>3.98</b>	<b>3.22</b>	<b>3.48</b>	<b>3.52</b>
<b>Ponto de Fusão (°C)</b>	<b>2040</b>	<b>~2830</b>	<b>~3200 a 105 kbar</b>	<b>~3700 a 130 kbar</b>
<b>Dureza Knoop (kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>2100</b>	<b>2400</b>	<b>4700</b>	<b>8000</b>

Tab. 2.1: Tabela comparativa das propriedades dos abrasivos (Diniz, 1995)

## **2.3) – O Rebolo**

### **2.3.1) – Definição**

Os rebolos são corpos de revolução que consistem de partículas abrasivas, elementos ligantes e poros. Os elementos ligantes mantêm as partículas abrasivas presas ao rebolo, enquanto os poros garantem espaço aos cavacos e fluido. Aumentando-se a quantidade de liga aumenta-se a força de ligação, porém se diminui a quantidade de poros. A força necessária para a remoção de um grão aumenta com o aumento da quantidade de liga (Shaw, 1996).

A origem do rebolo vem do Egito junto com o início da metalurgia. Inicialmente era rotacionado manualmente e possuía abrasivos de esmeril presos em uma superfície de madeira e sebo (Malkin, 1989).

### **2.3.2) – Especificações do rebolo**

#### **2.3.2.1) – Dureza**

A dureza do rebolo representa o grau de coesão entre liga e grãos abrasivos. O grau do rebolo (as vezes chamado de dureza) aumenta com a quantidade de liga e é designado por uma letra do alfabeto como segue :

Rebolo mole – E,F,G,H,I

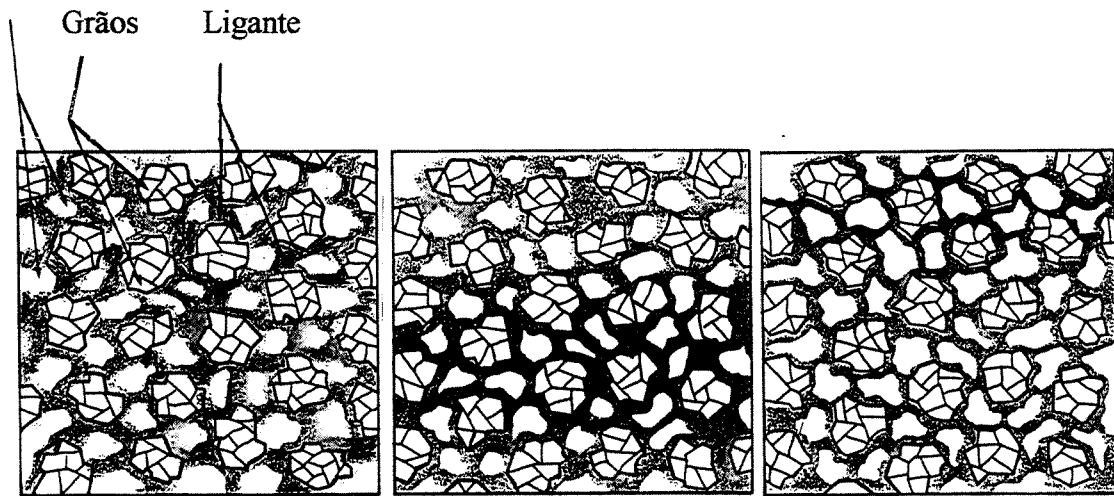
Rebolo médio – J,K,L,M

Rebolo duro – N,O,P,Q,R

Rebolo muito duro - S,T,U,V (Catálogo Norton, 1991)

As figuras 2.2 A,B,C mostram os diversos graus de dureza de acordo com a quantidade de ligante no rebolo:

Poros



A) Duro (muito ligante)

B) Médio

C) Mole (pouco ligante)

Fig. 2.2: Diversas durezas de um rebolo (Catálogo Norton, 1991)

#### 2.3.2.2) – Tipo de ligante

Existem muitos tipos de materiais ligantes, designados por uma letra:

V- liga de material vitrificado

B- liga de material resinóide

R- liga de borracha natural ou sintética

E- shellac

M- liga metálica

#### 2.3.2.3) - Estrutura

O número de estrutura é uma medida do volume e tamanho dos poros, que é muito importante no que se refere à acomodação do cavaco. A classificação é:

Pequenos – 1,2,3,4

Regular – 5,6,7

Largos- 8,9,10

Muito largos – 11,12,13,14

As figuras 2.3 A,B,C mostram 3 estruturas diferentes de rebolos, de acordo com a densidade dos grãos:

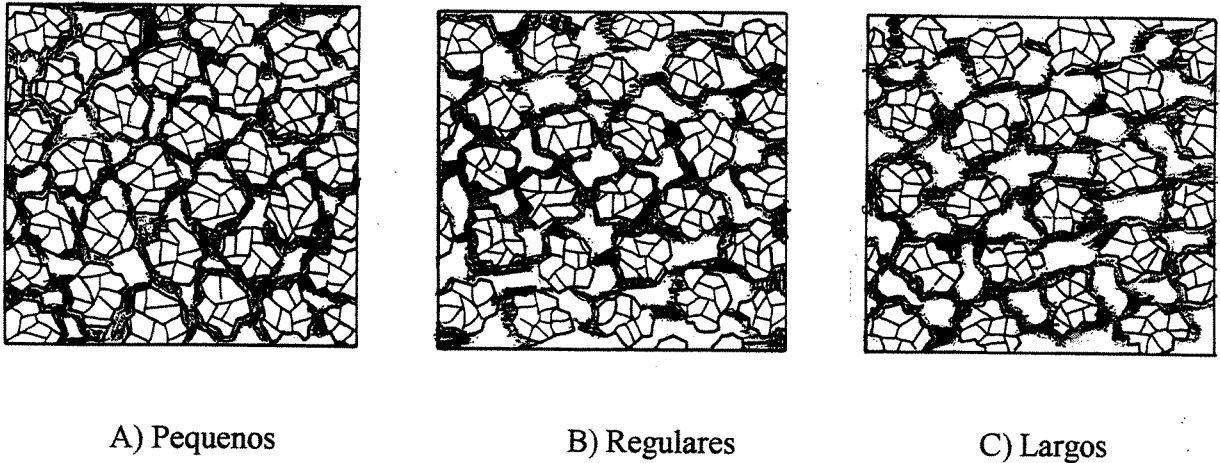


Fig. 2.3: Estruturas do reboło (Catálogo Norton, 1991)

#### **2.3.2.4) – Tamanho dos grãos**

O tamanho do grão é designado pelo número S, como segue:

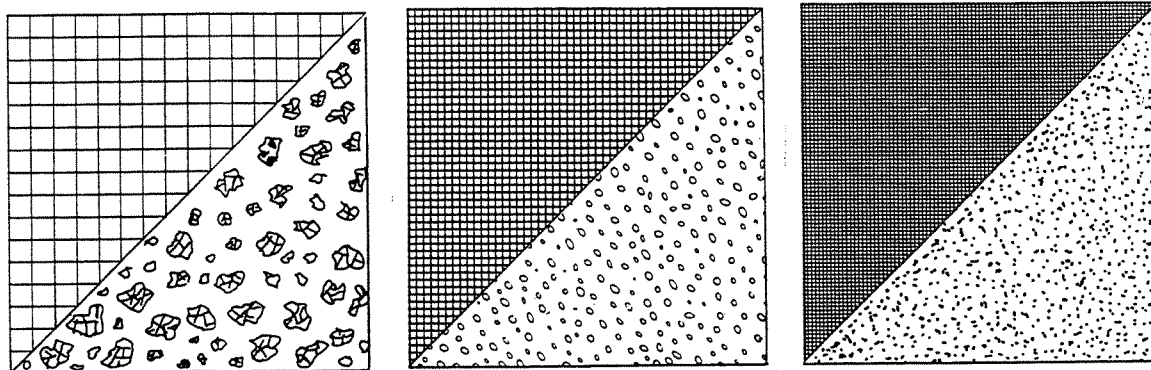
Grosso – 8,12,20,24,36

Médio – 46,54,60,80,100,120

Fino – 150,180,240,280

Muito fino – 320,400,600

O tamanho dos grãos está relacionado com o número de tela S, ou seja, o número de aberturas por polegada linear. Um grão com número 30 passará por uma tela com 27 aberturas em uma polegada linear mas não passará em uma tela com 33 aberturas por polegada linear, conforme mostrado nas figuras 2.4 A,B,C:



A) Grão grosso

B) Grão médio

C) Grão fino

Fig. 2.4: Tamanhos de grão com respectivas telas (Baril, 1987)

Uma relação básica entre os diferentes tipos de grãos e os materiais cortados por eles está mostrado na figura 2.5 A,B,C:

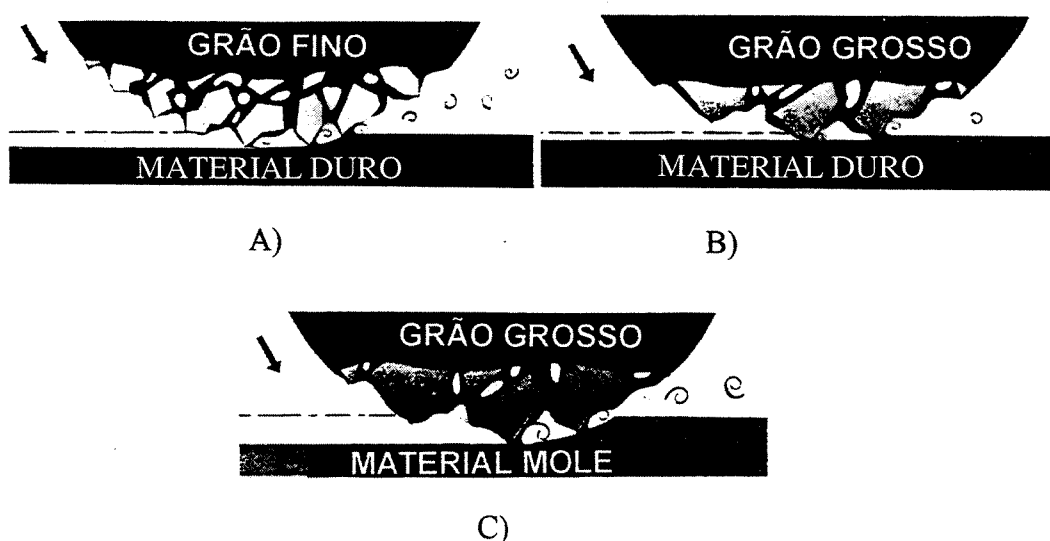


Fig. 2.5: A ação do tamanho de grão em vários materiais (Baril, 1987)

Conforme mostrado na figura 2.5 A, devido ao menor tamanho dos grãos há uma maior quantidade de arestas cortantes em contato com a peça, o que no caso da retificação de materiais duros é vantagem em relação aos grãos grossos (fig. 2.5 B), que não conseguem maiores penetrações nestes materiais, sem provocar queimas. Nos materiais moles os grãos maiores penetram mais facilmente no material e ainda garantem o espaçamento necessário para se minimizar o empastamento do rebolo devido ao acúmulo de cavacos entre os grãos.

#### **2.3.2.5) – Tipos de grãos**

O tipo de grão é designado por uma letra, como segue:

A – predominantemente alumina

B – nitreto cúbico de boro

C – predominantemente carbeto de silício

D – diamante

#### **2.3.2.6) – Sistema de identificação**

Um sistema universal de identificação é usado para reunir toda esta informação de uma maneira compacta, como segue no exemplo abaixo:

**WA 46 K 8 V XX**

Onde:

WA – tipo de grão

46 – tamanho de grão

K – dureza do rebolo

8 – estrutura

V – liga

XX – símbolo do fabricante

O tamanho de um rebolo normalmente é especificado dando-se as seguintes dimensões na ordem indicada:

**Diâmetro externo**

**Espessura**

**Diâmetro do furo**

Um rebolo vitrificado típico como aquele especificado acima contém normalmente as seguintes porcentagens:

50% abrasivos

10% liga

40% poros



Normalmente os rebolos resinóides contém uma quantidade de poros menor que os rebolos vitrificados e isto é importante para operações de desbaste, que operam em velocidades de corte altas e, portanto, sujeitas a forças centrífugas maiores (Diniz, 1995). Como os rebolos resinóides e metálicos tem poucos poros para acomodação de cavacos existem métodos para criação de poros por erosão da liga entre grão ativos. Estes tratamentos de criação de porosidades para acomodação de cavacos normalmente se chama condicionamento e é um processo especial de dressagem. Não é requerido para ligas vitrificadas devido ao grande número de poros existentes nestes rebolos. A profundidade máxima do grão exposta após o condicionamento não deve exceder 30% do diâmetro do grão, pois além deste valor existe perigo do desprendimento destes grãos devido à força de retenção insuficiente do ligante sobre o grão.

Altas velocidades de corte podem melhorar produtividade, vida do rebolo, acabamento superficial e precisão. Entretanto, para se poder utilizar altas velocidades de corte, duas condições devem ser satisfeitas: os rebolos devem ser capazes de operar a altas velocidades de corte e as máquinas, onde estes rebolos serão usados, devem também ser capazes de operar a altas velocidades de corte. Isto não é somente uma questão de trocar a polia da máquina para se aumentar a velocidade, mas a máquina deve ser provida de potência para rotacionar o rebolo a altas velocidades e deve ter rigidez para tais velocidades.

### **2.3.3) - Desgaste do rebolo**

Existem dois fenômenos distintos de desgaste do rebolo: o desgaste volumétrico e a perda de afiação. O desgaste volumétrico se refere à perda volumétrica do rebolo durante o ciclo de retificação. A perda de afiação é relativa ao arredondamento das arestas cortantes e/ou entupimento dos poros do rebolo. Um rebolo pode sofrer desgaste volumétrico sem perder a afiação e vice-versa. Quando um grão sofre o atrito inerente ao processo, ele pode se fraturar e depois se desprender do rebolo, causando o desgaste volumétrico, ou simplesmente ter suas arestas arredondadas, e portanto perder a afiação. A ocorrência de um ou outro fenômeno depende da dureza do rebolo, dos parâmetros de retificação e das propriedades da peça. Em um rebolo duro, que tem alto grau de coesão entre liga e grãos, é mais difícil o grão se desprender e,

então, tem-se maior tendência de perda de afiação. Já em um rebolo mole o desgaste volumétrico é proeminente (Diniz, 1995).

Os limitantes da vida do rebolo são:

**Integridade superficial da peça** – A perda de agressividade do rebolo aumenta a temperatura de contato peça/rebolo e pode provocar o aparecimento de queimas ou trincas na peça.

**Erros de forma** – Com o desgaste do rebolo podem aparecer erros de forma como desvios de circularidade e retilíneidade.

**Vibração** – O aumento da força de corte devido à perda de afiação aumenta a possibilidade de vibração, como também os diferentes desgastes na superfície de corte do rebolo devido a erros de fabricação.

**Acabamento superficial da peça** – A perda de agressividade (afiação) leva ao aumento de temperatura e, portanto, maior escoamento do material durante a passagem do grão abrasivo. Isto aumenta a rugosidade superficial da peça.

**Forças demasiadamente elevadas** – Podem provocar a parada do equipamento por ultrapassar os limites estabelecidos no controlador de potência do motor, ou algum outro sistema de monitoramento de forças (Diniz, 1995).

O parâmetro  $G$  foi definido por Hahn em 1971 e expressa a relação entre o volume de material usinado e o volume de rebolo desgastado:

$$G = Z_w / Z_s \quad (2.1)$$

Onde :  $Z_w$  = volume de material usinado

$Z_s$  = volume de rebolo desgastado

O desgaste do rebolo é relacionado diretamente com a força normal de corte. Há uma grande variação no desgaste do rebolo de acordo com a variação da espessura de corte equivalente ( $h_{eq}$ ), conforme mostrado na figura 2.6. A espessura de corte equivalente ( $h_{eq}$ ) é dada pela expressão 2.2:

$$h_{eq} = a \cdot V_w / V_s \text{ (mm.)} \quad (2.2)$$

Onde :  $a$  = Profundidade de corte

$V_w$  = Velocidade periférica da peça

$V_s$  = Velocidade periférica do rebolo

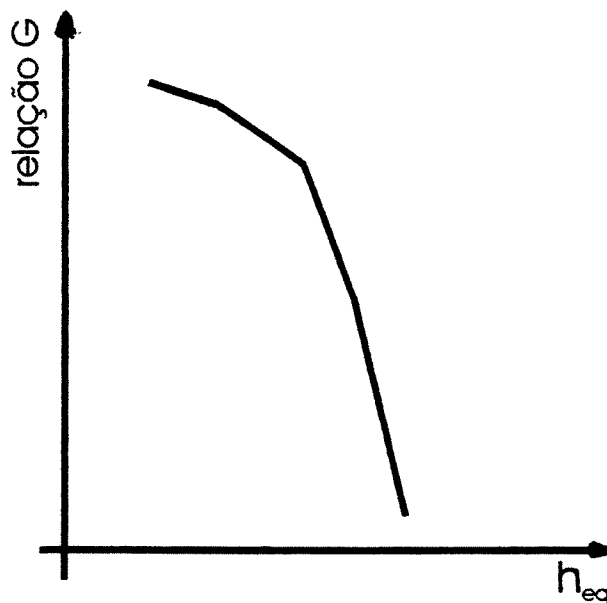


Fig. 2.6: Variação do desgaste do rebolo (G) x  $h_{eq}$  (Oliveira, 1989)

Há uma tendência mundial em se aumentar a velocidade periférica do rebolo, o que diminui o  $h_{eq}$  e, portanto, a quantidade de material que cada grão deve remover. Apesar de muitos estudos estarem procurando otimizar a taxa de desgaste do rebolo para valores ideais, é importante se conhecer o desgaste do rebolo durante a usinagem, para se corrigir a posição do eixo árvore e evitar a medição em processo da peça.

O desgaste de partículas abrasivas individuais é um fenômeno mecânico (atrito), envolvendo remoção de partículas muito pequenas e formação de microcavacos de um lado e desgaste químico por outro (difusão). Há também interações entre estes dois tipos de desgaste. Adicionalmente, há também o descolamento do grão devido a uma falha no ligante, que também contribui para o desgaste do rebolo como um todo. Os aspectos químicos do desgaste envolvem afinidade do par partícula abrasiva – peça, temperatura, pressão e tempo de contato.

## **2.4) - As máquinas de retificação**

Os primeiros conceitos de máquinas de retificação aparecem em desenhos de Leonardo da Vinci, datando da época de 1500, sendo que algumas de suas máquinas foram desenhadas para operar de uma central de potência, presumidamente de uma roda de água. A primeira máquina para retificação de superfícies externas com velocidades de 5 a 10 m/s foi montada em 1872 (Malkin, 1989).

O desenvolvimento das máquinas de retificação foi grande neste século, como também o processo de retificação. Atualmente, as máquinas para retificação usam controles numéricos computadorizados (CNC), os cabeçotes porta rebolos são movimentados através de fusos de esferas servo motorizados e mais recentemente tem sido desenvolvido o sistema de movimentação por motores lineares, que proporcionam um aumento muito grande na velocidade de avanço, que atingem velocidades de até 80 m/min. Tem sido estudados protótipos de máquinas de retificação com velocidades periféricas do rebolo próximas a 250 m/s (Aronson, 1997).

Os mancais do eixo porta rebolos e das placas porta peças, além das guias no barramento são hidrostáticos, o que proporciona um desgaste menor nas buchas dos mancais com consequente melhoria na precisão da peça retificada. Além destas evoluções pode-se destacar também os sistemas de compensação de velocidade periférica do rebolo, sistemas de carga e

descarga automática de peças, sistemas de dressagem CNC que não necessitam cópias, controle da operação por emissão acústica durante o corte etc. (Inasaki, 1998).

Devido ao alto preço das máquinas novas de retificação, é usual na indústria se encontrar um grande número de máquinas reformadas (em torno de 67% das máquinas em utilização) e um dos motivos para isto é que as máquinas novas não tem proporcionado muitas inovações técnicas que compensem os custos e, portanto, os fabricantes de máquinas de retificação tem trabalhado no sentido de introduzir as inovações técnicas porém, com preços competitivos com as máquinas reformadas. Outro ponto marcante no mercado atual é que o cliente não demanda por apenas uma máquina, mas por todo um pacote necessário para a operação de retificação desejada para um determinado produto, incluindo-se a capacidade estatística, sistemas de filtragem, ferramental, flexibilidade para retificação de diversos tipos de peças etc. (Aronson, 1997).

É grande também a utilização de equipamentos com múltiplos rebolos, que faz a retificação de dois ou mais diâmetros simultaneamente, como é o caso de retíficas de mancais e moentes de virabrequins. O objeto de estudo deste trabalho será um equipamento destes, com cinco rebolos retificando simultaneamente os 5 mancais de apoio de um virabrequim para motor 4 cilindros. Este tipo de equipamento é comum em linhas de usinagem de virabrequins e eixos comando de válvulas, onde as vezes são utilizados equipamentos com até 7 rebolos.

No caso específico da retificação dos colos excêntricos de virabrequins e cames de acionamento de válvulas, em eixos comando de válvulas, tem sido de grande aplicação as máquinas com avanço do cabeçote porta reboło sincronizado com o giro da placa, ou seja, a peça é presa em placas pelo seu centro geométrico, ou entre pontas, e o movimento excêntrico dos colos de biela (ou dos cames) que estão sendo retificados é acompanhado pelo cabeçote porta reboło, que se movimenta para frente e para trás (Catálogo Landis, 1996).

## 2.5) - Energia específica

Uma outra maneira de se expressar a energia específica, ou seja, a energia consumida por volume de material removido é dada pela expressão 2.3:

$$U = P / Z_w \quad (\text{Kw/mm}^3) \quad (2.3)$$

onde :

P = Potência de corte

$Z_w$  = Volume de cavaco removido na unidade de tempo =  $V_w.a.b = \pi.D_w.V_f.b$

$D_w$  = Diâmetro da peça

$V_f$  = Velocidade de avanço

b = largura do rebolo

## 2.6) - Mecanismo de formação do cavaco na retificação

O mecanismo de formação do cavaco é formado por três fases: atrito, riscamento e corte. Ao tocar a peça o grão desliza sobre a superfície desta sem cortar, devido à deformação elástica do sistema. Esta é a fase de atrito. Com o aumento da tensão entre o grão e a superfície além do limite elástico, começa a ocorrer a deformação plástica. Esta é a fase do riscamento, onde o material da peça se desloca para a frente e para as laterais do grão. O cavaco só é formado quando o material da peça tem seu limite de ruptura ultrapassado. Esta é a fase de corte (Shaw, 1996). Este processo é ilustrado na figura 2.7, onde são mostradas as três fases do mecanismo de formação do cavaco.

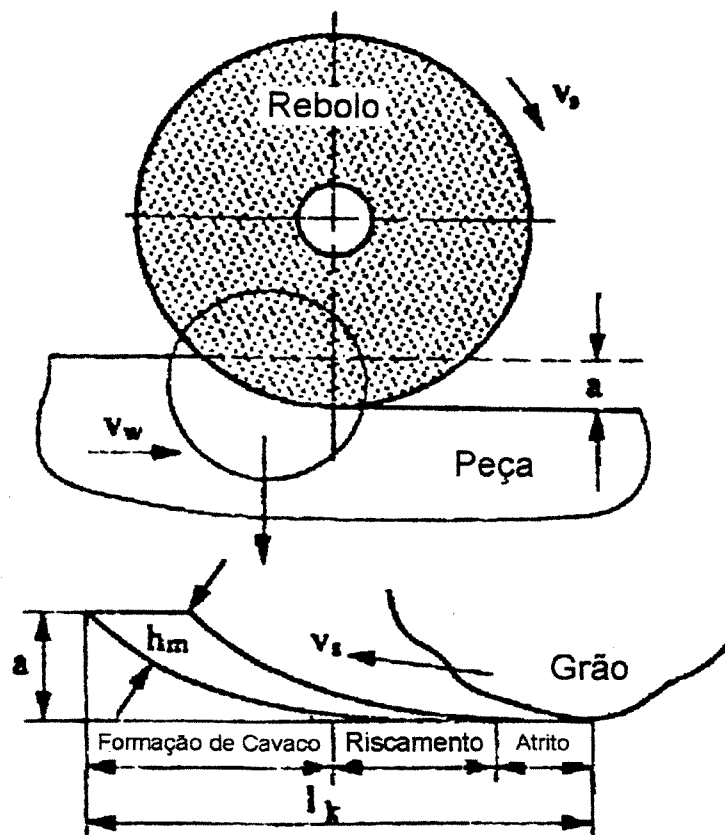


Fig. 2.7: O mecanismo de formação do cavaco na retificação (Xun chen, Rowe, 1996)

Do ponto de vista de consumo de energia necessário para remover material, a fase de corte é a mais eficiente. Atrito e riscamento são ineficientes pois a energia é desperdiçada em deformação e atrito, com baixas contribuições à remoção de material. Além disso, ocasionam o aumento da temperatura, produzindo um excessivo desgaste de rebolo e a superfície da peça pode ser danificada do ponto de vista metalúrgico.

Enquanto há algumas similaridades entre os processos abrasivos e os outros processos de corte, há também importantes diferenças. As velocidades da retificação são no mínimo uma ordem de magnitude maiores e as espessuras de cavacos indeformados são na maioria das vezes duas ordens de magnitude menores. O tamanho de cavaco muito pequeno na retificação é o principal responsável pela energia específica (energia necessária para remover uma unidade de volume de material) ser uma ordem de magnitude maior na retificação. As altas velocidades normalmente envolvidas na retificação junto com os altos valores de energia específica dão valores não usuais de temperaturas tanto na peça como na ferramenta, com consequências

importantes. Portanto, retificação não é simplesmente um processo de corte com cavacos pequenos (Micheletti, 1977).

A energia específica na retificação de acabamento aumenta mais rapidamente com a diminuição da espessura de cavaco ( $h$ ) do que no torneamento.

$$U \sim 1 / h^n \quad (2.4)$$

Onde:  $n$  varia entre 0,8 – 1,0 na retificação e em torno de 0,2 no torneamento

Na retificação de acabamento uma pequena parte da energia gerada no processo é removida pelos cavacos. Praticamente toda a energia é transformada em calor, que é dividido entre a peça e o rebolo. Um fator importante na retificação é o coeficiente de distribuição  $R$ , que é a fração da energia total envolvida que vai para a peça, enquanto  $(1-R)$  é a fração da energia total que vai para o rebolo. Quando se está retificando com óxido de alumínio, sem refrigeração, em torno de 80% do total da energia envolvida vai para a peça (Shaw, 1996), daí a necessidade de alta vazão de líquido refrigerante na retificação.

## **2.7) - Forças de corte**

### **2.7.1) – Introdução**

Os esforços de corte do processo de retificação, apesar de sua grande importância, ainda são pouco conhecidos quando comparados a outros processos. Eles dependem de um conjunto muito grande de fatores como: tipo de rebolos, condições de corte, condições de afiação, fluidos, etc.. Na maioria dos estudos sobre esforços de corte se considera uma espessura constante do rebolo e, portanto, normalmente se fala em força específica de corte  $F' = F/b$  (Oliveira, 1989).



Marshall e Shaw (1952) mediram as forças de corte em um processo de retificação plana e concluíram que:

- As forças de corte são significativamente influenciadas pelo procedimento de dressagem.
- A energia específica (U) é um conceito útil para se estimar as forças de corte e potência da mesma forma que a tensão de cisalhamento e a tensão normal são relacionadas com a resistência das estruturas.
- A energia específica (U) é aproximadamente independente da velocidade de corte ( $V_s$ ) e da espessura de corte (b), mas é mais uma função da espessura do cavaco indeformado (h) e da resistência do material sendo retificado.
- As forças de retificação são basicamente as mesmas para retificação plana concordante e discordante.
- A profundidade da camada deformada é aproximadamente a metade da profundidade de corte.

O parâmetro principal para se estimar forças de corte é a energia específica. Ela é a energia necessária para se converter um determinado volume de material em cavacos e é influenciada pelo material da peça, tamanho médio do cavaco e independente de outras variáveis. A energia específica é, portanto, proporcional à resistência do material a ser usinado e, assim, quanto maior a resistência do material maior a energia específica.

## **2.7.2) - Modelos para estimação das forças de corte**

### **2.7.2.1) - Modelo de Hahn e Lindsay**

Considera a força normal de retificação proporcional ao volume de material removido

$$Z'_w = \lambda_w \cdot (F'_n - F'_{no}) \quad (\text{mm/s}) \quad (2.5)$$

Onde:

$Z'_w$  = Volume de cavaco removido por unidade de largura (b) e tempo (t)

A grandeza  $F'_{no}$  representa a força até onde não ocorre remoção de cavaco e somente atrito e riscamento do material. A figura 2.8 mostra a variação da força de corte com a profundidade de corte. A grandeza  $F'_{no}$  é definida através da projeção da reta relativa à região de corte sobre o eixo da força normal.

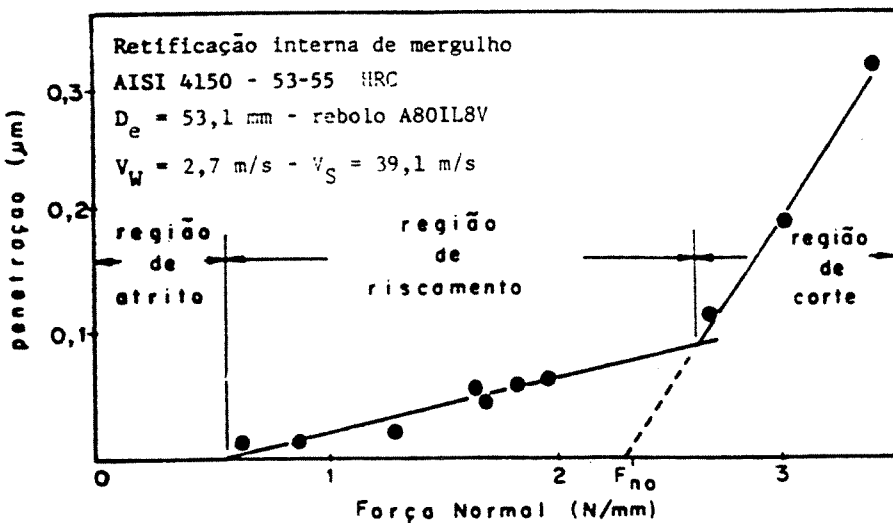


Fig. 2.8: Força de corte x profundidade de corte (Oliveira, 1989)

O valor de  $\lambda_w$  é dado pela equação:

$$\lambda_w = \frac{94,383 \cdot (V_w/V_s)^{3/19} \cdot (1+ad/sd) \cdot sd^{11/19} \cdot V_s}{D_e^{43/304} \cdot (Vol b)^{0,47} \cdot d^{5/38} \cdot (HRC)^{27/19}} \quad (\text{mm}^3/\text{N.s}) \quad (2.6)$$

Onde:

$ad$  = Profundidade com que o dressador penetra no rebolo

$sd$  = Passo de dressagem

$D_e$  = Diâmetro equivalente do sistema  $[ D_s / (1 \pm D_s/D_w) ]$

$D_s$  = Diâmetro do rebolo

$d$  = Diâmetro médio do grão abrasivo

$Vol_b = 1,33 H' + 2,2 S' - 8$  e os valores de  $H'$  e  $S'$  são calculados pelas expressões mostradas na tabela 2.2:

$Vol_b = 1.33H' + 2.2S' - 8$		
TAMANHO DO GRÃO	$S'$	$H'$
54 - 80	$S' = \frac{2s-6,9}{1,425}$	$H' = 0,9H - 0,135$
90 - 100	$S' = \frac{2s-8,4}{1,40}$	$H' = 0,9H - 0,43s + 1,93$
120 - 150	$S' = \frac{2s-10}{1,375}$	$H' = 0,82H - 0,55s + 3,43$
180 - 220	$S' = \frac{2s-11,7}{1,325}$	$H' = 0,82H - 0,75s + 5,9$

Tab. 2.2: Valores de  $H'$  e  $S'$  para vários tamanhos de grão (Oliveira, 1989)

Onde:

$H$  é a dureza do rebolo (H, I, J, K etc) e os valores são 0, 1, 2, 3 respectivamente

$S$  é o número da estrutura do rebolo (2, 3, 4, 5, 6 etc)

Considerando-se as equações 2.5 e 2.6 tem-se que a força específica de corte segundo Hahn e Lindsay é expressa por:

$$F'_n = \frac{Z'w \cdot D_e^{43/304} \cdot (Vol_b)^{0,47} \cdot d^{5/38} \cdot (HRC)^{27/19}}{94,383 \cdot (V_w/V_s)^{3/19} \cdot (1+ad/sd) \cdot sd^{11/19} \cdot V_s} + F'_{no} \quad (N) \quad (2.7)$$

ou

$$F'_n = h_{eq} \cdot K_h + F'_{no} \quad (N) \quad (2.8)$$

$K_h$  é definida como a constante de Hahn que depende das velocidades da peça e do rebolo, dos diâmetros da peça e do rebolo, do tipo do rebolo, da condição de dressagem e da dureza da peça. Resumindo a força total de retificação, segundo Hahn e Lindsay, é formada pela soma de duas parcelas:

- a parcela de remoção de cavaco proporcional à espessura de corte equivalente ( $h_{eq} \cdot K_h$ )
- a parcela elástica constante gerada pelo atrito e riscamento do material ( $F'_{no}$ )

#### **2.7.2.2) - Modelo de Tlusty**

Tlusty desenvolveu uma equação onde a força total é atribuída somente à parcela de usinagem e a parcela elástica é desconsiderada. A força normal, entretanto, é proporcional a  $h_{eq}$

$$F'_n = 2A \cdot a \cdot V_w/V_s = h_{eq} \cdot 2A \quad (N) \quad (2.9)$$

A constante  $A$  depende do tipo de rebolo, material da peça, condição de dressagem, etc. A relação entre as constantes de Hahn e Tlusty é:

$$K_h = 2A \quad (2.10)$$

#### **2.7.2.3) - Modelo de Malkin**

A potência total de retificação (por unidade de largura do rebolo “ $b$ ”) foi definida por Malkin como:

$$P' = P'_{ch} + P'_{pl} + P'_{sl} \quad (Kw/mm) \quad (2.11)$$

Onde:

$P'_{ch}$  = potência na formação do cavaco

$P'_{pl}$  = potência de riscamento

$P'_{sl}$  = potência de atrito entre peça e rebolo

Este autor desenvolveu as seguintes expressões para cada um dos termos:

$$P'_{ch} = 13,8 \cdot V_w \cdot a \quad (\text{Kw/mm}) \quad (2.12)$$

$$P'_{pl} = V_s / 1000 \quad (\text{Kw/mm}) \quad (2.13)$$

$$P'_{sl} = (C1 + C2 \cdot V_w / V_s \cdot d_e) \cdot D_e^{1/2} \cdot a^{1/2} \cdot A_s \quad (\text{Kw/mm}) \quad (2.14)$$

C1 e C2 são constantes relativas ao rebolo e a peça e  $A_s$  é a área real de contato dos grãos

## 2.8) - Potência de corte

Conforme mostrado na figura 2.9 a força  $F$  de retificação pode ser separada em componentes tangencial  $F_t$  e normal  $F_n$  ou em componentes horizontal e vertical.

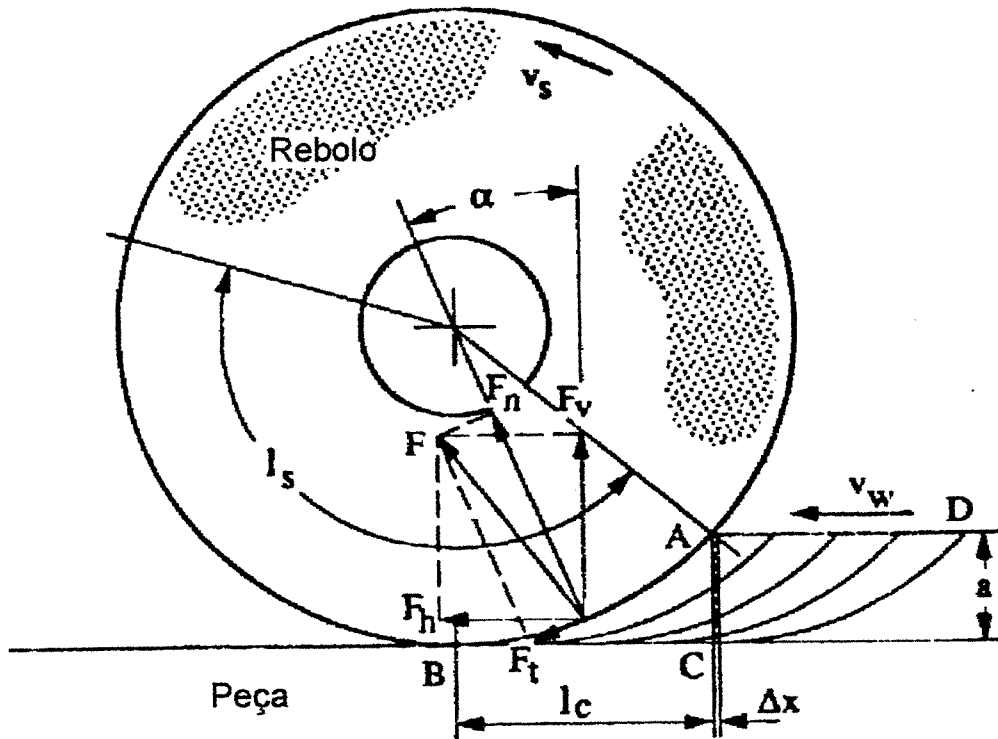


Fig. 2.9: Forças na retificação (Xun Chen, Rowe, 1996)

Quando o diâmetro do rebolo é muito maior que a profundidade de corte, o ângulo  $\alpha$  é muito pequeno. Com estas condições a componente horizontal pode ser assumida idêntica à componente tangencial e a componente vertical idêntica a componente normal (Xun Chen, Rowe, 1996)

A potência no ciclo de retificação é definida pela equação:

$$P = F_t \cdot (V_s \pm V_w) \quad (Kw) \quad (2.15)$$

O sinal positivo significa velocidades do rebolo e da peça em direções opostas e o sinal negativo significa que estão na mesma direção. Como  $V_w$  é usualmente muito menor que  $V_s$  pode-se concluir que:

$$P = F_t \cdot V_s \quad (Kw) \quad (2.16)$$

A potência consumida pelo movimento de avanço de mergulho e transversal é normalmente desprezada.

## **2.9) - Deformações no ciclo de retificação**

As forças geradas durante a retificação causam deformações elásticas na máquina, no rebolo e na peça. Devido ao mecanismo de formação do cavaco, as forças normais são maiores que as tangenciais, o que causa deformação elástica do sistema máquina/rebolo/peça. As deformações na retificação causam imperfeições geométricas nos componentes que estão sendo retificados e devem ser cuidadosamente consideradas.

A deformação elástica local do grão reduz a profundidade real de corte. As deformações locais do rebolo, quando o grão está em contato com a peça, são da mesma ordem de grandeza do cavaco. Presume-se que a deformação elástica local do grão consiste de quatro componentes: deformação local da peça, deformação da ponta do grão, variação da posição do centro do grão e rotação. As deformações da ponta do grão e rotação são relativamente pequenas. A deformação local da peça é considerada normalmente um pouco mais de  $2\text{ }\mu\text{m}$  e deve ser considerada como parte da deformação total da peça. O deslocamento do centro do grão é um pouco acima de  $3\text{ }\mu\text{m}$  (Xun Chen, Rowe, 1996).

A deformação elástica do sistema de retificação faz com que a remoção de sobremetal seja menor do que o esperado, considerando-se o avanço controlado pela máquina.

Conforme mostrado na figura 2.10, que simula uma operação cilíndrica externa de mergulho, a estrutura da máquina suporta o rebolo como uma mola de elasticidade  $K_s$  e a peça com uma mola de elasticidade  $K_w$ . Estas duas molas juntas em série compõem a elasticidade da máquina  $K_m$  na direção do avanço de mergulho, conforme mostra a equação 2.17.

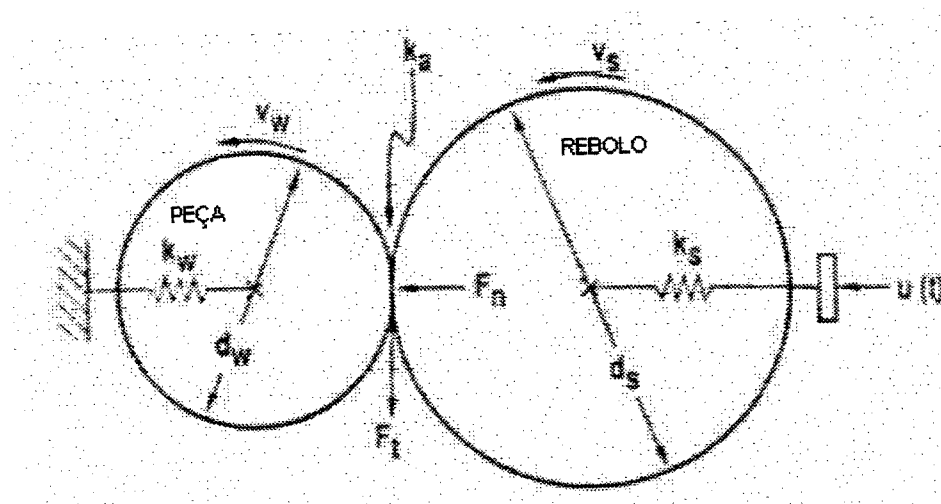


Fig. 2.10 : Deformações no sistema máquina-rebolo-peça (Malkin, 1989)

$$K_m^{-1} = K_s^{-1} + K_w^{-1} \quad (2.17)$$

A diferença entre a velocidade de avanço radial programada pela máquina e a velocidade de redução do diâmetro sendo retificado é igual a taxa de mudança da deformação elástica do sistema de retificação (Malkin, 1989), conforme a expressão 2.18:

$$u(t) - v(t) = \varepsilon \quad (2.18)$$

Para o sistema da figura 2.10 a deformação é dada por:

$$\varepsilon = F_n / K_e \quad (2.19)$$

onde:  $F_n$  é a componente de força normal e  $K_e$  é a constante elástica efetiva do sistema MRP (máquina / rebolo / peça):

$$1/K_e = 1/K_m + 1/K_a \quad (2.20)$$

Onde:

-  $K_m$  representa a soma das constantes elásticas (rigidez) em que a estrutura da máquina suporta o rebolo ( $K_s$ ) e a peça ( $K_w$ )

-  $K_a$  representa a constante elástica relativa ao contato rebolo/peça

A partir do modelo de Tlusty tem-se que:

$$F'_n = 2 A \cdot a \cdot V_w/V_s \quad (N) \quad (2.21)$$

Definindo-se  $R$  como uma constante de proporcionalidade entre a força normal e a profundidade de penetração  $a$ :

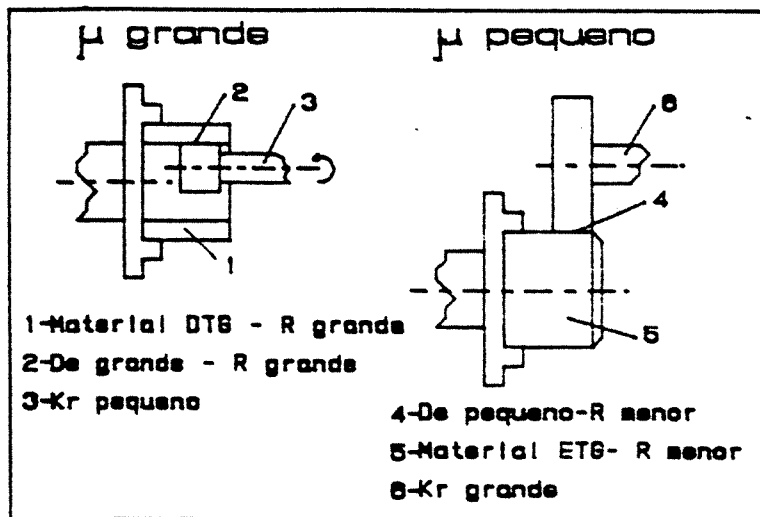
$$R = (F'_n/a) \cdot b = 2 A \cdot V_w/V_s \cdot b = (V_w/\lambda_w) \cdot b \quad (2.22)$$



e, portanto, utilizando-se  $K_e$  como a rigidez radial do sistema MRP, pode-se estabelecer a relação  $\mu$  entre  $R$  e  $K_r$  como:

$$\mu = R / K_e \quad (2.23)$$

Valores elevados de  $\mu$  representam sistemas pouco rígidos, onde o acréscimo de força normal com a profundidade de corte é grande. A figura 2.11 ilustra dois sistemas com valores distintos de  $\mu$ :



Onde: DTG – Material difícil de retificar

ETG – Material fácil de retificar

Fig. 2.11: Ilustração de sistemas com valores grandes e pequenos de  $\mu$  (Oliveira, 1989)

Considerando-se uma operação de retificação cilíndrica de mergulho, conforme ilustrado na figura 2.12, onde inicialmente um rebolo ajustado para uma penetração  $a$ , correspondente a um avanço  $s$  toca a peça, surgem as forças proporcionais à penetração e, portanto, inicia-se a deformação do sistema rebolo/peça/máquina. Ao final da primeira volta, o rebolo que já deveria

estar em uma posição  $s$ , se encontra em uma distância  $X$ . Após um certo número de voltas a profundidade de corte passa a ser igual a  $s$  mas a posição do rebolo é menor que a posição do produto n.s.

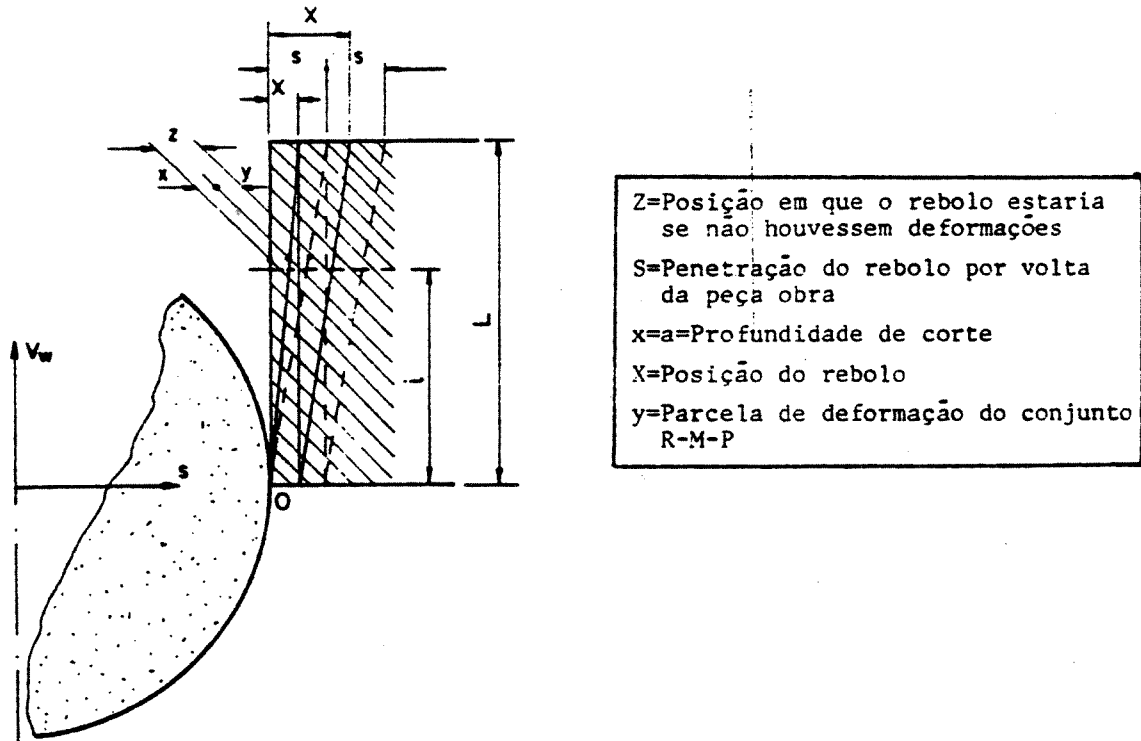


Fig. 2.12: Penetração do rebolo numa operação de mergulho (Oliveira, 1989)

Através do equilíbrio de forças tem-se que:

$$R \cdot a = K_r \cdot y \quad (2.24)$$

onde  $y$  é a parcela deformada do sistema

$$\mu \cdot a = y \quad (2.25)$$

Após um certo número de voltas a fica igual a s e portanto:

$$y = \mu \cdot s \quad (2.26)$$

Portanto o coeficiente  $\mu$  determina a diferença entre a posição real e a desejada do rebolo. O produto  $\mu \cdot s$  determina a diferença entre o valor indicado na máquina e a dimensão real da peça após um número  $n$  de voltas. A figura 2.13 mostra este fenômeno para vários valores de  $\mu$ . Os valores  $Z$  representam a posição teórica do rebolo e  $X$  a posição real. Nota-se através desta figura que quanto maior o valor de  $\mu$ , maior é a diferença entre  $X$  e  $Z$ .

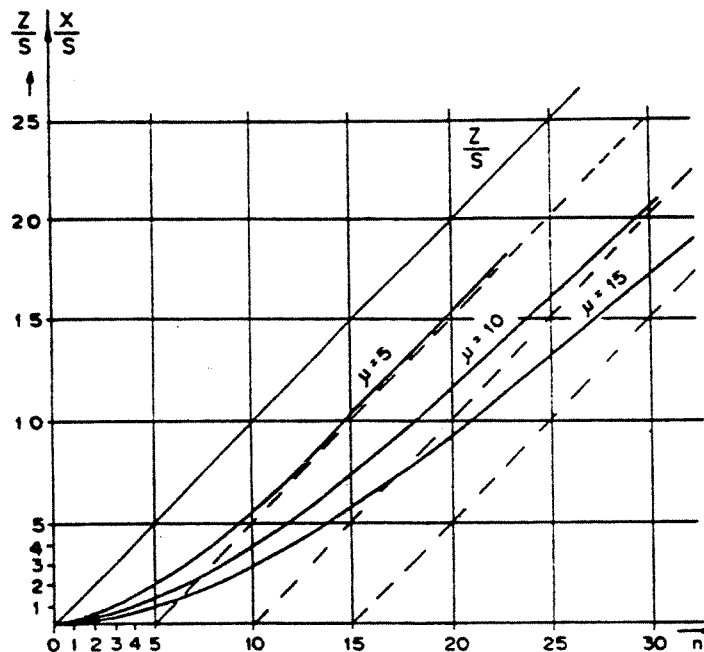


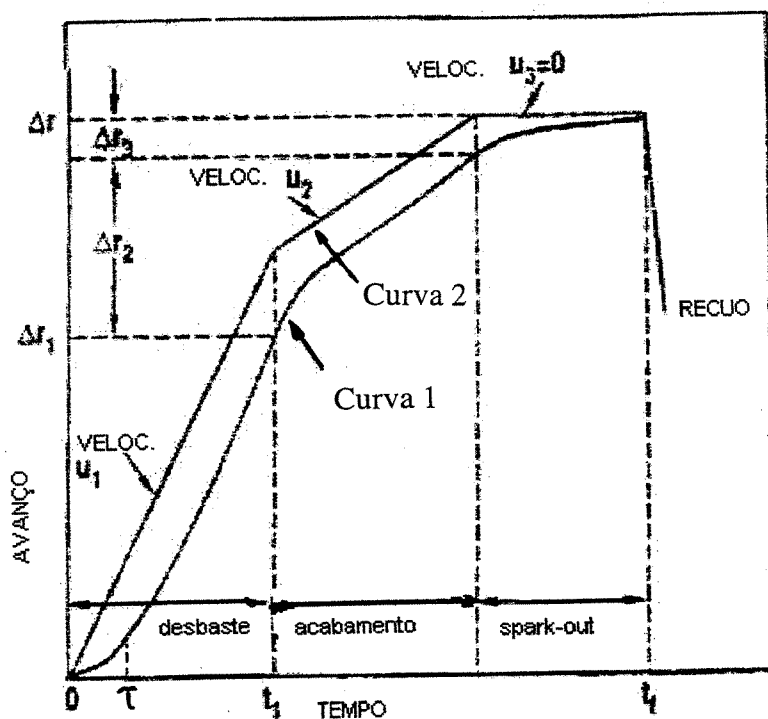
Fig. 2.13: Remoção de material para vários valores de  $\mu$  (Oliveira, 1989)

Os desvios de forma resultantes de uma operação de retificação também dependem de  $\mu$ . Isto ocorre pois os erros de forma deixados na operação anterior provocam variações na espessura de corte, que para situações onde a relação  $\mu$  é alta, resultam em deformações do sistema máquina/rebolo/peça que acompanham tais desvios. Estes erros podem ser ocasionados

por desbalanceamento do rebolo, erros de forma existentes na peça anteriormente à operação de retificação, vibrações auto excitadas, etc. Ao final da operação de centelhamento (que será explicada a seguir) as oscilações na força devida às variações na espessura de corte não são sempre suficientes para vencer a força crítica, fazendo com que alguns erros geométricos ainda permaneçam no produto acabado.

## 2.10) - Diagrama do ciclo de retificação

A figura 2.14 ilustra um exemplo típico de ciclo de retificação de mergulho:



Onde: Curva 1 – Diminuição do raio da peça

Curva 2 – Velocidade de avanço controlado da máquina

Fig. 2.14: Curva avanço x tempo no ciclo de retificação de mergulho (Malkin, 1989)

Depois de um transiente inicial, onde ocorrem as deformações elásticas da peça e do eixo do rebolo, a velocidade de avanço real correspondente à curva de diminuição do raio da peça, mostrado na figura 2.14, aproxima-se da curva de velocidade de avanço controlada pela máquina e a deformação se torna um valor constante. O tempo deste transiente depende da constante de tempo  $\tau$ , que é o tempo que o eixo do rebolo e a peça passam se deformando no início do ciclo, logo após o contato da peça com o rebolo.

Valores típicos de  $\tau$  são 0,5 - 1,0 s para retificação externa e 1 - 10s para retificação interna, embora estes valores tenham grande variação. No caso da retificação interna os valores são mais altos devido aos eixos porta rebolos mais compridos e flexíveis.

O mesmo raciocínio vale para a retificação plana tangencial onde o avanço não é contínuo, mas sim com deslocamentos da mesa em valores discretos passo a passo. Para o primeiro passe a profundidade de corte é  $a$ , mas a profundidade verdadeira removida tem um valor menor, devido à deformação do sistema de retificação. Desconsiderando-se o desgaste do rebolo, o valor da deformação é igual à diferença entre as profundidades verdadeira e programada:

$$d - a_1 = \epsilon_1 \quad (2.27)$$

A retificação cilíndrica produz peças ovalizadas que só podem ser transformadas em peças circulares através da diminuição das profundidades de corte no final do ciclo de retificação. A melhor circularidade só é conseguida com uma menor velocidade de avanço verdadeira no final do ciclo e de um aumento na rotação da peça (Malkin, 1989). Isto é conseguido com o centelhamento que reduz a verdadeira profundidade de corte com a recuperação da deformação elástica, para melhorar a geometria da peça. O centelhamento é aquela fase final do ciclo de retificação, onde a velocidade de avanço do rebolo é levada a zero ( $\mu_3 = 0$  na figura 2.14) e a velocidade de diminuição do raio da peça diminui continuamente, até também atingir zero, onde então deve se proceder o recuo do rebolo.

Tanto no caso de avanço contínuo (retifica cilíndrica de mergulho), como no caso de avanço discreto (retifica plana tangencial), a deformação elástica pode ser eliminada utilizando-se diversos passes de centelhamento, ou seja, passes com avanço nulo. Na figura 2.15 é ilustrada a redução da deformação relativa ( $Y$ ) nos diversos passes de centelhamento ( $m$ ). Há uma tendência da deformação tender a zero no final do ciclo.

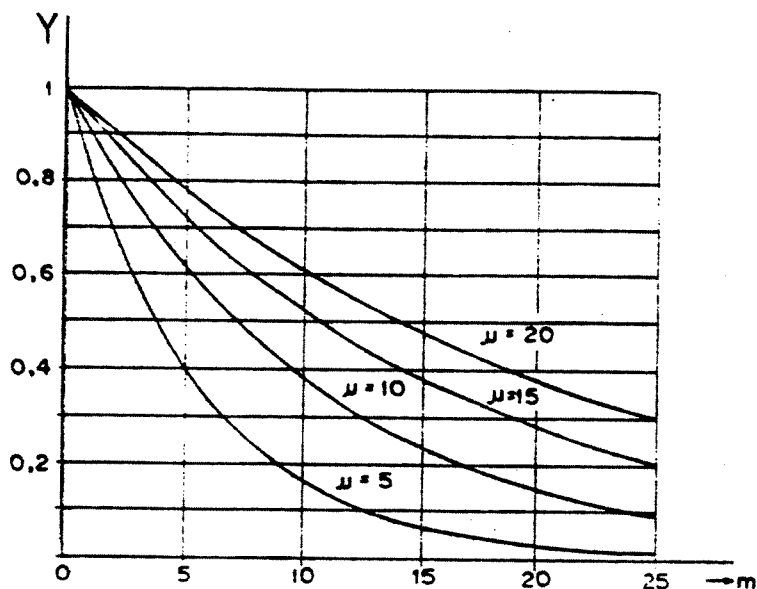


Fig. 2.15: Remoção de material durante o centelhamento (Oliveira, 1989)

Enquanto a duração do centelhamento é relacionada com a constante de tempo  $\tau$ , a verdadeira profundidade de corte no centelhamento depende da profundidade de corte nos primeiros passes do ciclo. Em muitos ciclos práticos de retificação o tempo de centelhamento é minimizado com a introdução de passes intermediários entre o desbaste e o acabamento, chegando a tempos menores de  $\tau$ .

Durante o período de centelhamento a profundidade de retificação diminui e consequentemente a potência de retificação também, seguindo uma função exponencial, conforme mostra a figura 2.16

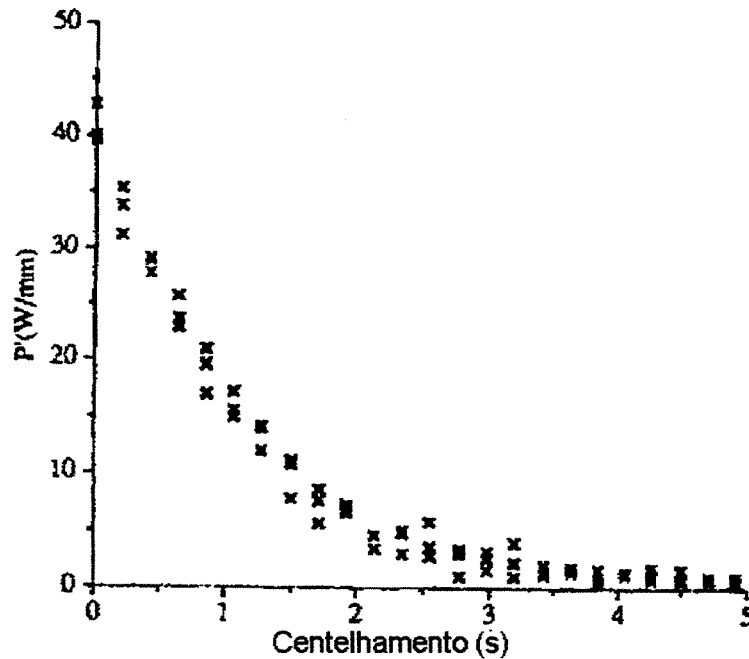


Fig. 2.16: Potência x profundidade de corte durante o centelhamento (Xun Chen, Rowe, 1996)

Resultados obtidos em simulação mostram que a rugosidade da peça (figura 2.17) também diminui durante o período de centelhamento, porém a diminuição da rugosidade não segue uma função exponencial.

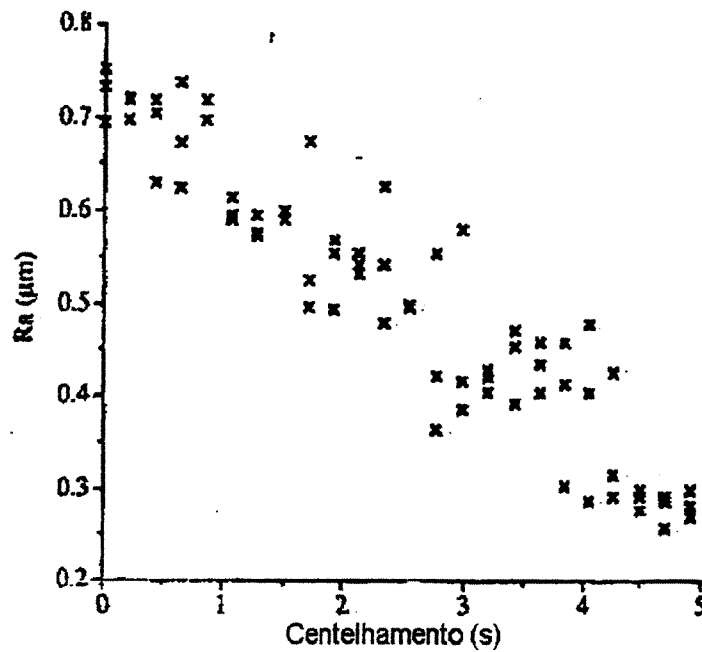


Fig. 2.17: Rugosidade x profundidade de corte (Xun Chen, Rowe, 1996)

Atualmente, devido às medições em processo, que são largamente utilizadas na indústria, não é usual se ter um ciclo onde se tenha centelhamento puro no final ( $V_f = 0$ ), pois o sensor de medição em tempo real não saberia estabelecer o momento de parar o avanço, já que ele não conhece a deformação. Assim o ciclo usado nestes casos é do tipo mostrado na figura 2.18, onde ao final se tem um avanço bem pequeno, mas diferente de zero, onde as deformações elásticas do início do ciclo são compensadas (Manual de Programação Zema Fanuc 18TC – 1997).

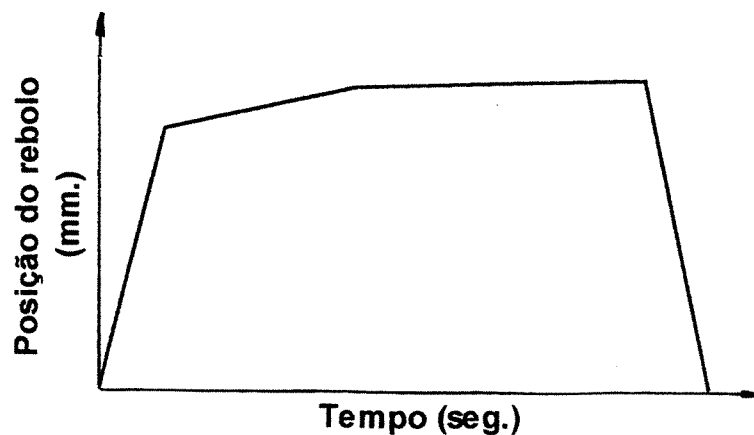


Fig. 2.18: Esquema de um ciclo de retificação onde é usada medição em processo.



## **2.11) - Dressagem**

### **2.11.1) – Introdução**

Na retificação de precisão busca-se, primordialmente, a manutenção de baixas tolerâncias dimensionais através da minimização do desgaste volumétrico do rebolo. Isto é feito com a utilização de rebolos com maior capacidade de retenção do grão abrasivo. Com o passar do tempo, entretanto, esta situação gera a perda da agressividade do rebolo. Assim, a operação de afiação da ferramenta, denominada dressagem, passa a fazer parte integrante do processo.

O processo de retificação pode ser expresso como um processo onde o material da peça é removido por grãos presos à superfície de corte do rebolo, como consequência da cinemática da retificação. Portanto, a análise do processo total de retificação precisa levar em conta não somente a retificação em si como também o processo de dressagem do rebolo. A topografia do rebolo é um parâmetro de saída do processo de dressagem, que é afetado pelas características do rebolo, pelo formato da ferramenta de dressagem e pela cinemática da operação de dressagem.

A grande influência que as condições de dressagem podem provocar no desempenho de uma operação de retificação fez com que a quantidade de pesquisas nesta área aumentasse consideravelmente nos últimos anos, destacando-se aqui muitos trabalhos da Escola de Engenharia de S.Carlos / USP-S.C. (Oliveira, Bianchi). Para se ter uma idéia dessa influência, basta citar que as forças de retificação podem variar cerca de 500%, apenas variando-se as condições de dressagem em um mesmo tipo de operação (Coelho, Silva, 1998).

A figura 2.19 ilustra as relações entre os parâmetros de entrada e saída do processo total de retificação, que inclui dressagem. Os parâmetros de entrada básicos do processo de retificação incluem as características do rebolo e da peça, da forma da ferramenta de dressagem e da cinemática da dressagem e da retificação. Inicialmente é gerada a topografia do rebolo, depois a geometria do cavaco, seguida pelas cargas singulares em cada grão. Por último resultam os parâmetros de saída.

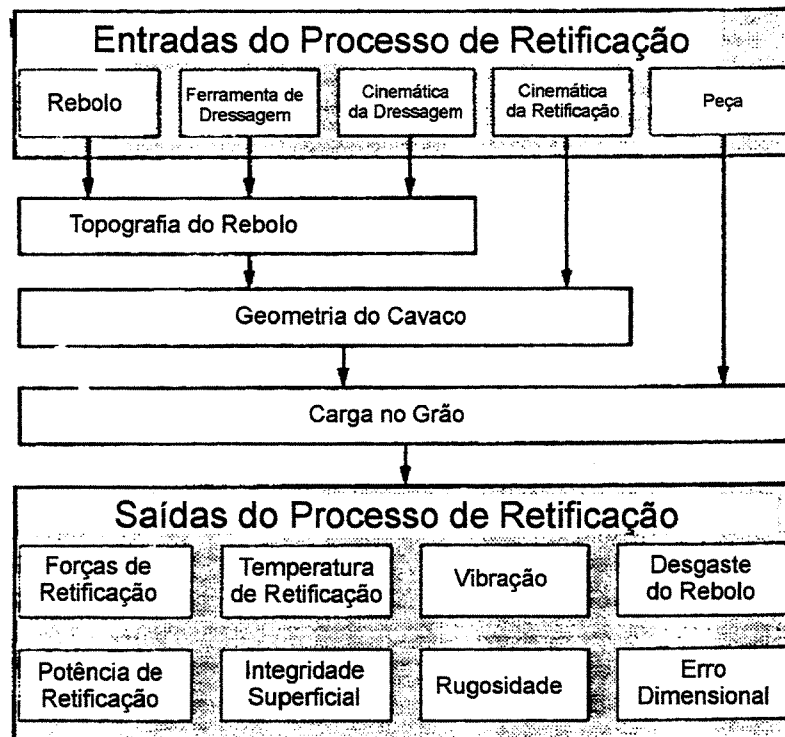


Fig. 2.19: Parâmetros de entrada e saída do processo de retificação (Xun Chen, Rowe, 1996)

A operação de dressagem consiste da usinagem da superfície de corte do rebolo com uma ferramenta chamada dressador, normalmente confeccionado com um diamante.

Os principais objetivos da dressagem são: promover a concentricidade do rebolo com o eixo de rotação da peça, o perfilamento da superfície de corte e a melhoria da agressividade do rebolo, pela geração de novas arestas cortantes.

Devido à grande importância do aumento da agressividade do rebolo, existem operações de dressagem, como o jato abrasivo, onde só há preocupação com este objetivo e não se corrige a forma da superfície ativa e nem a concentricidade desta com o eixo do rebolo.

### 2.11.2) - Tipos de dressadores

Os dressadores são divididos de acordo com seu princípio de atuação cinemática e, são divididos em dressadores estáticos e rotativos. Os dressadores estáticos tem apenas movimento de translação por toda a largura do rebolo, enquanto os dressadores rotativos também tem movimento de rotação quando em contato com o rebolo.

No grupo dos estáticos tem-se os de ponta única, o fliese e os conglomerados e no grupo dos rotativos existem os rolos diamantados e rolos para crushing. Os dressadores de ponta única são constituídos de um suporte (geralmente metal) onde é fixado um diamante (sintético ou natural) com uma ponta cortante. Alguns cuidados devem ser tomados com este tipo de diamante, entre eles (Nussbaum, 1988):

- Os suportes deverão ter alta rigidez, evitando vibrações
- O ângulo do eixo do dressador deverá formar um ângulo entre 65 e 70 graus com a face do rebolo que está sendo dressada
- Abundante refrigeração
- Girar a ponta de diamante sobre si mesmo periodicamente, para manter um desgaste uniforme em todas as faces do diamante.

Nos conglomerados, diversos diamantes dispostos aleatoriamente ou em carreiras de diamantes (fliese), são fixados em uma liga metálica. Estes dressadores apresentam algumas vantagens em relação ao de ponta única, pois tem desgaste regular da parte ativa, não precisam de remontagem ou regulagem do dispositivo e uma diversidade de formas geométricas que permitem os mais variados trabalhos de formação de perfil, além de um excelente desempenho na dressagem de rebolos de granas finas.

Os dressadores rotativos, que são classificados em dressadores de rolo e de disco, são mais usados quando se necessita perfilar o rebolo com uma determinada forma, porém no caso dos rolos diamantados há aumento de produtividade também. No processo de perfilamento por crushing, o perfil é obtido por meio da pressão do rolo sobre o rebolo. Os rolos podem ser de aço, sinterizados ou com diamantes e são arrastados pela rotação do rebolo. O processo de “crushing”

é mais usado para se perfilar rebolos de dureza mole até média. Para altas durezas de rebolo somente podem ser usados os rolos diamantados, que diferentemente dos rolos de “crushing”, tem movimento de rotação própria. Devido às características do diamante, o rolo diamantado não precisa das pressões de trabalho encontrada nos “crushers” metálicos, porém a força aplicada é superior à usada para dressadores conglomerados. Os “crushers” metálicos quebram o grão e a liga (principalmente esta) com relativa facilidade, enquanto o rolo diamantado corta o grão e a liga (Nussbaum, 1988).

Ainda no caso dos dressadores rotativos devem ser citados os discos dressadores, que são discos de liga metálica impregnados com diamantes. São usados para obter o giro concêntrico de rebolos de diamante e de CBN e também de rebolos para operações de desbaste.

A figura 2.20 ilustra a força normal durante a operação de retificação versus volume de metal removido para diversos tipos de dressagem

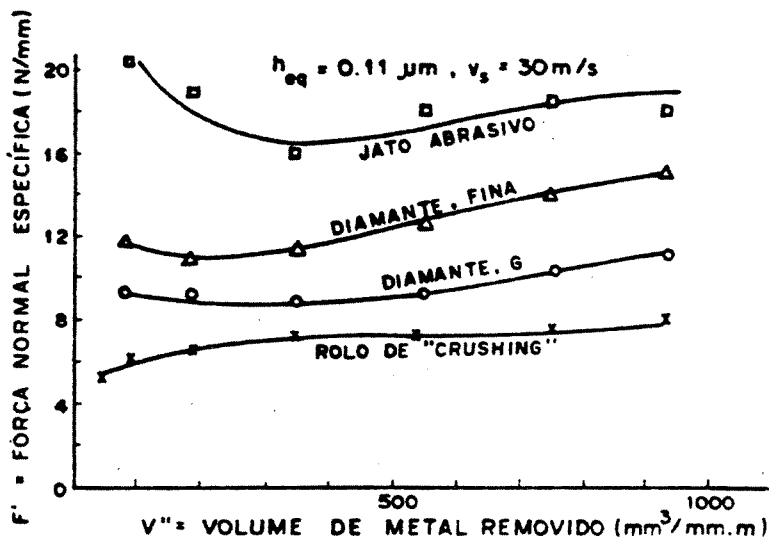


Fig. 2.20: Força de corte x volume removido para diversas condições de dressagem (Oliveira, 1989)

### 2.11.3) – Cinemática da dressagem

A figura 2.21 representa o ponto de contato entre dressador e rebolo numa operação de dressagem com dressador de ponta única e mostra os diversos parâmetros de dressagem.

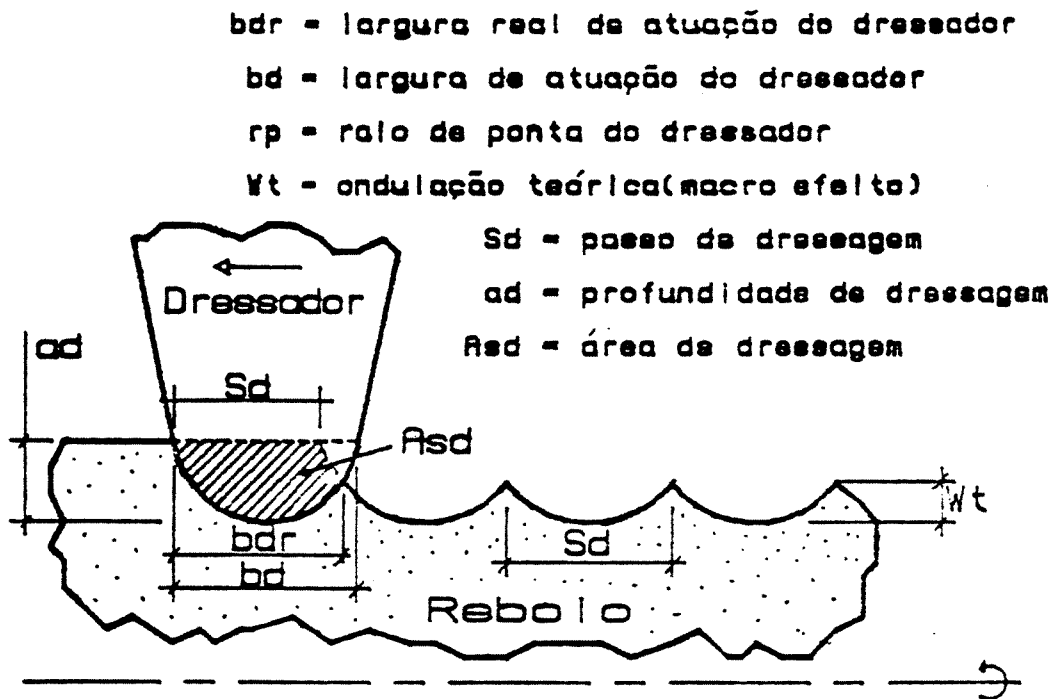


Fig. 2.21: Contato entre dressador e rebolo (Oliveira, 1989)

Supondo-se a ferramenta de dressagem com raio de ponta  $r_p$  pode-se calcular a largura de atuação do dressador  $b_d$  e a largura de atuação  $b_{dr}$  pelas equações:

$$b_d = \sqrt{8 r_p \cdot a_d} \quad (2.28)$$

$$b_{dr} = \sqrt{2 r_p \cdot a_d} + S_d/2 \quad (2.29)$$

e a ondulação teórica da superfície (macro efeito) pela equação:

$$W_t = S_d^2 / 8 r_p \quad (2.30)$$

A ondulação teórica é válida somente para situações onde o passo de dressagem é menor que a largura de atuação do dressador. A ondulação aumenta com o quadrado do passo de dressagem e não depende da profundidade de dressagem ( $a_d$ ). O parâmetro grau de recobrimento é definido como a relação entre a largura de atuação do dressador e o avanço por volta

$$U_d = b_d / S_d \quad (2.31)$$

O grau de recobrimento é um parâmetro que abrange todas as condições de dressagem, podendo ser definido como um caracterizador das condições de afiação do rebolo. A figura 2.22 mostra as variações dos esforços de corte normal e tangencial e rugosidade média ( $R_z$ ) com a variação de  $U_d$ . Percebe-se que tanto a força normal como a tangencial tendem a diminuir com a diminuição de  $U_d$ , pois tem-se uma maior agressividade no rebolo, enquanto a rugosidade aumenta com a diminuição de  $U_d$ , pois a diferença de altura entre picos e vales é maior.

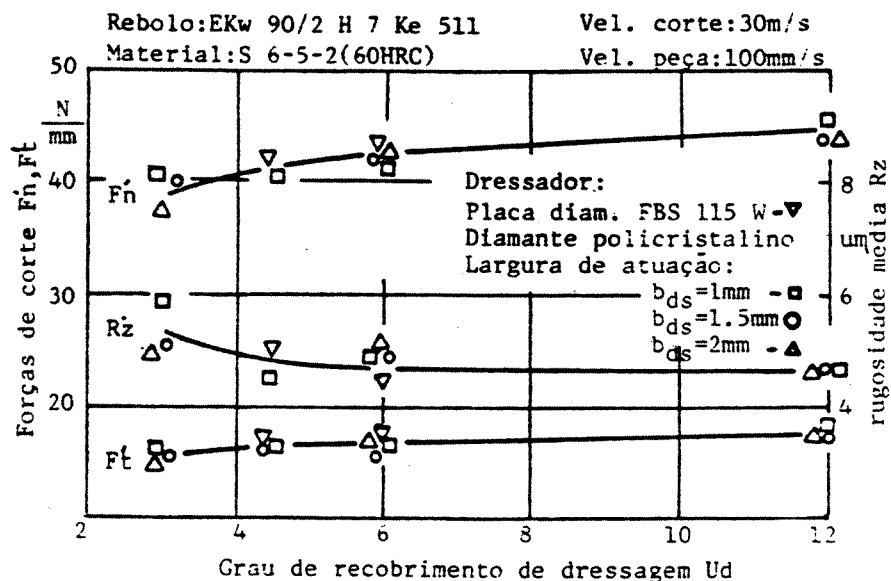


Fig. 2.22: Forças de corte e rugosidade x grau de recobrimento (Oliveira, 1989)

A relação entre a ondulação teórica e o grau de recobrimento é:

$$W_t = a_d / U_d^2 \quad (2.32)$$

A equação 2.32 somente é válida para valores de  $U_d$  maiores que um, pois para valores menores que este a ondulação  $W_t$  fica igual à profundidade de penetração  $a_d$ . Na figura 2.23 são apresentadas topografias de rebolos dressados com valores maior, igual e menor que um.

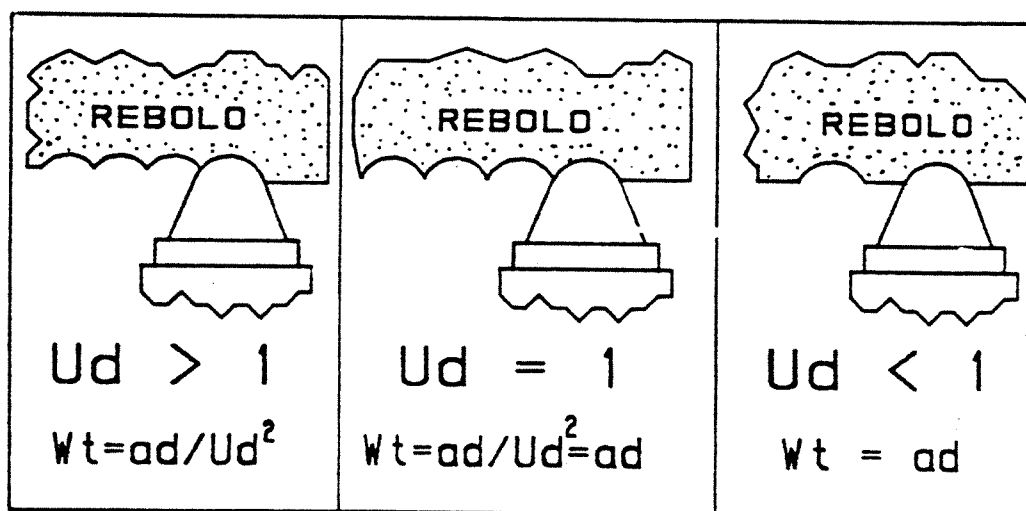






Fig. 2.23: Topografia do rebolo x grau de recobrimento (Oliveira, 1989)

A condição de agressividade máxima do rebolo acontece quando o grau de recobrimento é um.

Como resultado da operação de dressagem com dressador estático de ponta única, que é o mais usado atualmente, resultam no rebolo o macro efeito e o micro efeito. O macro efeito resulta da composição de movimentos entre o dressador e o rebolo, resultado normalmente da fratura do ligante que retêm os grãos juntos, gerando o aspecto grosseiro do rebolo (rosca) e o

micro efeito resulta da fratura das partículas onde são geradas novas arestas de corte e a consequente agressividade que depende da friabilidade do grão, que é a propriedade do grão abrasivo de, ao se quebrar, formar novas arestas cortantes.

O macro efeito aumenta com a ductilidade do grão, baixa resistência da liga e altos valores de  $S$  e  $a_d$  (dressagem grosseira com altas forças). O micro efeito aumenta com o aumento da friabilidade do grão e o grau de dureza do rebolo e diminui com  $S$  e  $a_d$  . A tabela 2.3 mostra a influência do macro e micro efeito na agressividade do rebolo, para rebolos com diferentes granulometrias.

Rebolo com granulometria grosseira	Rebolo com granulometria fina	
 <p>Microefeito agressivo</p>	 <p>Macro e Micro efeitos pouco agressivos</p>	<p>sd pequeno</p> <p>ad pequeno</p> <p>Ud grande</p>
 <p>Microefeito agressivo</p> <p>Macroefeito atenuado</p>	 <p>Microefeito pouco agressivo</p> <p>com macroefeito</p>	<p>sd grande</p> <p>ad grande</p> <p>Ud pequeno</p>

Tab. 2.3: Influência de macro e micro efeito na agressividade do rebolo (Bianchi, 1990)

Na retificação de materiais frágeis, a perda de agressividade do rebolo ocorre pela perda do macro e micro efeito de dressagem, enquanto que na retificação de materiais dúcteis, que geram cavacos longos, ocorre, além destes dois fenômenos, também o entupimento dos poros do rebolo, contribuindo ainda mais para a perda da agressividade.



A proporção de fraturas no ligante aumenta com o aumento da profundidade de dressagem e também com a diminuição do passo de dressagem. A razão é que, aumentando-se a profundidade de dressagem, aumenta a quantidade de material removida do rebolo durante a dressagem, o que produz uma maior força de dressagem e portanto uma maior probabilidade de quebra no ligante. Diminuindo o passo de dressagem, aumenta-se o caminho do dressador (o contato do dressador com o rebolo) e diminui-se a rosca gerada no rebolo o que aumenta a probabilidade de quebra na liga.

Com o uso prolongado, um diamante de ponta única tende a ficar sem afiação a medida que sua ponta e seu raio médio se tornam maiores, portanto reduzindo a tensão localizada no grão. Isto aumenta a força de dressagem e também a probabilidade de fratura de liga ao invés de fratura do grão.

Com relação ao efeito da dressagem na força de retificação, potência, energia específica, material removido e acabamento da superfície da peça retificada, pode-se dizer que, como regra geral, um passo de dressagem maior produz uma superfície do rebolo mais aberta, deixando grãos bem afiados na superfície com uma baixa densidade de pontos ativos de corte. Com uma superfície do rebolo bem afiada, a taxa de remoção de material é alta e a força de corte na retificação e temperaturas são baixas. Entretanto, a qualidade superficial da peça retificada é melhor através de um passo de dressagem menor.

De acordo com experiências realizadas (Bianchi, et al, 1998), que estudaram a influência dos parâmetros de entrada no processo de dressagem e sua influência na agressividade do rebolo, concluiu-se que:

- A agressividade tende sempre a crescer junto com o aumento da velocidade de corte, pois o volume de cavacos removido por grão abrasivo é menor e portanto o desgaste por grão é menor.
- Quanto menos friável for o ligante, mais agressivo se torna o rebolo, pois com menor tendência a fratura do ligante, a força de retenção do grão é maior e existe um microefeito mais acentuado.

- A agressividade do rebolo aumenta com a diminuição do grau de recobrimento.
- Rebolos de granulometria média tem mais agressividade que granulometria fina.

O efeito da profundidade de dressagem no comportamento da operação de retificação é similar ao do passo de dressagem. Uma grande profundidade de dressagem produz uma superfície mais grosseira no rebolo devido à existência de mais macro fraturas na dressagem.

O formato do diamante de dressagem tem também um importante efeito no desgaste do rebolo. Há grandes diferenças no desgaste do rebolo causados pelo formato do dressador. Estas diferenças no desgaste do rebolo causadas por pequenas mudanças no formato do diamante torna difícil a previsão do comportamento da retificação. Devido a este motivo, a operação de dressagem permanece objeto de um grande nível de variabilidade. A operação de dressagem com diamantes afiados proporcionam um parâmetro G maior, devido à criação de menos macro fraturas na superfície do rebolo, diminuindo portanto o valor do desgaste do rebolo.

#### **2.11.4) - Novos processos de dressagem**

Destacam-se a seguir alguns dos estudos mais recentes relativos a novos procedimentos de dressagem (Coelho, Silva, 1998):

- Dressagem a laser: Neste processo é utilizado um raio laser de alta potência, que é posicionado perpendicularmente à superfície do rebolo e se desloca em relação a este com uma velocidade definida pela coordenação entre os pulsos do laser e a velocidade de avanço do feixe, de modo que toda a superfície do rebolo possa ser irradiada e, assim ocorra a retirada de material do rebolo. Este processo permite, através da determinação dos parâmetros do feixe de laser, que os diversos componentes do rebolo, como grãos abrasivos, revestimento e material do ligante possam ser irradiados a fim de se obter um resultado equivalente à dressagem convencional. Diferentemente do processo convencional de dressagem, no processo por laser não há contato entre o dressador e o rebolo e, portanto, o processo não está sujeito a variações devido ao desgaste do dressador. As condições de dressagem como passo e profundidade de dressagem são

variadas de acordo com os parâmetros do laser (intensidade, passo, etc.). O laser, por ser um processo de indução térmica, provoca uma mudança na topografia do rebolo seguida por uma resolidificação do material fundido, com trincas induzidas termicamente. Esta topografia se altera com os parâmetros de intensidade e velocidade do laser. Normalmente, o rebolo dressado com laser apresenta inicialmente um aumento nas forças de retificação, devido ao atrito da camada solidificada deixada no rebolo, que é menos agressiva, porém com o uso prolongado esta camada é removida e as forças diminuem e a rugosidade também melhora. Com a seleção apropriada da intensidade da radiação do laser e suas condições de focos, a dressagem a laser pode gerar uma topografia do rebolo que pode produzir resultados de retificação comparáveis ou melhores do que aquelas produzidas com a dressagem com dressadores convencionais (Radhakrishnan, Babu, 1989).

- Dressagem elétrica: Tecnologia desenvolvida nos EUA na década de 60 e pode ser eletrolítica ou por descarga elétrica. A dressagem eletrolítica (ELID) se aplica a rebolos superabrasivos com ligante metálico, utilizando-se a eletrólise. O rebolo é o polo positivo e um eletrodo fixado abaixo é o polo negativo. A eletrólise ocorre no pequeno espaço de 0,1mm. que separa os dois polos, pelo fornecimento de uma corrente elétrica e de uma solução química (eletrólito). A eletrólise atua especificamente na remoção do material do ligante do rebolo. No caso da dressagem por descarga elétrica, ela é indicada para rebolos de diamante com ligante metálico e utiliza a energia da descarga elétrica proveniente de um par de eletrodos, confeccionados em latão, que mantém um leve contato com o rebolo. A descarga elétrica acontece instantaneamente quando os eletrodos se separam do rebolo. Neste método apenas o material do ligante é removido.

- Dressagem por jato abrasivo: Utiliza um método de aceleração de pequenas partículas abrasivas até altas velocidades, através de um gás a alta pressão, direcionado para a superfície do rebolo.

- Dressagem com abrasivos livres: Um rebolo de CBN com ligante resínóide em seu eixo tem sua porção inferior mergulhada num tanque com grãos abrasivos convencionais misturados com óleo. Uma placa de dressagem exerce pressão constante sobre a superfície do rebolo, pela ação de uma mola. Quando o eixo do rebolo é acionado os abrasivos livres aderem à

superfície do rebolo, passando sob a placa de dressagem. Os abrasivos livres escavam o ligante expondo os grãos.

- Dressagem forçada: a superfície do rebolo é submetida a uma retificação “creep feed” sobre um bloco de cerâmica. A força de atrito entre o rebolo e a cerâmica provoca calor na área de contato que, combinada com as forças, quebra o grão de diamantes.

## **2.12) – Retificação de virabrequins**

O objeto de estudo neste trabalho será uma retificadora de virabrequins. Portanto, é necessário que se apresentem nesta matéria alguns tópicos sobre o processo de retificação deste tipo de peça, que também é conhecido como árvore de manivelas. Os virabrequins são usados em motores de combustão interna, para transmitir a energia gerada através da combustão de combustíveis em movimento rotativo. Dependendo do número de cilindros do motor os virabrequins podem ter de 3, 4, 5, 6 ou mais colos de bielas, ou colos excêntricos.

O virabrequim apresenta um processo de retificação diferenciado devido à presença dos mancais excêntricos para assentamento das bielas do motor (ou moentes). Como estes moentes giram fora do centro de rotação da peça o processo de retificação requer alguns cuidados especiais no que se refere ao ciclo de trabalho e ferramental da máquina.

O processo de retificação se resume a uma retificação cilíndrica de mergulho, porém de características muito especiais. Primeiro, por utilizar rebolos de diâmetros grandes, para que as flanges do rebolo não interfiram com os contrapesos do eixo e segundo por ser necessário retificar não somente superfícies cilíndricas (diâmetros de mancais e moentes), como também as faces laterais e os raios (alguns casos).

Normalmente a retificação completa de virabrequins compreende as seguintes etapas:

- retificação dos mancais de apoio no bloco.
- retificação dos moentes.
- retificação das extremidades (flange e espiga).

Todos estes processos são feitos em máquinas diferentes, na maioria das linhas de alta produção. No caso das extremidades, se não houver necessidade de retificação das faces de encosto, estas operações podem ser incorporadas à retificadora de mancais.

As máquinas de mancais (nosso objeto de estudo) são máquinas com fixação entre centros e podem ser de um ou múltiplos rebolos. Já nas máquinas de moentes existem várias alternativas. Entre elas, as mais usadas em altas produções são as máquinas onde a peça é fixada pelos mancais, já retificados acabados, em suportes semi-circulares (meia lua) que fazem parte das placas da máquina. Estes suportes estão deslocados do centro da placa o valor que se deseja obter no meio-curso da peça (distância entre linhas de centro de mancais a moentes), que está diretamente relacionada com a cilindrada do motor. Em linhas de alta produção para retificação de virabrequins para motores de 4 cilindros, normalmente se tem 2 operações para retificação dos moentes, feitas em 2 retificadoras de duplo rebolos. A primeira retifica os moentes 1 e 4 (que estão no mesmo grau) e a segunda retifica os moentes 2 e 3. Porém, como foi dito, para esta operação específica existem várias outras alternativas. A retificação de todos os moentes em apenas uma máquina de um reboło, com mesa porta-peça que se move axialmente e indexação da placa porta peça, ainda é usada, porém o tempo de ciclo deste tipo de equipamento é muito alto. Existem máquinas de duplo rebolos em cabeçotes separados que tem movimento axial e fazem a retificação dos 4 moentes em uma só máquina, sem movimentação da mesa porta-peça (Catálogo Landis, 1996).

Uma nova tendência no mercado de retificadoras de virabrequins são as máquinas com sistema entre centros com movimentos sincronizados entre a placa porta peças e o cabeçote porta rebolos, o que possibilita a retificação de moentes entre centros, eliminando a necessidade de

“set-ups” para ajuste do meio-curso e, portanto, mais flexíveis. Normalmente estas retificadoras tem usado rebolo de CBN, para conseguir um tempo de ciclo similar às máquinas de duplo rebolo, além da necessidade de um rebolo mais leve, para diminuição da inércia do sistema, já que neste caso existem os altos avanços de mergulho, sincronizados com a placa porta peça.

Com a acirrada competição no mercado de hoje fica evidente a necessidade de qualidade na retificação de virabrequins, pois esta qualidade está diretamente relacionada com a durabilidade e performance do motor. Porém quesitos como flexibilidade do equipamento, com relação ao set-up, e também produtividade são importantes quando da escolha de um equipamento para uma linha de produção. Os fabricantes de retificadoras de virabrequins sabem da importância de todos estes quesitos e o mercado de máquinas de retificação tem ganho com isto. Entre as inovações tecnológicas nestes tipos de equipamentos podemos citar:

- Sistema de dressagem CNC.
- Guias e mancais hidrostáticos.
- Eixos porta rebolos sem polias, com motor elétrico acoplado ao eixo (Brush less).
- Monitoramento por emissão acústica ou pela potência da máquina.
- Avanço do cabeçote porta rebolo e rotação da placa CNC.
- Acionamento via motores lineares.
- Velocidade periférica constante do rebolo.
- Retificação com rebolos de CBN.

## **Capítulo 3 - Otimização do ciclo de retificação**

### **3.1) - Introdução**

A otimização pode ser definida como a busca pelos mínimos custo e tempo de produção alcançando um nível de qualidade pré-determinado. Este nível de qualidade é avaliado pelos seguintes parâmetros: qualidade de forma e dimensional, rugosidade da peça, integridade superficial (sem queima, trincas, mantendo a dureza) etc.

O aumento do rendimento do ciclo de retificação, ou diminuição do tempo de ciclo, pode ser atingido de três formas:

- 1 - Diminuição de tempos improdutivo, ou seja, onde não há remoção de cavaco
- 2 - Diminuição da relação  $\mu$ , através da otimização do processo abrasivo e do sistema mrp (máquina/rebolo/peça)
- 3 - Utilização de sistemas transientes

### **3.2) – Diminuição de tempos improdutivo**

A otimização via diminuição de tempos improdutivo, ou seja, onde não há remoção de cavacos, é muito abrangente, pois no tempo total de uma operação de retificação, existe uma parcela significativa de tempos improdutivo, que são etapas do ciclo de funcionamento da máquina e, portanto indispensáveis, como abertura e fechamento de placas/castanhas, avanço e retorno de contra-pontas, carga e descarga de peças (manual ou automática), aproximação e recuo rápido do cabeçote porta rebolos etc. Muitas destas etapas podem ser otimizadas via

regulagem de válvulas de vazão hidráulica, acionamentos elétricos etc., mas, em grande parte dos casos, há limitações técnicas nos equipamentos que acabam penalizando o tempo de ciclo e isto só poderia ser melhorado com novos investimentos em atualizações técnicas. Porém, em muitos casos o retorno do investimento é muito demorado.

Outra otimização de tempos improdutivos, que normalmente é praticada nos ciclos de retificação de produção é a otimização da aproximação rápida do cabeçote porta rebolos.

A dispersão do sobremetal de usinagem é um limitador da diminuição do tempo total, através da aproximação rápida do reboło. Isto porque a velocidade de aproximação rápida fica normalmente ajustada para conduzir a ferramenta até uma posição pouco maior que a sobremedida máxima do lote (vide figura 3.1) e, portanto, quando se usina uma peça cujo diâmetro está na dimensão mínima existe um “gap”, que é uma distância percorrida pelo reboło sem haver corte. Como o sobremetal retirado em retificação normalmente é pequeno, o tempo gasto para ultrapassar este “gap” é substancial em relação ao tempo total de corte.

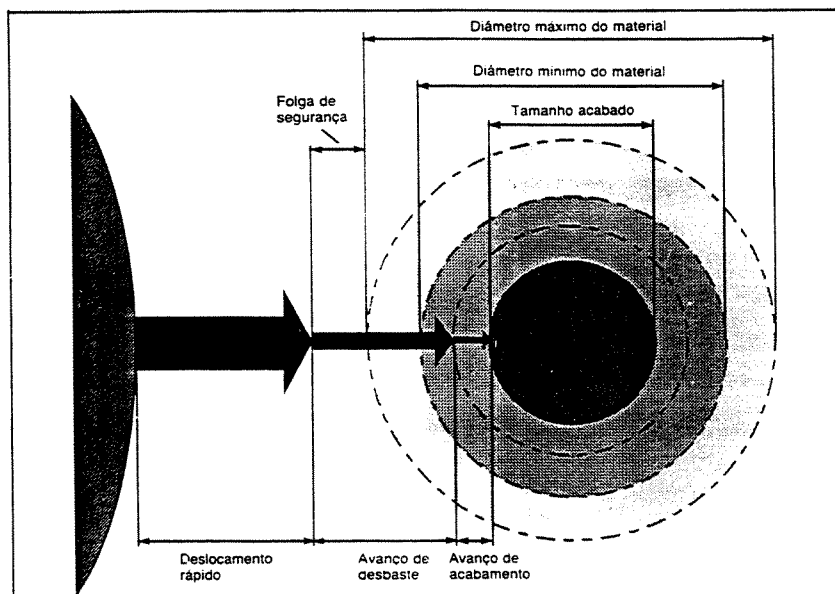


Fig. 3.1: Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho (Kluft, 1994)



A figura 3.2 (opção A) mostra uma alternativa para otimizar a produção, que é a diminuição da tolerância da operação de desbaste (anterior à retificação). Como pode-se notar, a medida que a tolerância da operação anterior diminui (passa de D1 para D2 na figura 3.2) mais tardio pode ser o ponto de transição da velocidade de aproximação para velocidade de avanço de corte e, portanto, menor é o tempo de ciclo.

No caso de haver dificuldades em se diminuir a tolerância da operação anterior haveria outra opção que é a utilização da taxa de avanço intermediária (figura 3.2 / opção B), ou seja, a aproximação rápida leva o rebolo até uma posição um pouco maior que o sobremetal máximo e, depois, com uma velocidade de avanço intermediária, o rebolo toca a peça até a condição de sobremetal mínimo.

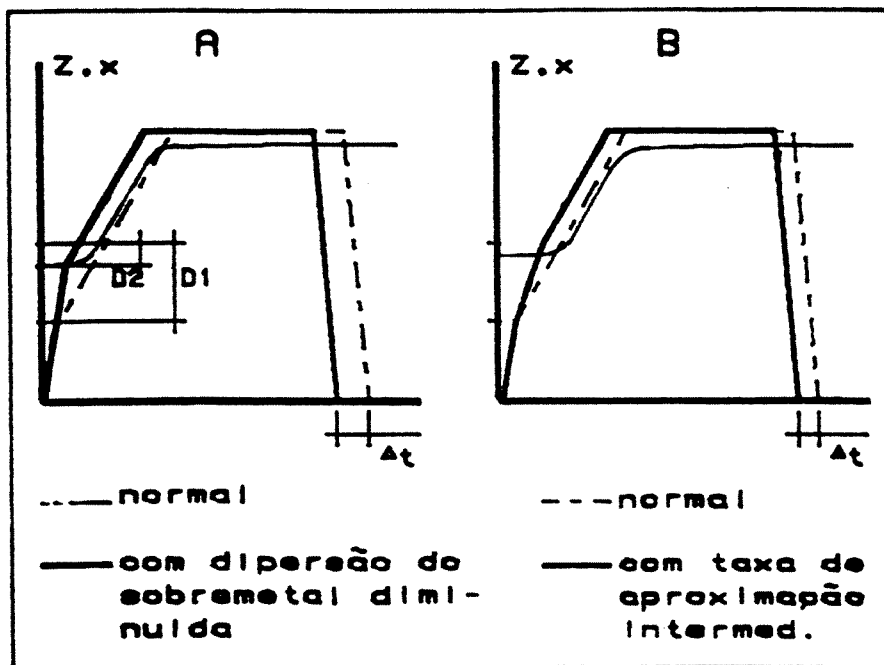


Fig. 3.2: Otimização do avanço de aproximação (Oliveira, 1989)

Atualmente é crescente a utilização de sistemas de monitoramento por emissão acústica visando entre outros objetivos, eliminar este “gap” causado pelas variações dimensionais das operações de desbaste. Estes dispositivos normalmente são definidos como “gap less” ou “gap eliminator”. Neste caso o sensor detecta o momento em que o rebolo toca a peça e, neste instante, o CNC da máquina promove a mudança do avanço do rebolo (Dornfeld & Cai, 1984), (Catálogo Marposs, 1995).

### 3.3) – Minimização do coeficiente $\mu$

A minimização de  $\mu$  como forma de redução de tempos de usinagem é realmente a medida mais abrangente que se pode tomar. Esta possibilita desde o uso de taxas de penetração mais elevadas até a diminuição do tempo de centelhamento. Além disso a qualidade geométrica da peça pode assumir níveis melhores. A figura 3.3 mostra a influência de  $\mu$  no tempo de retificação

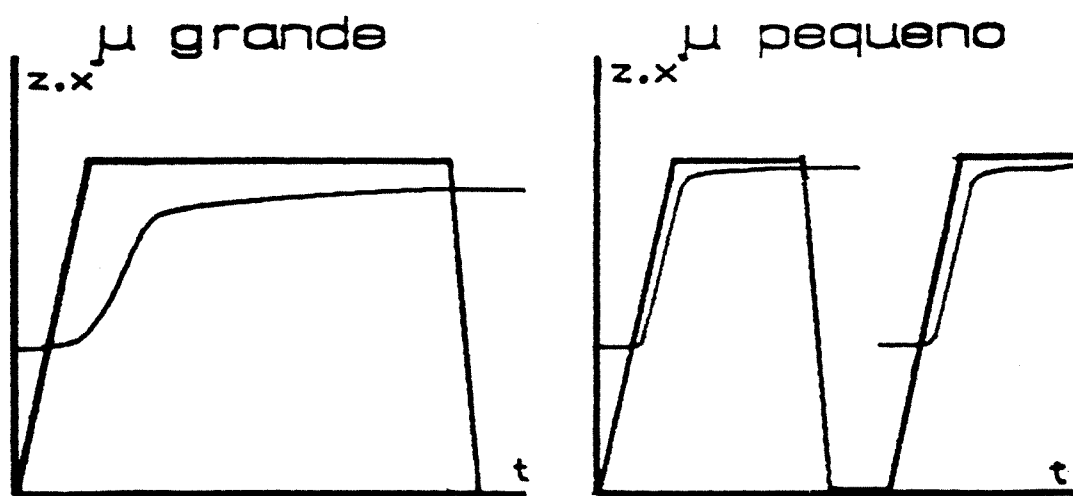


Fig. 3.3: A influência de  $\mu$  no tempo de retificação (Oliveira, 1989)

Para se conseguir minimizar  $\mu$  é necessário:

- Rigidez máxima do sistema MPR
- Mínimo coeficiente de proporcionalidade (R) entre força e profundidade de penetração do rebolo.

Nas operações cilíndricas externas com centros a parte menos rígida é, normalmente, a peça e, nas cilíndricas internas, o eixo da máquina. No caso específico das retificações externas pode-se melhorar a rigidez através do uso de lunetas, que são dispositivos que suportam a tendência a flexão da peça durante a retificação. A rigidez estrutural da máquina é a parte menos rígida nas retificações planas e sem centros.

A diminuição de valores do coeficiente de proporcionalidade R, entre a força e profundidade de corte, reduz o valor de  $\mu$  e melhora o rendimento térmico. Conforme se diminuem as forças de corte, poder-se-ia aumentar a taxa de penetração com tempos de centelhamento pequenos.

Para se analisar a influência de vários parâmetros no coeficiente R temos a seguinte equação:

$$R = \left(\frac{V_w}{V_s}\right)^{16/19} \cdot \frac{D_e^{43/304} (Vol_b)^{0.47} d^{5/38} (HRC)^{27/19} b}{94,383 \cdot \left(1 + \frac{a_d}{S_d}\right) S_d^{11/19}} \quad (\text{N/mm}) \quad (3.1)$$

Portanto, alguns parâmetros que diminuem R e consequentemente  $\mu$  são:

- Aumentar a velocidade periférica do rebolo: Provavelmente o que traz os melhores resultados pois o expoente  $1/V_s$  é o maior da expressão. Porém são necessárias melhorias nos mancais da máquina, rebolos e sistemas de fixação e refrigeração para suportar o aumento da velocidade.
- Diminuir o diâmetro equivalente: Possibilita menores áreas de contato e, portanto, maiores pressões de corte.

- Diminuição de Volb: Definir um rebolo com estrutura mais aberta, mais mole e com grãos menores. Esta escolha está ligada com a rugosidade necessária na peça, pois um rebolo deste tipo produz pior acabamento.
- Melhorar os parâmetros de dressagem: O objetivo é de que se obtenha a melhor agressividade do rebolo

A determinação da agressividade do rebolo pode ser o ponto fundamental para a otimização da retificação. O ideal seria conseguir rebolos que mantivessem alta agressividade por muito tempo, proporcionando um valor R sempre baixo e constante.

Neste trabalho procurou-se fazer a otimização do processo (redução do tempo de ciclo), através do aumento dos avanços até seus limites máximos, isto é, até o ponto em que não se comprometa a qualidade da peça e / ou não se diminua a vida do rebolo (número de peças entre dressagens). Isto significa utilizar ao máximo a rigidez, ou coeficiente R, do sistema. Como vai ser visto mais adiante, em primeiro lugar procurou-se ir até o avanço máximo na etapa de desbaste e depois na etapa de semi-acabamento. Posteriormente, como os avanços tinham atingido seus limites, procurou-se aumentar o sobremetal removido no desbaste (onde o avanço é maior), reduzindo-se o sobremetal removido na fase de semi-acabamento.

### **3.4) - Utilização de sistemas transientes**

Tem como objetivo a diminuição de tempos de centelhamento, pois o rebolo é levado além da posição final da peça e depois recua rapidamente.

Para a redução do tempo de centelhamento utiliza-se o sistema de centelhamento acelerado, ilustrado na figura 3.4:

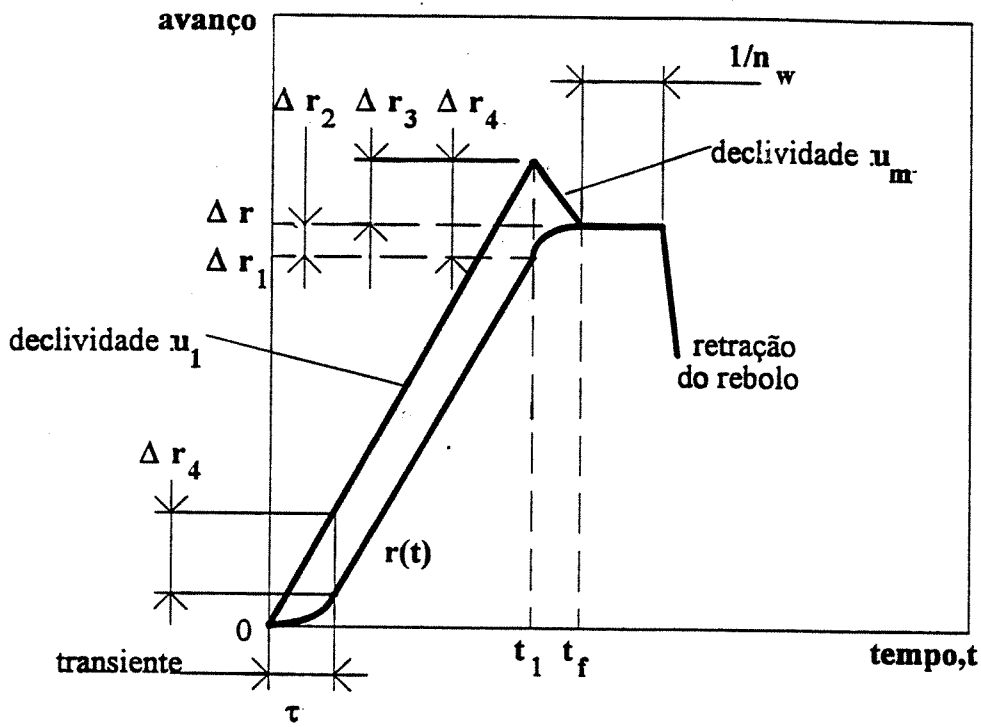


Fig. 3.4: Ciclo de retificação com centelhamento acelerado (Baldo, Diniz, 1995)

A idéia é ultrapassar as medidas finais da peça e retornar rapidamente com uma velocidade controlada e depois completar o centelhamento. No caso de retificação cilíndrica há necessidade de se aguardar uma volta completa da peça.

Fazendo-se o cálculo do tempo total de ciclo com o sistema de centelhamento acelerado temos a seguinte equação:

$$t_1 = \frac{\Delta r}{u_1} + \tau \left[ \left( 1 - \frac{u_m}{u_1} \right) \ln \left( \frac{u_1 - u_m}{-u_m} \right) \right] \quad (3.2)$$

O primeiro termo é referente a retirada de material, considerando-se um sistema totalmente rígido e o segundo termo relativo ao centelhamento.

A velocidade de avanço de retorno teórica pode ser calculada com a seguinte expressão:

$$u_m = -u_1 \exp \left( 1.65 - 5.15 \frac{\Delta r_2}{u_1 \tau} \right) \quad (3.3)$$

O valor  $\Delta r_3$  que representa o quanto se pode ultrapassar o diâmetro final da peça pode ser dado pelas expressões (Malkin, 1989):

$$\Delta r_3 = \Delta r_4 - \Delta r_2 \quad (3.4)$$

$$\Delta r_4 = u_1 \cdot \tau - \frac{u_1 \cdot \tau}{e} = u_1 \cdot \tau \cdot \left( 1 - \frac{1}{e} \right) \quad (3.5)$$

$$0,2 < \left( \frac{\Delta r_2}{u_1 \cdot \tau} \right) < 0,8 \quad (3.6)$$

Como pode ser visto nestas equações, para se implementar este ciclo, basta se ter o valor de  $\tau$ . Baldo e Diniz (1995) concluíram que o sinal de emissão acústica é adequado para se obter este parâmetro, pois este sinal tem valor crescente no início do ciclo de retificação e se estabiliza quando o tempo  $\tau$  termina. Tendo os valores de  $\tau$  obtidos via emissão acústica, estes autores implementaram o ciclo acelerado em ensaios utilizando peças de aço 4340 com 52 HRc de rebolo de óxido de alumínio e concluíram que o ciclo acelerado não danifica a qualidade da peça.

### 3.5) - Sistemas de monitoramento

Os processos de retificação não podem ser visualizados satisfatoriamente devido à encapsulação da máquina e também porque a visibilidade é obscurecida pelo refrigerante. A observação visual por parte do operador não mais protege um equipamento contra danos. Os

sistemas de monitoração de processo, portanto, tornaram-se essenciais para as retificadoras, para melhorar a confiabilidade de sua produção e para protegê-las contra danos. Os sistemas de monitoração também permitem a otimização dos processos de retificação e dressagem, melhorando a produção e a qualidade, além da redução de custos da peça e dos desperdícios (Kluft, 1994).

Diversos sistemas de monitoramento da retificação vem sendo utilizados, alguns já com larga utilização prática, outros ainda em fase de testes. Dentre eles pode-se citar:

- Sistema de medição em processo (Catálogo Marposs, 1997)
- Sistema de eliminação do tempo de corte em vazio, utilizando emissão acústica (Dornfeld & Cai, 1984), (Catálogo Marposs, 1995)
- Sistema de centelhamento acelerado utilizando emissão acústica, já citado neste trabalho (Baldo e Diniz, 1995)
- Sistema de detecção da posição real do rebolo visando a diminuição da dispersão dimensional da peça, utilizando emissão acústica (Gomes et al, 1997)
- Sistema de determinação automática do fim da vida do rebolo utilizando sinais de vibração do contra-ponto fixo da máquina (Hassui et al, 1998)

Algumas aplicações para a emissão acústica na retificação são:

- Observação e controle de colisões por erros de programação ou falhas de controle. A monitoração da máquina para severas sobrecargas, representa uma importante função de segurança que protege o operador e a máquina. Existem muitas causas diferentes para colisões em máquinas CNC. Ainda que existam modernos sistemas de controle as colisões não podem ser totalmente evitadas, mas são reduzidos grandemente os tempos de máquina parada e o tempo de reparo e, portanto, reduz os custos das manutenções causadas por estas colisões.

- Garantia da qualidade da dressagem usando EA, pois a dressagem é importante, como já foi visto, na agressividade do rebolo e no processo de retificação como um todo, porém é um tempo improdutivo, que pode ser encurtado com a monitoração, pois evitam-se passes em vazio durante a dressagem através do mesmo controle de aproximação rápida do rebolo e também pode ser detectado o ponto onde todo o perímetro do rebolo foi dressado, sem aumentar a profundidade dos passes, o que é normalmente feito por segurança na dressagem convencional (Inasaki, Okamura, 1985).
- Sistema para determinação exata do tempo de centelhamento, usando EA, para evitar desperdício de tempo mantendo o rebolo na posição do centelhamento, quando este já terminou (Dornfeld & Cai, 1984).

Outro sistema que tem sido desenvolvido recentemente é o de monitoramento por intensidade de centelhamento. Basicamente o sistema define uma relação entre o tamanho dos cavacos produzidos, os esforços de corte e a rugosidade final da peça. A intensidade do centelhamento e o tempo de duração depende do tamanho e da temperatura dos cavacos produzidos e a área do campo de centelhamento produzido depende da quantidade de cavacos produzidos, durante o processo de retificação. O campo de centelhamento é monitorado por uma câmera CCD. O tamanho médio do cavaco é medido a uma distância da secção de interface peça/rebolo e tem mostrado bons resultados no que se refere à correlação com a rugosidade final da peça e as forças normais de retificação. Entretanto este sistema deve ser calibrado para condições de retificação específicas. É um sistema indicado para processos de retificação a seco (Radhakrishnan, Rajmohan, 1994).



## **CAPÍTULO 4 – Otimização de um ciclo de retificação de eixos virabrequim na produção.**

### **4.1) – Introdução**

O objetivo deste trabalho é a diminuição do tempo de ciclo de uma operação de retificação cilíndrica de mergulho de eixos virabrequim, através da otimização do ciclo de retificação, ou seja, através de procedimentos experimentais na produção destas peças que possibilitem se obter um menor tempo de ciclo, sem comprometer a qualidade final do produto. O tempo atual do ciclo é derivado dos avanços programados na máquina, quando de sua instalação, com algumas otimizações feitas por operadores experientes. É sabido que o avanços de corte são inversamente proporcionais ao tempo de usinagem. Porém, um aumento significativo nestes avanços pode deformar demais o sistema de retificação de maneira a prejudicar a qualidade da peça.

Atualmente, as máquinas automáticas dispõem de comando CNC, ou mesmo as mais antigas permitem que sejam programados vários avanços e os pontos de troca de um avanço para o outro, como também as demais etapas do ciclo.

A utilização dos avanços altos por mais tempo seria o ideal, mas sabe-se que este procedimento gera maiores deformações elásticas no sistema e, portanto, a etapa de centelhamento faz-se necessária, para aliviar estas deformações.

Porém, atualmente é largamente usada a técnica de se ter um avanço muito baixo por um tempo maior no final do ciclo, do que propriamente zerar a velocidade de avanço por um determinado tempo (centelhamento). Isto é necessário quando se tem um dispositivo de medição em processo, que determina o momento de retração do rebolo no ciclo de retificação. Neste caso, se o centelhamento propriamente dito fosse utilizado, a peça teria dimensões menores que as

desejadas, pois algum sobremetal ainda seria retirado depois que o sistema de medição em processo determinasse a parada do avanço radial, quando a dimensão da peça atingisse a dimensão final desejada.

Assim, podem existir diversas combinações de avanços e pontos de mudança de avanço e certamente uma pode atender os requisitos de qualidade satisfatoriamente com um tempo de ciclo menor. Esta combinação vai ser buscada neste trabalho.

A etapa de dressagem representa também um ponto possível de otimização e sua influência no tempo de ciclo total pode não parecer grande quando se considera o tempo chão a chão da máquina, onde estão considerados os tempos não relacionados à remoção de cavaco, como acionamentos da máquina, carga e descarga de peças, entrada de lunetas, etc.; porém quando considera-se apenas o tempo de remoção de material como pontos de otimização, os ganhos de tempo devido a uma dressagem otimizada passam a ser mais representativos.

Neste trabalho decidiu-se otimizar o tempo de ciclo de retificação sem alterações nos tempos improdutivos (vide item 3.2 deste trabalho) pois pretende-se somente estudar o processo de usinagem e diminuir estes tempos não é propriamente usinagem, nem se utilizar sistemas transientes (vide item 3.2) pois este procedimento seria muito complexo em uma máquina que possui 5 rebolos usinando simultaneamente. Assim, decidiu-se otimizar o processo somente através da variação dos avanços e sobremetais de cada etapa do ciclo de corte, o que significa utilizar ao máximo a rigidez ( $K_r$ ) e o coeficiente  $R$  do sistema (vide item 3.3) e também através da diminuição do tempo de dressagem.

#### **4.2) – Metodologia dos ensaios**

A operação a ser otimizada foi escolhida por ser a operação de maior tempo de ciclo das operações de retificação em acabamento de uma linha de usinagem de virabrequins para motores automobilísticos de 4 cilindros e, portanto, com óbvias necessidades de redução de tempos.

Qualquer redução que se consiga no tempo de ciclo desta máquina pode representar um aumento da capacidade de produção desta parte da linha de usinagem, enquanto o equipamento permanecer como gargalo.

O trabalho consiste em testes de retificação de virabrequins de motores de 4 cilindros com diferentes avanços de usinagem e comparação dos resultados relativos à forma e acabamento superficial da peça. Todos os testes foram feitos em uma retificadora Landis, que retifica em acabamento os 5 mancais de apoio do virabrequim no bloco do motor, conforme mostrado na figura 4.1.

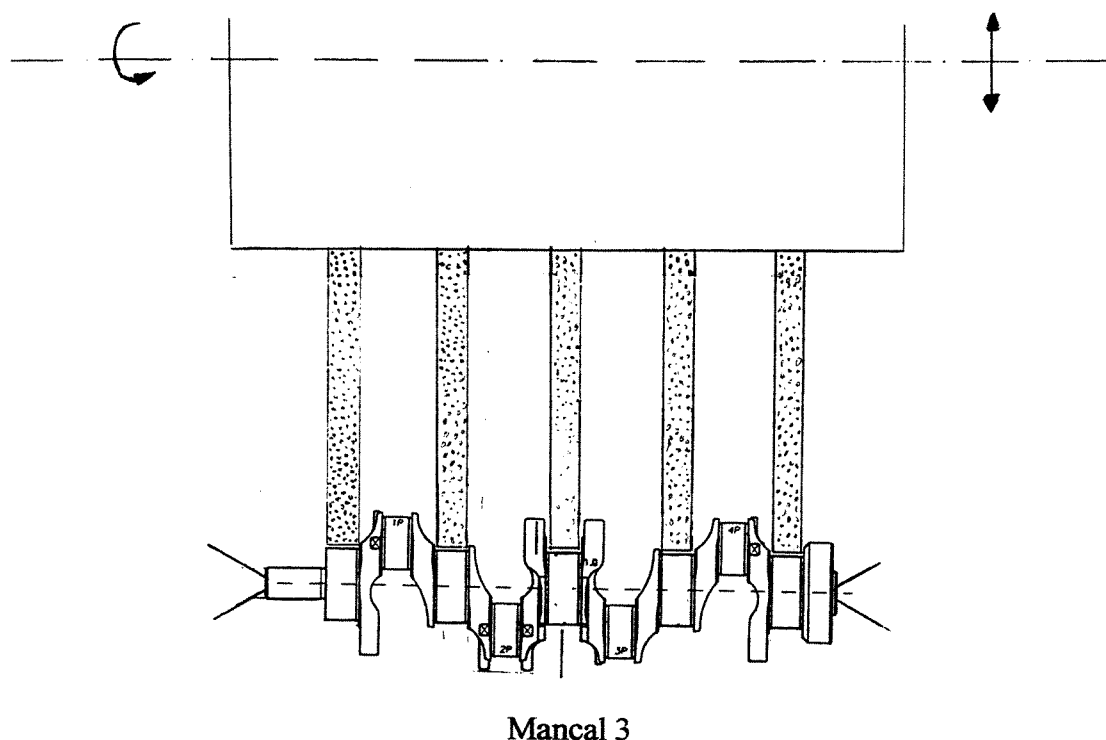


Fig. 4.1: Operação de retificação de mancais de virabrequim

Por razões de processo, as peças chegam para esta operação já pré-retificadas, ou seja, chegam com qualidades dimensionais melhores do que se fossem simplesmente desbastadas, principalmente no que se refere aos diâmetros, que chegam para esta operação com sobremetal de 0,50mm com variação de  $\pm 0,03\text{mm}$ . O mesmo não se pode dizer com relação ao batimento radial devido à operação anterior de deformação a frio dos canais, o que leva o erro de batimento

radial à faixa de 0,10mm. As condições em que as peças chegam para a operação são importantes para se diminuir os tempos de aproximação rápida, ou seja, diminuir o espaço percorrido sem corte já em avanço lento ("gap"), necessário por segurança para que se troque de avanço rápido de aproximação para o primeiro avanço lento de corte sem que haja riscos de colisões dos rebolos com a peça.

Após cada teste são feitas medições de circularidade do mancal 3 (vide figura 4.1) em uma medidora de forma de um apalpador marca FAG, e também a rugosidade neste mesmo mancal é medida através de um rugosímetro de bancada marca Perthen. O mancal 3 foi escolhido para se executar as medições durante os testes por estar mais longe das extremidades da peça e, portanto, sofrer menos interferência de dispositivos como placa, castanhas, ajustes de contraponta etc. , que tem grande influência na circularidade.

São medidas 4 peças após cada teste: a primeira peça usinada após a dressagem do reboło, a décima, a vigésima e a última peça usinada antes de uma nova dressagem (trigésima).

#### **Características da peça:**

- **Material da peça:** Ferro Fundido nodular
- **Dureza da peça:** 277-311 HB
- **Sobremetal removido na operação:** 0,50mm no diâmetro

#### **Características da máquina:**

Retificadora Landis Lund modelo 5W, com avanço hidráulico servo assistido do cabeçote porta rebolos, garfos de medição em processo nos mancais 1 e 5, sistema de carga e descarga automática, ano de fabricação 1981. O ajuste do avanço é feito pelo CNC modicon existente na máquina e as mudanças de avanço são feitas automaticamente pela máquina quando o diâmetro alcança valores pré-programados. O controle do diâmetro é realizado através de equipamento de controle em processo Marposs.

### **Parâmetros iniciais do processo:**

Foi a partir destes parâmetros que se iniciou a otimização. A retificação com estes parâmetros possibilitava a obtenção de peças na qualidade desejada e eram eles que vinham sendo utilizados na produção antes de se começar o processo de otimização. Quando fala-se em qualidade, as principais características levadas em conta serão circularidade e rugosidade. Em relação à circularidade, os valores limites giram em torno de 2,0 a 2,5  $\mu\text{m}$  e com relação a rugosidade, o valor máximo permitido é de Ra 0,6  $\mu\text{m}$ . Os parâmetros iniciais de usinagem eram:

- Rotação da peça: 160 rpm
- Velocidade periférica da peça: 28 m/min
- Rotação do rebolo: 850 rpm
- Velocidade periférica do rebolo: 45m/s
- Fluido de corte : óleo solúvel
- Diâmetro equivalente: 54,0mm
- Dimensões do rebolo: 1050,0 x 26,0 x 305,0 mm
- Especificação do rebolo: DA 60 M 6 V
- Velocidade de avanço rápido: 100mm/s (Raio)
- Velocidade de avanço lento 1 (desbaste): 0,025 mm/s (Raio)
- Velocidade de avanço lento 2 (médio) : 0,011mm/s (Raio)
- Velocidade de micro avanço : 0,0012mm/s (Raio)

A operação de dressagem é feita com um dressador tipo fliese que dressa os 5 rebolos em 2 passes, um na ida e outro na volta do dressador, com profundidades e passos diferentes. Durante o ciclo de dressagem o dressador se move em avanço lento de dressagem quando a agulha copiadora está sobre a chapelona, que tem o formato a ser definido no rebolo, e com avanço rápido quando a agulha copiadora vai de uma chapelona para outra. Ao final da dressagem do último rebolo na ida há novo incremento na profundidade de dressagem visando remover uma fina camada de material na volta. Os parâmetros iniciais de dressagem eram:

- Profundidade de dressagem na ida (ad): 0,030mm
- Passo de dressagem na ida (Sd): 0,22 mm/volta
- Profundidade de dressagem na volta (ad): 0,018mm
- Passo de dressagem na volta (Sd): 0,135mm/volta

- Largura de atuação do dressador (bd): 0,4mm
- Frequência de dressagem: a cada 30 peças
- Grau de recobrimento (Ud):  $0,4 / 0,135 = 2,96$

**Ciclo de retificação em estudo:**

figura 4.2 representa um esquema do ciclo de retificação em estudo:

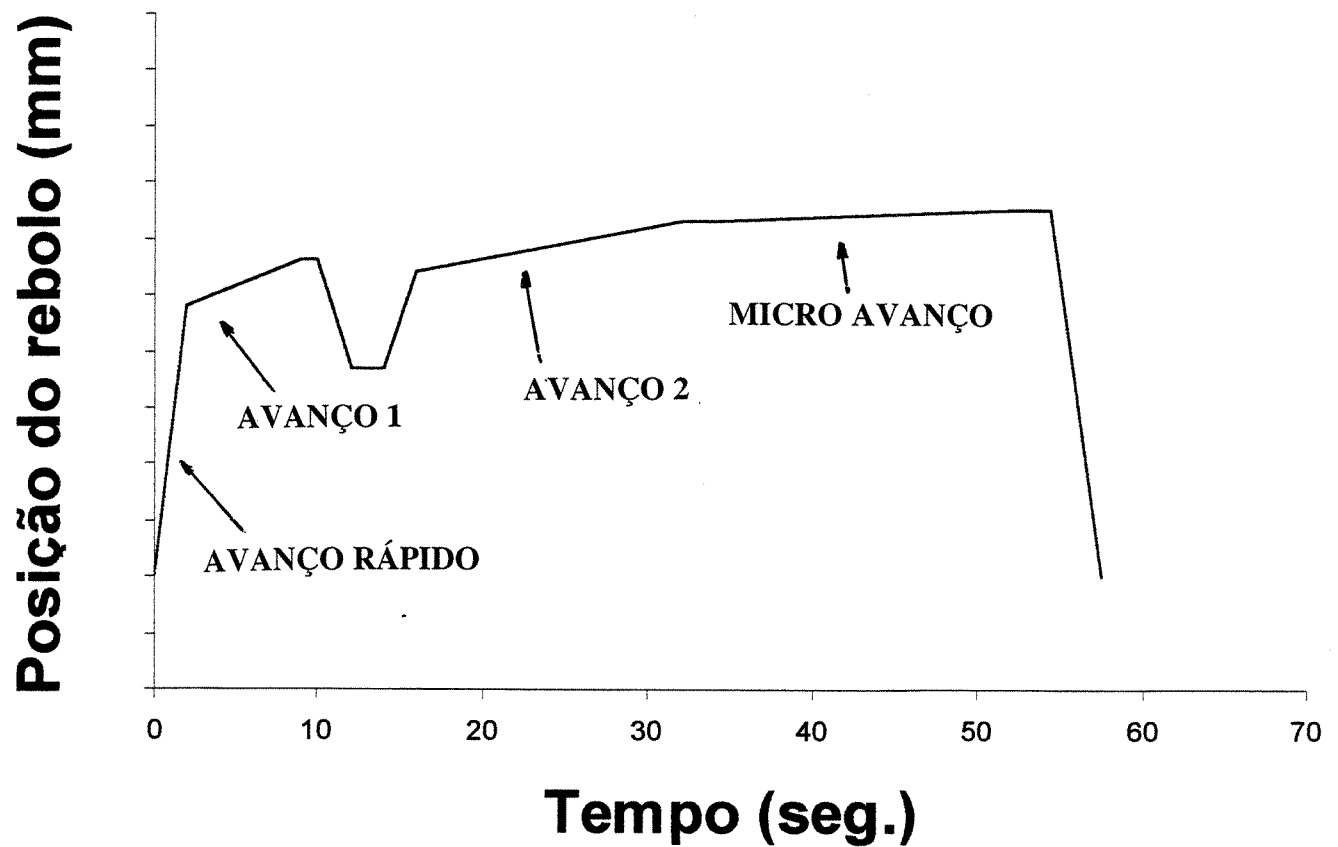


Fig. 4.2: Ciclo de retificação em estudo

### **Tempos de cada etapa do ciclo de trabalho da máquina**

A seguir, tem-se relacionadas todas as etapas do ciclo de retificação, seguidas dos tempos relativos a cada etapa:

1. Carga automática – 10 s.
2. Posicionamento axial da peça via contra-ponta – 2,0 s.
3. Fechamento de castanhas da placa porta-peça – 1,5 s.
4. Posicionamento axial da mesa via cabeça de medição axial – 4,0 s.
5. Avanço rápido do cabeçote com eixo porta rebolos, até 0,65mm do diâmetro final da peça, e início de rotação da peça – 2,0 s.
6. Entrada de avanço lento 1, que vai até 0,30mm. do diâmetro final da peça – 7,0 s.
7. Pausa – 1,0 s.
8. Recuo rápido do cabeçote porta rebolos até 2,0mm do diâmetro final para entrada da luneta de sustentação radial e medidores em processo nos mancais 1 e 5. – 3,0 s.
9. Avanço rápido até 0,40mm do diâmetro final (com a entrada da luneta há mudança no batimento do mancal 3) – 3,0 s.
10. Entrada do avanço lento 2 até 0,050mm do diâmetro final – 16 s.
11. Pausa – 1,0 s.
12. Entrada do micro avanço até 0,005mm do diâmetro final – 19 s.
13. Centelhamento - 2,5 s.
14. Recuo do cabeçote porta rebolos / parada do giro da peça – 3,0 s.
15. Orientação angular da placa / peça – 2,5 s.
16. Abertura de castanhas da placa e recuo contra ponta com a peça – 4 s.
17. Descarga automática – 7,0 s.

### **Tempo total do ciclo: 1 min 28,5 segundos**

Onde: 39 segundos ou 44 % do tempo do ciclo não há remoção de material e 49 segundos ou 56 % do tempo do ciclo com remoção de material.

Este tempo de ciclo não considera ainda o tempo de dressagem, que é feita a cada 30 peças, com uma duração de 2 min e 50 segundos. Este tempo dividido por peça representa um acréscimo de 5,7 segundos no tempo de cada peça e, portanto, diluindo-se o tempo da operação de dressagem pelo número de peças do intervalo de dressagem o tempo de cada peça passa a 1 minuto e 34,2 segundos. O tempo total de dressagem considera os tempos com e sem remoção de material, ou seja, os tempos onde realmente o dressador está sobre o rebolo como também os tempos onde o agulha seguidora (que está ligada ao dressador) está passando de uma cópia (chapelona) para a outra em avanço rápido e também o tempo de incremento na profundidade de dressagem tanto na ida como na volta. Dos 170 segundos do ciclo total de dressagem apenas 105 segundos são de remoção efetiva de material, ou seja 62% do tempo está havendo remoção de material do rebolo.

As etapas 1, 2, 3, 4, 8, 14, 15, 16, 17 estão relacionadas com a sequência funcional da máquina, onde não há remoção de material da peça e não serão objetos de estudo neste trabalho.

Não é objetivo deste trabalho conseguir aumento de produtividade com prejuízo na qualidade da peça, ou seja, os valores iniciais relativos a diâmetros, circularidade e rugosidade devem ser mantidos antes e após os testes, logicamente dentro de uma certa faixa de erro. Erros de circularidade e rugosidade são medidos em máquinas especiais e por serem tolerâncias baixas, na faixa de micra, aumentam o erro de R&R (ensaios de reprodutibilidade e repetibilidade para equipamentos de medição) destas máquinas, que também é influenciado pelo processo de alinhamento e nivelamento que deve ser feito na peça quando posicionada para medição de circularidade.

Em todas as medições realizadas a preparação do equipamento de medição consistiu apenas no alinhamento da linha de centro da peça no centro da mesa do sistema de medição e, portanto, o ajuste do nivelamento da mesa de medição foi mantido fixo (após ajustado com uma peça padrão), o que com certeza está sempre aumentando o resultado encontrado de circularidade, pois o batimento axial na extremidade de encosto na mesa de medição inclina a peça e aumenta o erro de circularidade. Porém este aumento do erro sempre foi considerado desprezível e, portanto, foram mantidos os mesmos métodos de controle de circularidade



utilizados antes de se iniciar este trabalho. Achar o mesmo local ou a mesma secção transversal controlada nas várias medições também é difícil e isto contribui para o aumento da dispersão dos resultados das medições de circularidade e rugosidade.

Um desvio de 15% na medição é considerado aceitável. Portanto, se o resultado dos testes após otimização ainda estiver acima ou abaixo do valor inicial para mais ou para menos de 15% isto será considerado aceitável, tanto no caso da circularidade, como no caso da rugosidade.

A etapa número 5, de aproximação rápida até 0,65 mm do diâmetro final da peça também não será alterada pois como as peças chegam nesta operação com um diâmetro pré-retificado (retificado em desbaste) com um sobremetal de  $0,5 \pm 0,03$  mm e mais um batimento radial de 0,10 mm, é necessária uma reserva de 0,05 mm para se evitar possíveis colisões do eixo porta rebolos com a peça a ser usinada. A velocidade de avanço rápido também não é um parâmetro alterável por ser uma etapa muito rápida, cujo aumento de riscos gerado com o aumento da velocidade não compensa um pequeno ganho de produtividade. Além disto, esta etapa dura somente 2 segundos, o que representa cerca de 2,0 % do valor do ciclo total.

As etapas de pausa 7 e 11, que são etapas intermediárias entre mudanças de direção de avanço ou de mudança radical no valor da velocidade de avanço também não serão alteradas. São valores pequenos, necessários para garantir o correto processamento das informações de posição do rebolo, entrada de luneta e garfos, etc. no controlador lógico programável da máquina. Portanto, novamente, alterar estes valores representam um risco desnecessário devido ao baixo retorno de produtividade resultante, embora haja remoção de material durante estas etapas, que indiretamente atuam como centelhamentos no meio do ciclo.

A etapa 8 é necessária para que não ocorra colisão quando da entrada da luneta para a parte final do ciclo. Esta luneta tem avanço hidráulico com limitador mecânico, que serve para regulagem do diâmetro do mancal central, pois os garfos estão nos mancais da extremidade e os diâmetros dos mancais centrais podem ficar fora do especificado com um possível empenamento exagerado do eixo. Portanto, a luneta suporta estes esforços e permite regulagens para ajuste de tolerâncias de diâmetro, batimento do eixo e também circularidade da peça. Após

a entrada da luneta, o eixo porta rebolos deve terminar seu avanço rápido de reaproximação em um diâmetro mais longe daquele até onde a máquina havia retificado, pois a luneta altera o batimento da peça por ter um valor fixo ajustado, que normalmente é o diâmetro final da peça mais alguns centésimos de pressão (em torno de 0,02 mm).

Restam portanto, as etapas 6, 9, 10, 12, 13 que são as etapas do ciclo onde estão os avanços de corte e onde realmente está ocorrendo remoção de material da peça. Estas etapas juntas representam mais de 50 % do tempo de ciclo (49,5 s), sem considerar o tempo diluído por peça, relativo à dressagem.

A etapa 6, de avanço 1, desde 0,65 mm até 0,30 mm do diâmetro final, tem o avanço de corte mais alto de todo o ciclo, 0,05 mm/s no diâmetro, o que significa que o cabeçote porta rebolos está avançando com velocidade de avanço  $V_f = 0,025$  mm/s. É a etapa de maior produtividade, pois com os valores atuais programados na máquina ele remove 40% do sobremetal em apenas 7 segundos. Portanto, quanto mais rápido for este avanço e quanto mais material (sobremetal) ele remover menor será o tempo de ciclo.

Os testes 1 e 3 envolvem alterações nesta etapa do ciclo pois no caso do teste 1 será aumentado progressivamente o valor do avanço 1 partindo do valor inicial de  $V_f = 0,025$  mm/s e, observando-se os resultados de qualidade.

No teste 3 será estudado os efeitos de um prolongamento do avanço 1, ou seja, prolongar-se-á este avanço até mais próximo da medida final e também serão analisados os resultados de qualidade.

A etapa 9 dura 3,0 segundos e uma otimização nesta etapa estaria mais relacionado com um ganho na etapa anterior, a etapa 6. Logicamente se conseguir-se ir até mais longe com o avanço 1, pode-se fazer a reaproximação do rebolo, após entrada da luneta e garfos, de maneira a manter o mesmo espaço de segurança existente antes da modificação devido às incertezas dimensionais geradas com a entrada da luneta. Em outras palavras, a duração do avanço rápido

de reaproximação será prolongada e o eixo porta rebolos irá até os mesmos 0,10 mm acima da medida deixada pelo avanço 1.

A etapa 10 é o segundo avanço de corte ou avanço médio, onde após a entrada da luneta e portanto, já com a rigidez do sistema definido pois a luneta já está regulada com a medida final da peça, a peça é levada à dimensão 0,05 mm acima da medida final. Tem alta influência no tempo total do ciclo, pois dura 16 segundos. É nesta etapa que o diâmetro passa a ser controlado através dos medidores em processo. Serão estudados, através do teste 2, os efeitos do aumento do avanço nesta etapa do ciclo, mas não será alterado o ponto final quando há troca do avanço médio para o avanço de acabamento ou micro avanço.

A etapa seguinte, a etapa 12, é a de maior tempo, 19 segundos. Nesta etapa de micro avanço o eixo porta rebolos pode ter um movimento de compensação, pois devido à retificação simultânea dos 5 mancais (todos devem estar dentro das especificações do diâmetro), o equipamento de medição em processo faz uma leitura nos diâmetros dos dois mancais extremos, onde os medidores em processo estão fixados e, se houver diferença entre eles, um sistema de avanço que fica acoplado ao mancal hidrostático, faz um movimento em apenas um dos mancais deslocando todo o eixo e corrigindo os diâmetros. Esta compensação depende do ajuste das chapelonas de dressagem dos rebolos, das condições de retificação e muitas vezes pode custar um tempo razoável no processo, pois a máquina diminui a velocidade do micro avanço praticamente a zero para fazer esta compensação.

É durante o micro avanço que grande parte das deformações são corrigidas, devido ao baixo avanço, que funciona com um centelhamento adiantado mas prolongado. Conforme já descrito acima, esta etapa de microavanço pode durar muito se houver necessidade de grande compensação do eixo portarebolos. O objetivo deste estudo nesta etapa é verificar o tempo mínimo necessário de micro avanço que garanta as qualidades da peça final.

A etapa 13 é o centelhamento, onde o diâmetro da peça atinge seu valor especificado. Esta etapa é iniciada com 0,005 mm acima do diâmetro final, controlado pelo medidor em processo, dura em torno de 2,0 segundos, não é muito representativa no tempo total do processo, além do

que um tempo mínimo de centelhamento é indispensável para uma boa qualidade e, portanto, não será alterado o seu valor.

#### **4.3) – Sumário dos testes realizados**

Foram realizados 4 testes na retificadora de mancais de virabrequins, como segue:

**Teste 1** – Aumento da velocidade de avanço 1, ou avanço de desbaste, que corresponde à etapa 6 do ciclo de retificação. Inicialmente está programado em 0,025 mm/s e será alterado para 0,0275 mm/s e depois para 0,030 mm/s.

**Teste 2** – Aumento da velocidade de avanço 2, ou avanço de semi-acabamento, que corresponde à etapa 10 do ciclo de retificação. Inicialmente está programado em 0,011 mm/s e será alterado para 0,013 mm/s e depois para 0,015 mm/s.

**Teste 3** – Prolongamento da velocidade de avanço 1 até dimensões mais próximas da medida final da peça, ou seja aumento do volume de sobremetal removido com avanço 1. Inicialmente o cabeçote porta rebolos avança com velocidade de avanço 1 até faltarem 0,30 mm para a dimensão final da peça e será alterado visando estender a velocidade de avanço 1 até faltar 0,24 mm para a dimensão final e depois 0,19 mm.

**Teste 4** – Aumento do passo de dressagem de ida do dressador. O passo inicial de dressagem durante a ida do dressador está em 0,22 mm / volta e será alterado para 0,25 mm/volta e depois para 0,275 mm./volta.

#### 4.4) – Resultados e discussões

##### Teste 1 – Aumento de avanço 1

Durante este teste foram mantidos constantes todos os parâmetros do ciclo, exceto o valor do avanço 1, que foi aumentando, partindo do valor inicial de  $V_f = 0,025$  mm/s passando por  $V_f = 0,0275$  mm/s e  $V_f = 0,030$  mm/s. Foram realizadas medições de circularidade e rugosidade ( $R_a$ ) em cada uma destas condições. As figuras 4.3 e 4.4 mostram respectivamente estes valores contra o número de peças retificadas entre dressagens.

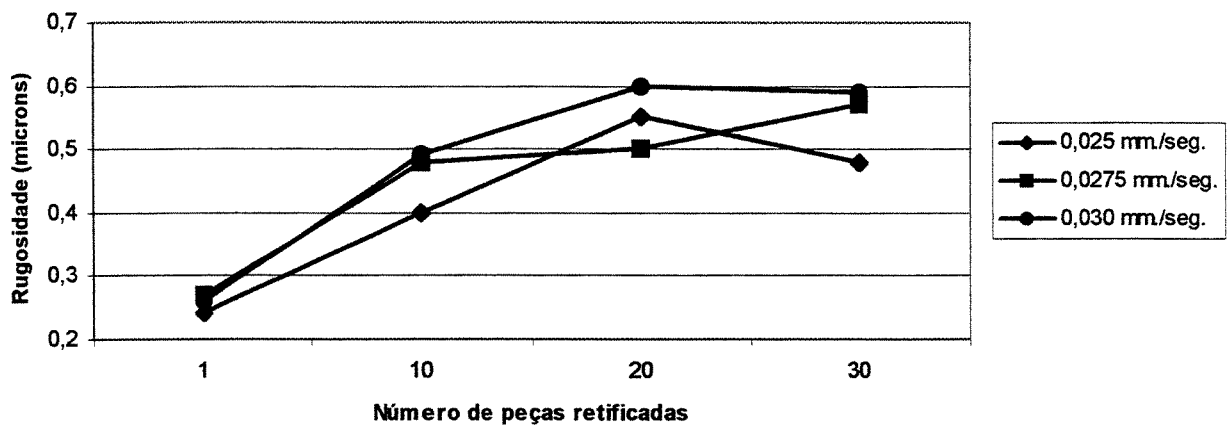


Fig. 4.3: Rugosidade x número de peças retificadas com avanço 1 variável

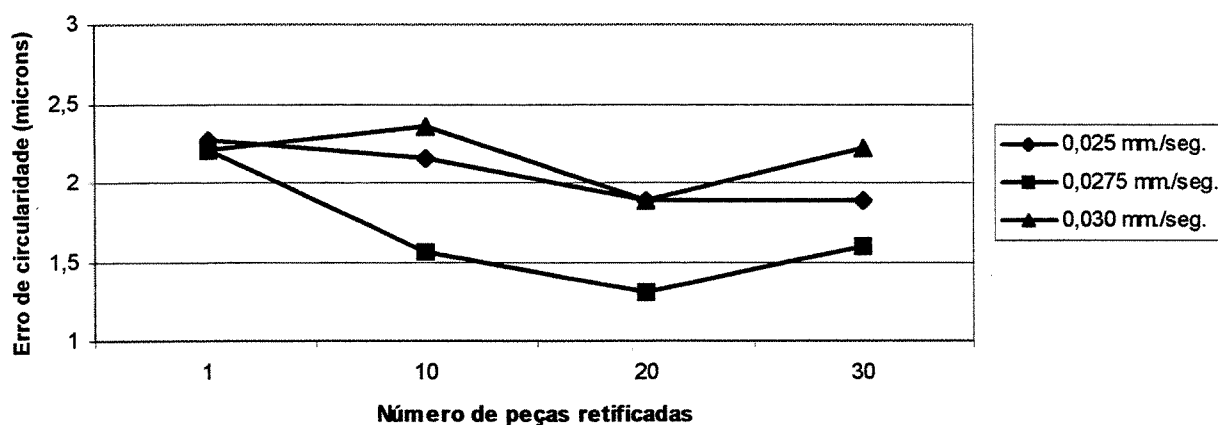


Fig. 4.4: Circularidade x número de peças retificadas com avanço 1 variável

Pode-se ver na figura 4.3 que a rugosidade alcança o valor máximo especificado ( $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ ) quando se está retificando em torno da trigésima peça e, baseado nisto, considera-se adequado para o momento a frequência de dressagem programada de dressagem a cada 30 peças. Ainda conforme a figura 4.3 nota-se que há uma piora considerável na rugosidade após a retificação de algumas peças. Porém quando se está usinando as últimas peças relativas aquele intervalo há uma tendência de estabilização.

A deterioração inicial da rugosidade provavelmente prende-se ao fato da perda de afiação do rebolo. Como o rebolo utilizado possui de média para alta dureza (dureza M), a perda de afiação se sobrepõe à sua perda volumétrica e a rugosidade cresce bastante. Quando o rebolo já está bastante desgastado, a perda de afiação é atenuada e a rugosidade se estabiliza. Ainda pode-se verificar na figura 4.3 que a variação de  $R_a$  com a velocidade de avanço é muito pequena.

Não houve alterações significantes nos valores de circularidade com o aumento do avanço 1, até valores da casa de 0,030 mm/s (vide figura 4.4), quando ultrapassou-se o limite de 15% do valor inicial de circularidade que estava em torno de  $2,0 \mu\text{m}$  e após o teste passa de  $2,3 \mu\text{m}$ , apesar de se estar ainda dentro do especificado. Porém é interessante notar que o comportamento da circularidade com o número de peças usinadas é exatamente o oposto da rugosidade, isto é, tem uma queda inicial para depois se estabilizar. Há que se notar que o valor intermediário de

avanço é que proporcionou a menor circularidade durante o transcorrer da vida da ferramenta. Porém como aqui está se tratando de diferenças da ordem de  $0,5\ \mu\text{m}$  de circularidade, diferenças difíceis de serem medidas mesmo com a medidora de forma de alta precisão utilizadas neste trabalho, pode-se afirmar que não houve variação significativa da circularidade quando se variou a velocidade de avanço.

Outro aspecto interessante a se ressaltar neste teste 1, é de que o ganho de produtividade com o aumento do avanço 1 não está relacionado somente com a redução do tempo de usinagem nesta etapa, mas também com redução do tempo necessário para a etapa 12, de micro avanço. A explicação para este fenômeno é de que com o aumento do avanço 1, houve um aumento na deformação total do sistema e como o micro avanço também age como um centelhamento antecipado e prolongado, é durante esta etapa que as deformações são compensadas. Com o aumento da deformação inicial do sistema, a taxa real de remoção de material durante o micro avanço aumenta, ou seja, a velocidade programada do micro avanço se mantém, porém a taxa de retorno das deformações aumenta, diminuindo o tempo de ciclo desta etapa, que termina quando o diâmetro da peça chega a  $0,005\ \text{mm}$  do diâmetro final. Nota-se que quando atinge-se a valores de  $V_f = 0,03\ \text{mm/s}$ , a circularidade tende a aumentar o que se explica pelo fato de se estar diminuindo o tempo de micro avanço, que começa a afetar a circularidade, pois há maior influência de deformações residuais não eliminadas na qualidade da peça. Mesmo assim decidiu-se utilizar nas próximas operações  $V_f = 0,03\ \text{mm/s}$ , já que esta condição ainda consegue manter as peças retificadas dentro dos limites estabelecidos de qualidade.

O ganho de produtividade conseguido com este teste 1 pode ser considerado bom, pois obteve-se uma redução dos tempos da etapa 6 (avanço 1), de  $7,0\ \text{s}$  para  $6,0\ \text{s}$  e da etapa 12 (micro avanço), de  $19,0\ \text{s}$  para  $17,5\ \text{s}$ , chegando a  $2,5\ \text{s}$  de redução do tempo de ciclo, o que representa em torno de  $2,8\ \%$  de redução do tempo total do ciclo. A fig. 4.5 mostra alguns gráficos de circularidade obtidos neste teste:

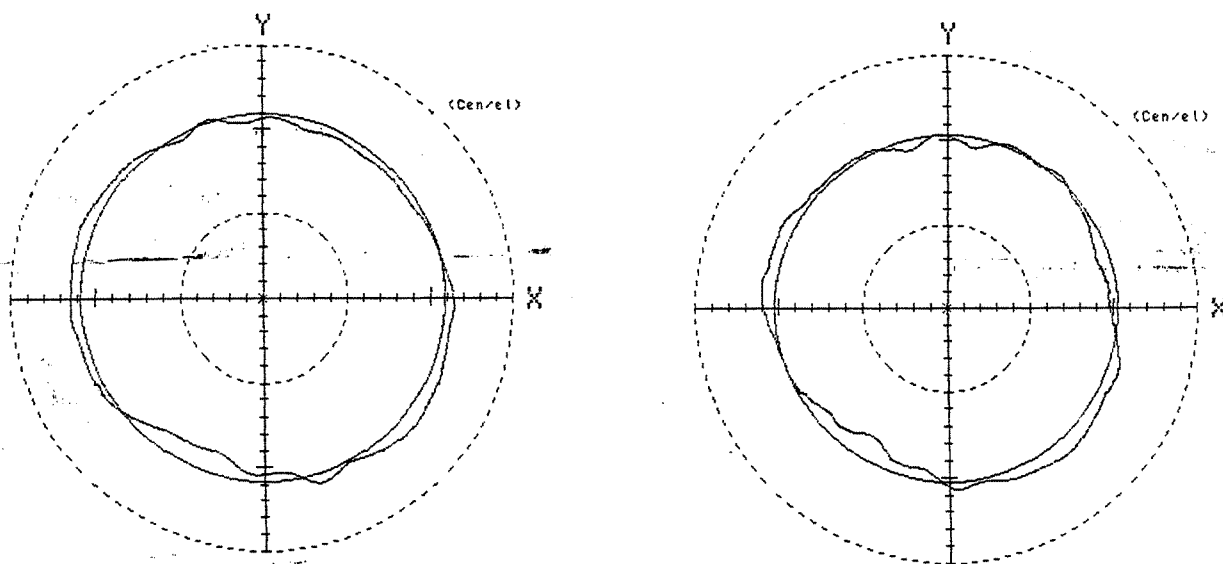


Fig. 4.5: Gráficos do teste 1

### Teste 2 – Aumento de avanço 2

Durante o teste 2 foram mantidos fixos todos os parâmetros, inclusive o avanço 1 foi mantido com 0,03 mm/s, que já é o valor otimizado no teste 1, e foi alterado o valor do avanço 2, que inicialmente era 0,011 mm/s, para 0,013 mm/s e 0,015 mm/s.

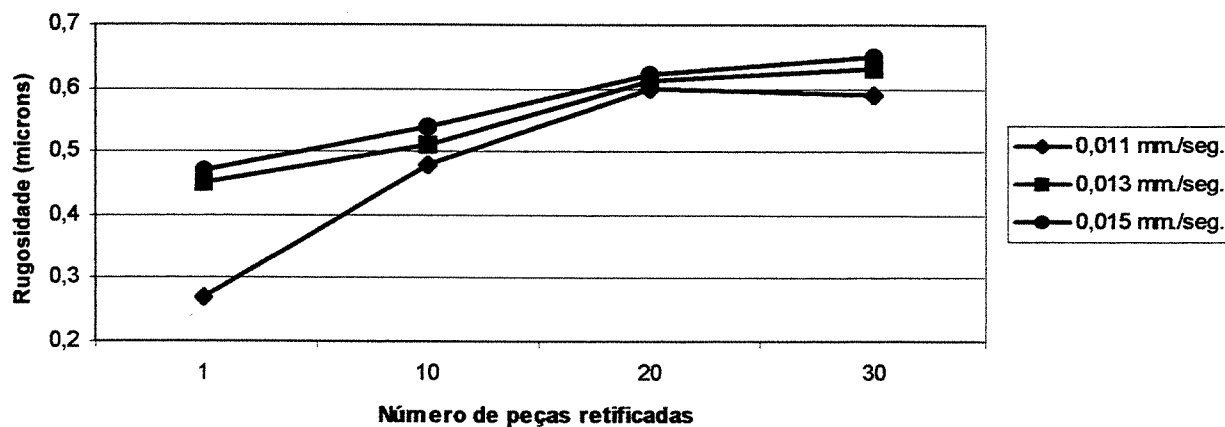


Fig. 4.6: Rugosidade x número de peças retificadas



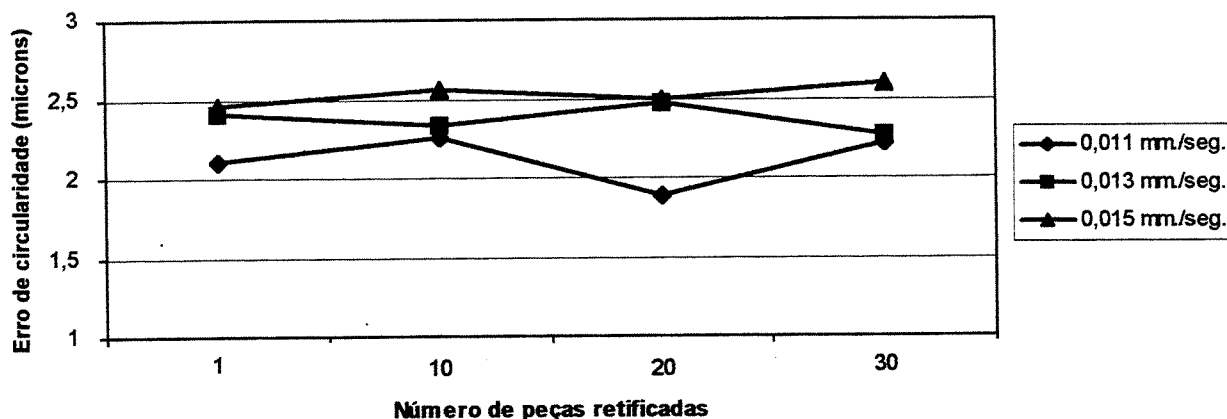


Fig. 4.7: Circularidade x número de peças retificadas

Analisando-se as figuras 4.6 e 4.7 nota-se que este teste não trouxe bons resultados de rugosidade e também circularidade.

O comportamento da rugosidade com o número de peças usinadas continua o mesmo do teste 1, com um crescimento inicial e posterior tendência à estabilização, mas ao se utilizar uma velocidade de avanço maior que a inicial ( $V_f = 0,011$  mm/s) a vida da ferramenta em número de peças usinadas entre dressagens, tem que ser reduzida para 20 ou 25 peças, para que o limite de rugosidade ( $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ ) não seja ultrapassado.

Com relação à circularidade (figura 4.7), nota-se que ela teve um comportamento quase que estável em todas as velocidades de avanço testadas, mas somente com  $V_f = 0,011$  mm/s o valor da circularidade foi seguramente menor que o limite permitido ( $2,5 \mu\text{m}$ ).

O aumento do avanço 2, que é um avanço médio, diminui bastante o tempo da etapa 12, de micro avanço e, portanto, indicando que a deformação gerada com o aumento do avanço 2 foi grande, impossível de ser recuperada durante a etapa de micro avanço a ponto de garantir a qualidade requerida na peça.

O valor de avanço 2 foi retornado ao valor inicial de 0,011mm/s, para que se continue os testes com a máquina ainda produzindo peças dentro do especificado, sem riscos de se aumentar o número de peças rejeitadas devido ao erro de circularidade. Pode-se concluir então que a velocidade de avanço 2 que já vinha sendo utilizada estava em seu limite, não podendo ser aumentada sem que a qualidade das peças fosse comprometida. A figura 4.8 mostra alguns gráficos obtidos no teste 2:

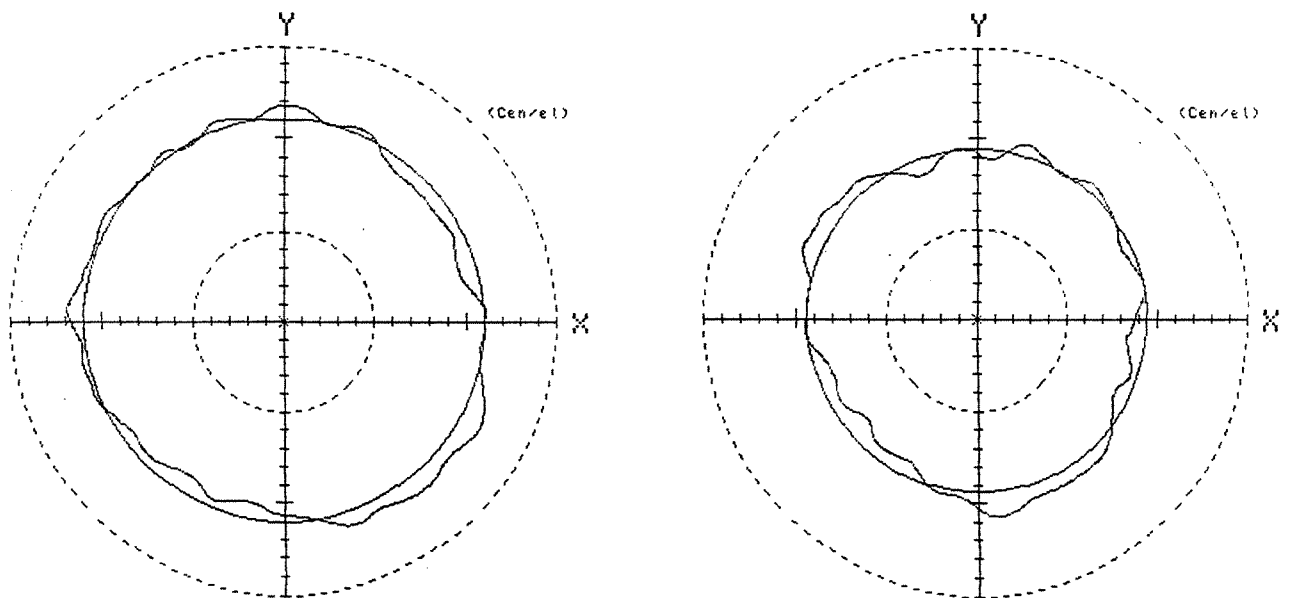


Fig. 4.8: Gráficos do teste 2

### Teste 3 – Mudança do ponto de troca do avanço 1

Este teste visa prolongar a duração da etapa 6, com avanço 1, mantendo-se os valores já otimizados no teste 1. O avanço 1 inicialmente é mantido até que o diâmetro sendo usinado esteja com uma medida 0,3 mm maior que a medida da peça acabada, quando o cabeçote recua 2,0 mm para entrada da luneta e garfos e depois reavança rápido até 0,4 mm do diâmetro final. Este mesmo avanço 1 foi alterado para ir até 0,24 mm do diâmetro final e depois para 0,19 mm do diâmetro final e o reavanço rápido é sempre alterado para voltar até 0,10 mm acima do ponto de parada.

As figuras 4.9 e 4.10 mostram, respectivamente os valores de rugosidade (Ra) e circularidade contra o número de peças retificadas para cada um dos sobremetais deixados na peça após a etapa 6

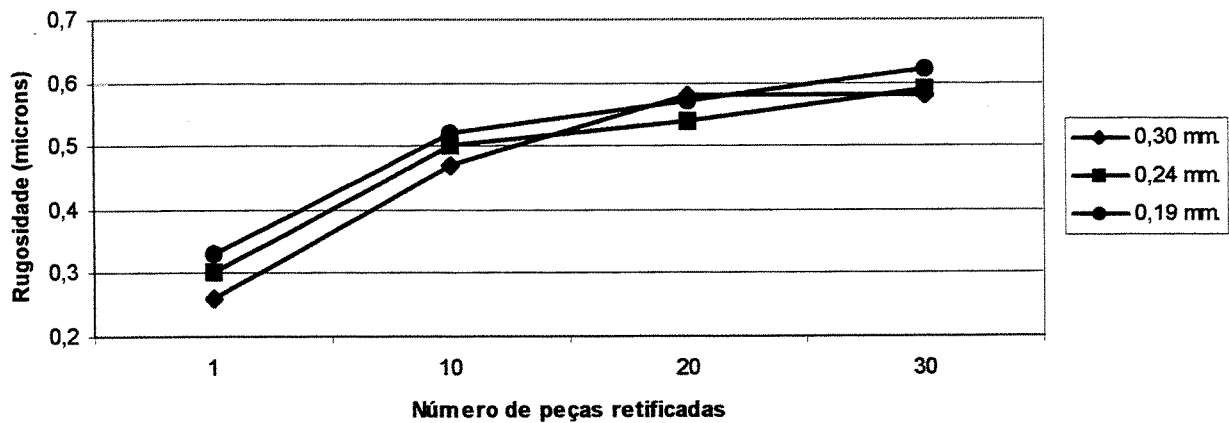


Fig. 4.9: Rugosidade x número de peças retificadas

A figura 4.9 mostra que a rugosidade permanece com o mesmo comportamento contra o número de peças retificadas dos outros testes, isto é, aumento rápido inicial e posterior estabilização. Outro fato que pode ser verificado nesta figura é que o sobremetal deixado pela etapa 6 (avanço 1) não tem praticamente influência na rugosidade das peças e, portanto, no que diz respeito à rugosidade, o menor sobremetal deixado pela etapa 6 pode ser utilizado, sem dano à qualidade da peça.

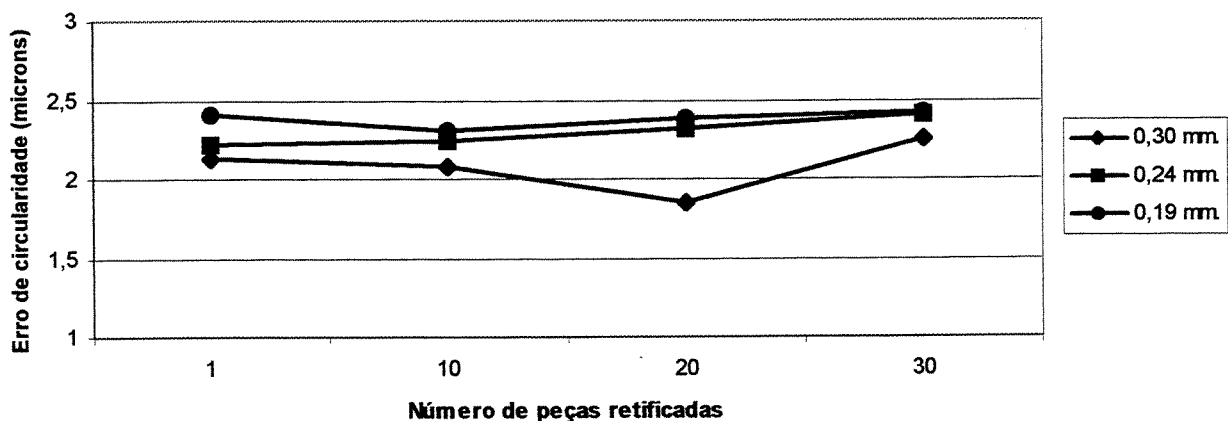


Fig. 4.10: Circularidade x número de peças retificadas

Pode-se notar através da fig. 4.10, que não houve grandes alterações nos valores de circularidade quando aumenta-se o sobrematerial retirado pelo avanço 1, com uma ligeira tendência ao aumento do erro de circularidade a medida que se aproxima o avanço 1 da medida final da peça. Porém, o tempo de ciclo ganho com o prolongamento da posição de parada do avanço 1 é significativo e, portanto, a posição de parada do avanço 1 a 0,24 mm da medida final foi aprovado. Crê-se que mesmo o sobremetal de 0,19 mm poderia ter sido utilizado para as operações posteriores, mas preferiu-se optar a favor da segurança e adotar-se o valor de 0,24 mm como o sobremetal deixado pela etapa 6.

#### Teste 4 - Mudança do passo de dressagem durante a ida do dressador

Foi aumentado o passo de dressagem da ida do dressador e foi mantido constante o passo de dressagem do retorno do dressador, e portanto não foi alterado o grau de recobrimento (Ud). Este procedimento foi adotado pois é no retorno do dressador que são gerados o macro e o micro efeito da dressagem e a primeira passada do dressador somente serve para se limpar o rebolo dos cavacos impregnados nos poros e portanto preparar o rebolo para o passe de retorno. Assim o passe de ida do dressador não deve influenciar na agressividade do rebolo e deve ser colocado no limite em que não danifique o dressador. Este teste visa confirmar esta afirmação. O valor inicial do passo de ida era de 0,22 mm/volta e foi alterado para 0,25 mm/volta e depois para 0,275 mm/volta, o que gerou uma economia de 8,0 s no tempo de ciclo da operação de dressagem. A figura 4.11 mostra os valores de rugosidade obtidos com o teste 4:

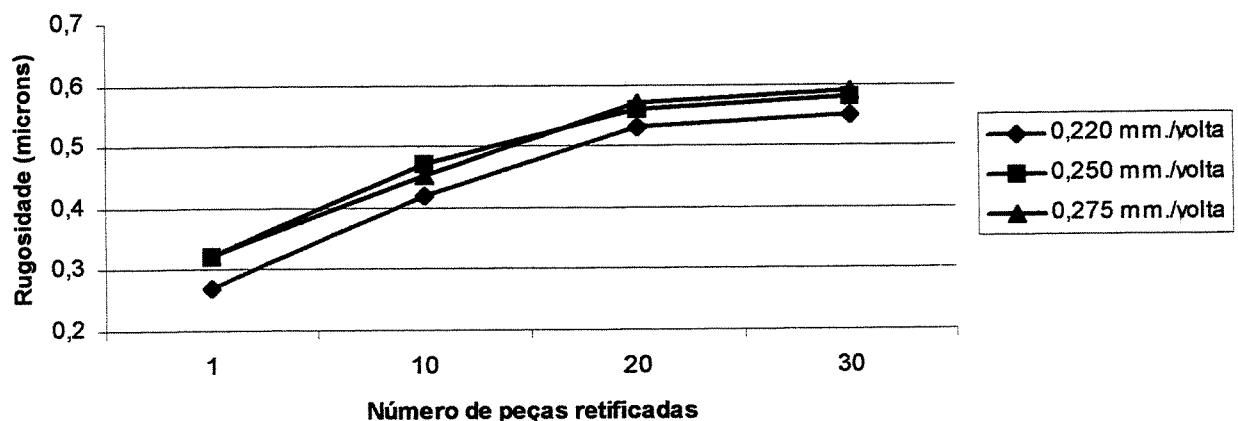


Fig. 4.11 : Rugosidade para vários valores de passo de dressagem de ida

Conforme observado não houve grandes alterações na rugosidade com o aumento do passo de dressagem de ida. Portanto, a condição de dressagem otimizada fica então com passo de dressagem de ida de 0,275 mm/volta com intervalo de dressagem de 30 peças. Com este procedimento conseguiu-se uma diminuição de 8,0 s no tempo de dressagem, o que representa diminuição de 0,27 s no tempo de cada peça, já que são retificadas 30 peças entre duas dressagens consecutivas. A figura 4.12 mostra os valores de circularidade relativos a este teste, que não apresentou grandes variações.

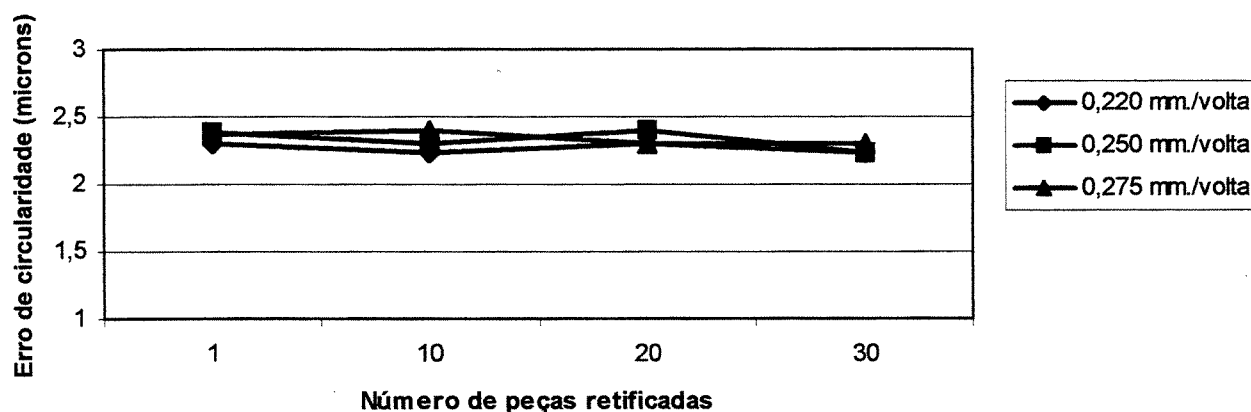


Fig. 4.12 : Circularidade para vários valores de passo de dressagem de ida

### **Tempo de ciclo da máquina após a otimização**

O tempo de ciclo da máquina após a otimização ficou então, conforme descrito abaixo:

- 1- Carga automática da peça – 10 s.
- 2- Posicionamento axial da peça via contra-ponta – 2,0 s.
- 3- Fechamento de castanhas da placa porta-peça – 1,5 s.
- 4- Posicionamento axial da mesa via cabeça de medição axial – 4,0 s.
- 5- Avanço rápido do cabeçote com eixo porta rebolos, até 0,65mm do diâmetro final da peça, e início de rotação da peça – 2,0 s.
- 6- Entrada de avanço lento 1, vai até 0,24mm do diâmetro final da peça – 8,0 s.
- 7- Pausa – 1,0 s.
- 8- Recuo rápido do cabeçote porta rebolos até 2,0mm do diâmetro final para entrada da luneta de sustentação radial e medidores em processo nos mancais 1 e 5 – 3,0 s.
- 9- Avanço rápido até 0,34mm. do diâmetro final (com a entrada da luneta há mudança no batimento do mancal 3) – 3,0 s.
- 10- Entrada do avanço lento 2 até 0,050mm. do diâmetro final – 13 s.
- 11- Pausa – 1,0 s.
- 12- Entrada do micro avanço até 0,005mm do diâmetro final – 15 s.
- 13- Centelhamento - 2,5 s.
- 14- Recuo do cabeçote porta rebolos / parada do giro da peça – 3,0 s.
- 15- Orientação angular da placa / peça – 2,5 s.
- 16- Abertura de castanhas da placa e recuo contra ponta com a peça – 4,0 s.
- 17- Descarga automática e carregamento de nova peça – 7,0 s.

Resumindo, houve um aumento no tempo da etapa 6 em 1,0 s devido ao aumento do sobremetal removido durante esta etapa, porém reduziu-se os tempos da etapa 10 em 3,0 s e da etapa 12 em 4,0 s, o que representa um ganho de 6,0 s no tempo total do ciclo (6,8% do tempo total do ciclo sem considerar a dressagem). Por outro lado, se forem consideradas apenas as etapas onde há remoção de material, que foram as etapas estudadas neste trabalho, foi gerado um ganho de tempo nestas etapas em torno de 12,1%.

Anteriormente a este processo de otimização a dressagem era feita a cada 30 peças e durava 170 s, o que representava um acréscimo de 5,67 s no tempo de cada peça. Após a otimização o tempo de dressagem passou a ser de 162 s. Assim, o tempo de dressagem que deve ser acrescido ao tempo de ciclo de uma peça passou a ser 5,4 s. Com isso o tempo de ciclo da peça foi reduzido em mais 0,27 s e o tempo total de redução do ciclo passou a ser de 6,27 s, ou seja, 6,7% do tempo de ciclo total e 11,4% de redução de tempo de ciclo considerando-se apenas as etapas com remoção de material, incluindo a dressagem.

Este processo otimizado está sendo atualmente utilizado nesta retificadora de virabrequins, o que garantiu uma diminuição do tempo de ciclo da máquina gargalo da parte de acabamento da linha em 6,7% e consequentemente gerou um aumento da capacidade produtiva no mesmo valor naquele setor da linha, sem grandes investimentos, ou seja, somente com a adequação dos avanços e posições de troca.

### **Considerações sobre a influência dos parâmetros de entrada do processo na qualidade da peça**

Antes de se terminar este capítulo é importante resumir-se alguns pontos verificados, que são:

- Em geral os valores de velocidade de avanço tanto do desbaste (etapa 6), quanto do semi-acabamento (etapa 10) influenciaram muito pouco na rugosidade e na circularidade das peças retificadas. Isto se deve ao fato de que a qualidade da peça é obtida nas etapas de micro-avanço e centelhamento. Como estas fases são somente indiretamente influenciadas pelas fases

iniciais do processo, a qualidade da peça pouco se altera pela variação das condições de usinagem do desbaste e do semi-acabamento. É lógico que a qualidade da peça é mais influenciada pela fase de semi-acabamento do que pela fase de desbaste, como foi visto no teste 2. O mesmo pode ser afirmado com relação ao sobremetal deixado na peça pela fase de desbaste (etapa 6), isto é, sua variação dentro de alguns limites influenciou muito pouco a qualidade da peça.

- O desgaste do rebolo influencia bastante a rugosidade da peça (vide figuras 4.), mas não influencia sua circularidade (vide figuras 4.). Isto pode ser explicado pelo fato de que os rebolos utilizados eram relativamente duros e o grau de recobrimento de dressagem ( $U_d \sim 3$ ) não permitiu que se tivesse muito macro efeito de dressagem. Assim, a medida que o corte ocorria, praticamente somente perda de afiação do rebolo acontecia (sem perda volumétrica significativa, devido à alta dureza do rebolo) e esta perda de afiação somente se dava no nível do micro efeito (já que praticamente não havia macro efeito). Isto causava o aumento da rugosidade, já que um grão pouco agressivo causa aumento da fase de riscamento (deformação plástica) durante a formação do cavaco. A circularidade não variou com o desgaste do rebolo já que, muito provavelmente, este desgaste ocorria de maneira bastante uniforme ao longo de todo o perímetro do rebolo.



## **CAPÍTULO 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros**

De acordo com os resultados dos testes realizados pode-se concluir alguns pontos sobre o ciclo de retificação cilíndrica de mergulho, no que se refere a otimização do tempo de ciclo. O ciclo de produção permite dizer que a deformação do sistema de retificação (máquina / rebolo / peça) existe e afeta a qualidade final da peça produzida. Porém, é sabido que as deformações são minimizadas com a diminuição dos avanços no final do ciclo e com o tempo de centelhamento. A maneira mais rápida de se minimizar uma mesma quantidade de deformações foi resumidamente o objetivo deste trabalho. Pode-se concluir então, através deste trabalho que, para condições de trabalho similares às aquelas aqui utilizadas:

- O aumento do avanço de desbaste é um ponto onde se consegue otimização, pois a deformação gerada nesta etapa de início de ciclo, tem todo o restante do tempo de ciclo para se recuperar e, portanto, normalmente não afeta a qualidade final da peça.
- O prolongamento do avanço inicial (diminuição do sobremetal deixado para as próximas etapas) também trouxe bons resultados, pois reafirma a possibilidade da recuperação das deformações e deu indicações de até onde foi possível postergar a duração do avanço de desbaste.
- O avanço do passe de ida de dressagem não influencia a agressividade do rebolo e, portanto, não tem consequência na qualidade final da peça.
- O desgaste do rebolo praticamente não tem influência na circularidade das peças retificadas, mas tem uma forte influência nas suas rugosidades.
- A deformação gerada com o aumento do avanço de semi-acabamento (avanço 2), já não trouxe resultados compensadores, pois começa-se a correr o risco de afetar a qualidade da peça, embora a influência não seja tão direta como as dos avanços de acabamento. O avanço de semi-acabamento entra no ciclo de retificação quando a luneta já está em contato com a peça e a pressão exercida pela luneta está regulada de acordo com as medidas finais da peça. Além da

luneta, os medidores em processo já estão sobre os respectivos diâmetros e será nesta situação que a peça é acabada. Portanto, o avanço 2 está mais próximo da etapa de acabamento da peça (é usado até faltar 0,050 mm para a medida final) e por este motivo não houve sucesso no aumento deste avanço, que já se encontrava próximo aos valores limite para se garantir a qualidade.

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se que definir um ponto de mínimo tempo utilizando parcelas diferentes de cada um dos testes, ou seja, aumentar o avanço inicial ou mantê-lo menor por mais tempo. Com certeza alguma formulação que defina uma relação entre a deformação gerada por cada teste, pode minimizar o tempo. Pode ser explorada também a oportunidade de se achar um ponto que proporcione um mínimo tempo de ciclo através de uma relação diferente entre a magnitude do avanço 2 e seu ponto de troca para o micro avanço e isto pode ser trabalhado no futuro. Porém, o próximo ponto de troca já será para a entrada do micro avanço, que apesar de ainda longo (em torno de 15 s) aparenta ser a etapa onde tudo se resolve para se conseguir a qualidade desejada e, portanto, deve ser tratado com grande cuidado pois as influências na qualidade final da peça agora são diretas.

Após o micro avanço existe um pequeno tempo de centelhamento (2,5 s), que também influi muito na qualidade da peça. Por prever grandes problemas não foram feitos testes nestas etapas de micro avanço e centelhamento.

- A operação de dressagem também deve ser sempre considerada em processos de otimização, pois suas contribuições normalmente existem embora em grande parte dos casos sejam pequenas no tempo de ciclo da peça. O passo de dressagem de ida não mostrou grandes relações com a qualidade da peça e portanto pode-se trabalhar bastante com ele.

Não foi possível neste trabalho utilizar-se diversas condições de agressividade do rebolo (Ud) porém estes parâmetros além do tipo de dressador e da especificação do rebolo, podem mudar os resultados de rugosidade. Estas mudanças podem permitir otimizações nos passos de dressagem tanto na ida como na volta do dressador, sem afetar a qualidade.

Foi acrescentado ao trabalho, durante o exame de qualificação, a idéia de se estudar a possibilidade da eliminação total do avanço 1 através da melhoria da qualidade dimensional das operações anteriores e conseqüentemente diminuição do sobremetal para esta operação e, desta maneira, eliminar o tempo necessário para entrada da luneta durante o ciclo

## BIBLIOGRAFIA

- Agostinho, O.L., Rodrigues, A.C.S., Lirani, J., 1977, “Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análises de Dimensões”, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, Brasil.
- Aronson, R., 1997, “Grinding is going Hi-Tech”, Manufacturing Engineering, February, 1997.
- Aronson, R., 1997, “New technologies boost cylindrical grinding”, Manufacturing Engineering, July, 1997.
- Baldo, E. D., Diniz, A.E., 1995, “Reducing the plunge cylindrical grinding time using acoustic emission monitoring”, RBCM – Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. XVII, pp 304-313, 1995.
- Baril, R., 1987, “Grinding”, Modern machining Technology, Delmar Publishers, New York, USA.
- Bianchi, E.C., Dias, A.C.P., Bortoloto, R.G., Fernandes, O.C., Silva, C.E., Aguiar, P.R., Vieira, M., 1998, “Análise do comportamento de rebolos convencionais em função dos Parâmetros de usinagem e do tipo de ligante”, Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Vol. XX – No.3 – Setembro 1998.
- Catálogo Marposs “Controls and gauges for grinding machines”, 1997.
- Catálogo Marposs “E20N – Control de fin de corte en aire”, 1995.
- Catálogo Landis “Multi-wheel grinding machine”, 1996.
- Catálogo Norton “Operação de Precisão”, 1991.
- Catálogo Norton “Retificação de girabrequim”, 1991.
- Coelho, R.T., Silva, C.E., “Dressagem de rebolos para aplicações de precisão”, Máquinas e Metais, Outubro, 1998.
- Diniz, A.E., Novaski, O., 1999, “Processos Abrasivos de Usinagem”, - Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., 1999, “Tecnologia da usinagem dos materiais”, MM editora, São Paulo, Brasil.

- Dornfeld, D.A., Cai, H.G. “An investigation of grinding and wheel loading using acoustic emission” – Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 106 pp 28-33, February 1984.
- Gomes, J.J.F., Oliveira, J.F.G., Felipe Jr. J., Diniz, A.E., 1997, “Um método para melhorar a capacidade dimensional em retificadoras CNC”, Revista máquinas e metais, N. 375, pp.112-125.
- Hassui, A. , Diniz,A. E., Oliveira, J.F.G., Felipe Jr.,J. e Gomes, J.J.F., 1998, “Experimental Evaluation on grinding wheel wear through Vibration and Acoustic Emission” – Wear, Vol. 27 pp. 7-14.
- Inasaki, I., 1998, “Grinding process achievements and their consequences on machine tools challenges and opportunities”, Annals of the CIRP, Vol. 47.
- Inasaki, I., Okamura, K., 1985 “Monitoring of dressing and grinding processes with acoustic emission signals” Annals of the CIRP, Vol 34 pp.277- 280.
- Kluft, W., 1994, “A monitoração dos processos reduz custos e desperdícios”, Máquinas e Metais, ed. Outubro, 1994.
- Malkin, S., 1989, “Grinding Technology : Theory and applications of Machining with Abrasives”, Ellis Horwood Limited publishers, Chichester, England.
- Micheletti, G.F.,1977, “Tecnologia Mecânica 1 – Il Taglio dei Metali” – Seconda Edizione, Unione Tipografico-Editrice Torinese.
- Nussbaum, G.C., 1988, “Rebolos e Abrasivos : Tecnologia Básica”, Ícone Editora Ltda, São Paulo, Brasil., vol 1-3.
- Oliveira, J.F.G., 1989, “Tópicos Avançados sobre o processo de retificação, Publicação 048/89, LAMAFE – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 93 pp.
- Oliveira, J.F.G., 1992, “Controle do estado de afiação de rebolos na retificação de precisão”, Tese de Livre Docência – Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- Radhakrishnan, V., Babu, R.,N., “Investigations on Lase Dressing of Grinding Wheels – Part II: Grinding Performance of a Laser Dressed Aluminum Oxide Wheel”, Journal of Engineering for Industry, Vol.111 – August 1989.
- Radhakrishnan, V., Rajmohan, B., “On the possibility of Process Monitoring in Grinding by Spark Intensity Measurements”, Journal of Engineering for Industry, Vol.116, February 1994.

- Shaw, M., 1996, “Principles of Abrasives Processing”, Oxford University Press, Oxford, England.
- Xun Chen, Rowe B. W., 1995, “Analysis and simulation of the grinding process”, *Internacional Journal of Machining Tools and Manufacturing*, Vol. 36, N. 8, pp. 871-906.
- Webster, J., Zhao, Y.W., 1989, “Time-optimum adaptive control of plunge grinding”, *Internacional Journal of Machine Tools and Manufacturing*, Vol. 30, N. 3, pp. 413-421, 1990.

# APÊNDICE

## Resultados dos testes

### Teste 1 - Aumento do avanço 1

#### Rugosidade (microns)

	Número de peças retificadas			
Avanço 1 (mm/s.)	1	10	20	30
0,025	0,24	0,4	0,55	0,48
0,0275	0,27	0,48	0,5	0,57
0,03	0,26	0,49	0,6	0,59

#### Circularidade (microns)

	Número de peças retificadas			
Avanço 1 (mm/s.)	1	10	20	30
0,025	2,26	2,15	1,89	1,88
0,0275	2,2	1,56	1,3	1,6
0,03	2,2	2,35	1,89	2,21

### Teste 2 - Aumento do avanço 2

#### Rugosidade (microns)

	Número de peças retificadas			
Avanço 2 (mm/s.)	1	10	20	30
0,011	0,27	0,48	0,6	0,59
0,013	0,45	0,51	0,61	0,63
0,015	0,47	0,54	0,62	0,65

#### Circularidade (microns)

	Número de peças retificadas			
Avanço 1 (mm/s.)	1	10	20	30
0,011	2,1	2,25	1,89	2,21
0,013	2,41	2,33	2,47	2,27
0,015	2,46	2,56	2,49	2,59

### Teste 3 - Mudança do ponto de troca do avanço 1

#### Rugosidade (microns)

	Número de peças retificadas			
Ponto de troca	1	10	20	30
0,3	0,26	0,47	0,58	0,58
0,24	0,3	0,5	0,54	0,59
0,19	0,33	0,52	0,57	0,62

#### Circularidade (microns)

	Número de peças retificadas			
Ponto de troca	1	10	20	30
0,3	2,13	2,07	1,85	2,25
0,24	2,22	2,24	2,32	2,4
0,19	2,4	2,3	2,38	2,42

### Teste 4 - Aumento do do passo de dressagem

#### Rugosidade (microns)

	Número de peças retificadas			
Avanço 2 (mm/s.)	1	10	20	30
0,22	0,27	0,42	0,53	0,55
0,25	0,32	0,47	0,56	0,58
0,275	0,32	0,45	0,57	0,59

#### Circularidade (microns)

	Número de peças retificadas			
Avanço 1 (mm/s.)	1	10	20	30
0,22	2,3	2,24	2,3	2,23
0,25	2,38	2,3	2,4	2,24
0,275	2,36	2,4	2,3	2,3