



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
Faculdade de Engenharia  
Campus de Bauru



**“COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS CONVENCIONAL E COM BOCAL  
MODIFICADO DE APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE NO PROCESSO DE  
RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA INTERNA”**

**RICARDO PIO BARAKAT BISCIONI**

**BAURU - SP**  
**AGOSTO - 2010**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Faculdade de Engenharia  
Campus de Bauru



**“COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS CONVENCIONAL E COM BOCAL  
MODIFICADO DE APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE NO PROCESSO DE  
RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA INTERNA”**

**RICARDO PIO BARAKAT BISCIONI**

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi  
Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

**Dissertação apresentada a Faculdade de  
Engenharia da UNESP - *Campus* de Bauru,  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica.**

**BAURU - SP  
AGOSTO - 2010**

Biscioni, Ricardo Pio Barakat.

Comparação entre os métodos convencional e com bocal modificado de aplicação de fluido de corte no processo de retificação cilíndrica / Ricardo Pio Barakat Biscioni, 2010.

66 f.

Orientador: Dr. Eduardo Carlos Bianchi

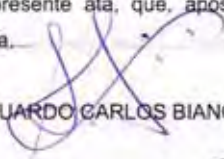
Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2010

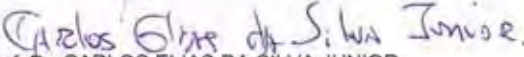
1. Retificação. 2. Aplicação fluido de corte. 3. Bocal modificado. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.




**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RICARDO PIO BARAKAT BISCIONI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 02 dias do mês de agosto do ano de 2010, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO SOUFEN do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RICARDO PIO BARAKAT BISCIONI, intitulado "COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS CONVENCIONAL E COM BOCAL MODIFICADO DE APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA INTERNA". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

  
Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR

  
Prof. Dr. CARLOS ALBERTO SOUFEN

## DEDICATÓRIA

A minha mãe Iesda Barbosa Barakat,  
ao meu irmão Marcelo Pio Barakat Biscioni, ao  
meu pai Luiz Ricardo Biscioni e a minha  
namorada Letícia Nassula.

## AGRADECIMENTOS

Expresso os mais sinceros agradecimentos:

A Jeová por ter me concedido a vida, saúde, a capacidade de raciocínio e condições para realizar este trabalho, a minha mãe Iesda Barbosa Barakat pelo amor infinito demonstrado no decorrer de minha vida, por ter sempre me incentivado nos estudos e por ter feito o possível e o impossível para que eu pudesse concluir mais esta etapa, ao meu irmão Marcelo Pio Barakat Biscioni pelo carinho verdadeiro, preocupação e apoio, a minha namorada Letícia Nassula pela confiança, compreensão e amor, os quais foram essenciais para a conclusão deste trabalho, ao meu Orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pelo auxílio em todas as etapas do projeto, pela amizade, preocupação e constante incentivo prestado, aos eternos amigos Osman Ahmad Abou Jokh e Ivete Vitorino dos Santos Abou Jokh por estarem ao meu lado durante esta fase sempre demonstrando um amor incondicional e carinho, a Advogada Hegle Machado Zalewska por me apoiar e me ajudar no momento de escolha desta Universidade tornando tudo isto possível, ao empresário Antonio Luiz Villela Machado por ter confiado em mim em um momento decisivo de minha vida tendo colaborado de forma decisiva para este projeto.

Aos professores Dr. Carlos Alberto Soufen do Departamento de Engenharia Mecânica da Unesp de Bauru e Dr. Carlos Elias da Silva Junior da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela disposição em participar da banca de defesa deste trabalho.

Aos alunos de Iniciação Científica Gabriel Nascimento Cuoco e Rubens Chinali Canarim pelo apoio e colaboração nesta pesquisa.

A Universidade Estadual Paulista por ter me educado durante sete anos dando-me a base necessária para a conclusão deste trabalho.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP por ter nos concedido meios de realizar esta pesquisa.

Em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, Campus de Bauru e aos Laboratórios de Pesquisa pertencentes à Instituição. De forma especial a todas as pessoas que tiveram de uma forma ou de outra participação em minha formação e no desenvolvimento deste projeto.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO .....	3
3. JUSTIFICATIVA PARA REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO.....	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
4.1. O Processo de Retificação .....	5
4.1.1. O processo de retificação a alta velocidade.....	5
4.1.2. Caracterização do processo de retificação cilíndrica interna .....	6
4.1.3. Nova cinemática para a retificação cilíndrica interna .....	7
4.1.4. O Ciclo de Retificação.....	9
4.1.5. Principais parâmetros associados ao processo de retificação .....	10
4.1.5.1. Comprimento de contato ( $l_c$ ) .....	10
4.1.5.2. Diâmetro equivalente ( $d_e$ ) .....	11
4.1.5.3. Espessura de corte equivalente ( $h_{eq}$ ).....	11
4.1.5.4. Parâmetros de corte .....	12
4.1.5.4.1. Profundidade de corte ( $a$ ) .....	12
4.1.5.4.2. Velocidade de mergulho ( $v_f$ ) .....	13
4.1.5.4.3. Velocidade de corte ( $v_s$ ).....	13
4.1.5.4.4. Velocidade da peça ( $v_w$ ) .....	13
4.1.6. Mecanismo de formação de cavaco.....	14
4.2. Métodos de aplicação de fluido de corte e sua importância no processo de retificação .....	16
4.2.1. Fatores relevantes na aplicação do fluido de corte.....	16
4.2.2. Bicos arredondados e sua utilização .....	18
4.2.3. Utilização de bicos especiais com uma envolvente .....	20

4.2.4. Utilização de bicos injetores com elementos condutores .....	21
4.2.5. Utilização de sapatas refrigerantes e defletores.....	22
4.2.6. Utilização de bicos auxiliares.....	22
4.2.7. Lubrificação através do rebolo .....	23
4.3. Danos térmicos.....	23
4.3.1. Queima Superficial da Peça.....	23
4.3.2. Tensões Residuais .....	24
4.3.3. Revenimento.....	25
4.3.4. Trincas.....	25
4.4. Comandos numéricos computadorizados .....	25
4.5. Revisão das variáveis de saída envolvidas no processo.....	26
4.5.1. Rugosidade das peças retificadas .....	27
4.5.2. Desgaste do rebolo e relação G.....	28
4.5.3. Desvios de Circularidade .....	30
4.5.4. Microdureza.....	31
4.5.5. Microestrutura - Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	33
4.5.5.1. Componentes Básicos do MEV .....	34
4.5.5.2. Preparação de Amostras para MEV .....	35
4.5.5.2.1. Tamanho da amostra .....	35
4.5.5.2.2. Limpeza da amostra .....	35
4.5.5.2.3. Montagem das amostras .....	36
4.5.5.2.4. Amostras embutidas.....	36
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	38
5.1. Ensaios e Testes Preliminares .....	38
5.2. Corpos de prova e suportes de fixação .....	40
5.3. O Cabeçote Retificador .....	41
5.4. Medição da Rotação do Rebolo.....	42
5.5. Sentido de Avanço do Rebolo .....	43
5.6. Preparação do Fluido de Corte .....	43

5.7. Método convencional de lubri-refrigeração.....	44
5.8. Método de lubri-refrigeração com bocal modificado.....	44
5.9. Medição de vazão.....	45
5.10. Vazões e velocidades do fluido de corte.....	45
5.11. Classificação dos Ensaios.....	46
5.12. Operação de Dressagem.....	46
5.13. Procedimentos Adotados para a Realização dos Ensaios.....	47
5.14. Parâmetros de usinagem.....	48
5.15. Procedimentos Adotados para a Medição das Variáveis de Saída .....	48
5.15.1. Medição dos desvios de circularidade .....	49
5.15.2. Medição da rugosidade .....	49
5.15.3 Medição do desgaste diametral do rebolo .....	50
5.15.4. Preparação das amostras para análise de microdureza e MEV .....	51
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>53</b>
6.1. Rugosidade .....	53
6.2. Desvios de Circularidade .....	54
6.3. Desgaste Diametral dos Rebolos .....	55
6.4. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	56
6.5. Microdureza.....	57
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>59</b>
<b>8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Parâmetros do processo de retificação cilíndrica interna (Marinescu, 2007).....	6
Figura 2- Esquemática da operação de retificação cilíndrica interna (Chen <i>et al.</i> , 2002).....	7
Figura 3- Novo conceito referente a retificação cilíndrica interna e possíveis movimentos peça-ferramenta (Tawakoli, 2007).....	8
Figura 4- Contato simultâneo de ambos os rebolos em 4 pontos simétricos da peça (Tawakoli, 2007). ....	8
Figura 5- Esquemática gráfica de um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho (Bianchi <i>et al.</i> , 1998, adaptada).....	9
Figura 6- Três regiões de micro-fenômenos envolvidos no processo de formação de cavacos na retificação, (Koenig e Klocke, 1996 <i>apud</i> Marinescu, 2007).....	15
Figura 7- Fatores que afetam a aplicação do fluido (Campbell, 1995 - adaptada). ....	17
Figura 8- Bocal tradicional (Webster <i>et al.</i> , 1995). ....	18
Figura 9- Bico especial arredondado (Webster <i>et al.</i> , 1995). ....	19
Figura 10- Bocal modificado.....	19
Figura 11- Bico especial, com uma envolvente ao redor do rebole (Silliman, 1992).....	21
Figura 12- Bicos injetores (tipo sapata) com elementos condutores (Brinksmeier <i>et al.</i> , 2001).....	21
Figura 13- Influência dos bocais radiais de limpeza em um processo de retificação (Konig, 1996 <i>apud</i> Marinescu, 2007).....	22
Figura 14- Desvio de Circularidade observado em uma peça retificada (Cho & Tu, 2001). ....	30
Figura 15- a) Base quadrada; b) Angulação; c) Indentação Vickers. (Ferreira, 2004). ....	32
Figura 16- a) Desenho esquemático; b) Indentação Knoop (Ferreira, 2004). ....	33
Figura 17- Esquema de construção do MEV (Maliska, 2006). ....	34
Figura 18- Fixação de amostra embutida. ....	37
Figura 19- Banco de ensaios montado para a realização dos experimentos. ....	38
Figura 20- Rebole de óxido de alumínio utilizado para realização dos ensaios. ....	39
Figura 21- Projeto inicial da haste para fixação do rebole. ....	39
Figura 22- Detalhe da haste utilizada para fixação do rebole. ....	40
Figura 23- Corpo de prova definitivo. ....	40
Figura 24- Suporte fixador do corpo de prova.....	41
Figura 25- Cabeçote retificador utilizado nesta pesquisa. ....	41
Figura 26- Medição da rotação do cabeçote retificador.....	42
Figura 27- Esquemática dos sentidos de avanço do rebole. ....	43
Figura 28- Operação de retificação interna empregando-se a técnica convencional de lubri-refrigeração. ....	44
Figura 29- Bocal modificado.....	45
Figura 30- Operação de dressagem do rebole.....	47
Figura 31- Medição dos desvios de circularidade da peça retificada.....	49
Figura 32- Degrau característico do desgaste do rebole fotografado através de um microscópio. ....	50
Figura 33- Cortes feitos no corpo de prova para análise. ....	51
Figura 34- Vista superior (a) e lateral (b) do embutimento destinado a análise de MEV.....	52

<b>Figura 35- Valores de rugosidade obtidos através de diferentes métodos de lubri-refrigeração. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 36- Desvios de circularidade em função do método de lubri-refrigeração empregado.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 37- Desgaste do Rebolo em função do método de lubri-refrigeração utilizado.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 38- Micrografias com aumento de 2000 vezes para ensaio utilizando-se o método convencional (a), bocal modificado com vazão de 12 l/min (b).....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 39- Micrografias para ensaio utilizando-se o método com bocal modificado com vazão de 16 l/min (a), bocal modificado com vazão de 21 l/min (b). ....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 40- Microdureza Vickers em função do tipo de lubrificação. ....</b>	<b>58</b>

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1 - Velocidades de saída do jato de fluido em função da vazão.....</b>	<b>46</b>
<b>Tabela 2 - Classificação dos Ensaios .....</b>	<b>46</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

<b>a</b> – penetração do rebolo na peça	[mm]
<b>A</b> – área de saída do bocal	[mm <sup>2</sup> ]
<b>ABNT</b> – Associação Brasileira de Normas Técnicas	
<b>a<sub>d</sub></b> – profundidade de dressagem	[μm]
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> – óxido de alumínio	
<b>b</b> – largura de retificação	[mm]
<b>b<sub>a</sub></b> – largura de atuação do dressador	[mm]
<b>CNC</b> – comando numérico computadorizado	
<b>D</b> – diâmetro de saída do bocal	[mm]
<b>d<sub>e</sub></b> – diâmetro equivalente	[mm]
<b>d<sub>s</sub></b> – diâmetro do rebolo	[mm]
<b>d<sub>w</sub></b> – diâmetro da peça	[mm]
<b>D</b> – diâmetro interno da tubulação de fluido	[mm]
<b>F<sub>t</sub></b> – força tangencial de corte	[N]
<b>G</b> – relação G	[-]
<b>h<sub>eq</sub></b> – espessura equivalente de corte	[mm]
<b>l<sub>c</sub></b> – comprimento de contato	[mm]
<b>n</b> – rotação do rebolo	[RPM]
<b>P<sub>elet</sub></b> – potência elétrica	[W]
<b>R<sub>a</sub></b> – rugosidade média	[μm]
<b>RMS</b> – Root Mean Square	
<b>t<sub>s</sub></b> – tempo de centelhamento	[s]
<b>u</b> – energia específica de retificação	[J/ mm <sup>3</sup> ]
<b>u<sub>pl</sub></b> – energia de deslocamento de material por deformação plástica	[J/ mm <sup>3</sup> ]
<b>u<sub>sl</sub></b> – energia de deslizamento do grão na peça	[J/ mm <sup>3</sup> ]
<b>v<sub>j</sub></b> – velocidade do jato de fluido de corte	[m/s]
<b>v<sub>ar</sub></b> – velocidade do ar comprimido	[m/s]
<b>v<sub>f</sub></b> – velocidade de avanço	[mm/min]
<b>Q</b> – vazão do fluido de corte	[m <sup>3</sup> /s]
<b>Q<sub>w</sub></b> – Taxa de remoção volumétrica	[mm <sup>3</sup> /s]
<b>Q<sub>w</sub>'</b> – Taxa de remoção específica	[mm <sup>3</sup> /m/s]
<b>v<sub>s</sub></b> – velocidade de corte	[m/s]
<b>v<sub>w</sub></b> – velocidade da peça	[m/s]
<b>ω<sub>w</sub></b> – rotação da peça	[RPM]
<b>Z<sub>s</sub></b> – volume de rebolo gasto	[mm <sup>3</sup> ]
<b>Z<sub>w</sub></b> – volume de material removido	[mm <sup>3</sup> ]

## RESUMO

Um processo muito utilizado na indústria metal-mecânica em geral para fabricação de componentes de responsabilidade é a operação de retificação cilíndrica interna de precisão, este processo é utilizado, por exemplo, na fabricação de anéis de rolamento e outros componentes. Atualmente a evolução das máquinas permitiu o aprimoramento deste processo no que diz respeito ao posicionamento e à rigidez do sistema máquina-peça-ferramenta, porém ainda são enfrentados grandes problemas quanto à lubrificação e refrigeração, principalmente no que diz respeito à utilização de fluidos de corte.

Este trabalho visa o estudo do comportamento da operação de retificação cilíndrica interna de mergulho a alta velocidade, no processo de acabamento de um aço endurecido SAE 52100, utilizando-se um rebolo convencional e dois métodos de refrigeração: o método de refrigeração convencional e com um bocal modificado.

O motivo para o emprego de um bocal modificado reside no fato de se encontrar uma alternativa viável para uma possível substituição do método convencional que consome grande quantidade de fluido, já que estes têm se tornado nas últimas décadas um grande problema para as indústrias, devido aos enormes danos ambientais e humanos que causam.

Para efetivar a comparação entre os métodos de refrigeração foram analisados os dados a respeito da rugosidade, erros de circularidade e desgaste diametral do rebolo, além da análise de microdureza e MEV das amostras retificadas para os métodos de refrigeração citados anteriormente. Analisando os resultados a quebra da barreira aerodinâmica e a melhor eficiência da penetração do fluido de corte na região de contato entre o rebolo e a peça foi maior quando se utilizou o bocal modificado com vazão de 21 l/min (25 m/s); os resultados de rugosidade, erro de circularidade e desgaste do rebolo foram sempre os menores obtidos para este método de lubrificação. Independentemente do tipo de lubrificação utilizada as análises de microdureza e MEV demonstraram que não houve queima ou revenimento das superfícies das amostras retificadas.

**Palavras-Chave:** retificação cilíndrica interna. aplicação otimizada. rebolo convencional. fluidos de corte.

## ABSTRACT

Precision internal plunge grinding is a process much used in the mechanical industry in general for manufacturing critical parts. For instance, this process is used for manufacturing bearings and others components. Nowadays machine developments have allowed the improvement of this process with regard to the position and stiffness of the system machine-workpiece-tool. However, there are still great problems with lubrication and cooling mainly with the use of cutting fluid.

This work aims to study the behavior of high speed internal plunge grinding of hardened SAE 52100 steel finishing using a conventional  $Al_2O_3$  wheel and two cooling methods: The conventional cooling method and also with a modified nozzle.

The use of the modified nozzle is an attempt to find a feasible alternative for a possible replacement of the conventional method that consumes a lot of cutting fluid. This is because cutting fluid has become a significant problem within the industries in the last decades, principally due to its huge impact on human health and the environment.

In order to compare both cooling methods each operation was evaluated by means of output data such as surface roughness, roundness errors, diametral wheel wear and also the micro hardness and MEV analysis of the samples for the cooling methods previously mentioned. It was possible to verify that the best results were reached using the modified nozzle with 21 l/min (25 m/s) flow. Surface roughness, roundness errors and diametral wheel wear were always the lowest for this method. Regardless of the utilized cooling method, micro hardness and MEV analysis shown, there was no burning or annealing of the analyzed sample surfaces.

**Keywords:** internal plunge grinding. optimized application. conventional wheel. cutting fluid.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido ao avanço tecnológico ocorrido atualmente o processo de retificação ganhou grande importância no processo de fabricação de diversas peças onde há a necessidade de alta precisão nas medidas e valores reduzidos de rugosidade ( $R_a$  de 0,2 a 1,6  $\mu\text{m}$ ) dentro de apertados índices de tolerâncias dimensionais (entre IT4 e IT6) e geométricas compatíveis (Malkin *et al.*, 1989).

Segundo Kopac (2006), o processo de retificação deixou de ser apenas um processo de acabamento passando a ser um processo de usinagem de alto desempenho. Entretanto esta operação é a que apresenta menor conhecimento e domínio, logo se torna necessário o seu aprimoramento para que desta forma seja possível a obtenção de grandes níveis de precisão com maior agilidade, representando assim menores custos para as indústrias.

Grandes desafios são apresentados pelo processo de retificação, pois para a obtenção de bons resultados estão envolvidos diversos fatores que devem ser devidamente controlados. Por meio da pesquisa científica é possível estudar a influência desses fatores e determinar suas melhores combinações, esta pesquisa é muito proveitosa para as indústrias e pode torná-las mais competitivas frente ao mercado.

As indústrias têm encontrado um grande problema atualmente no que se refere ao descarte dos fluidos de corte. A busca por novos tipos de fluido e meios de aplicação destes, capazes de garantir bons resultados, é muito valorizada no meio industrial, pois os fluidos apresentam grandes riscos de saúde para os operadores e ao meio ambiente. Antigamente tal resíduo tinha como destino final rios e lagos, resultando em imensos danos ecológicos. Visando impedir a continuidade de tais atos predatórios, implementou-se nas últimas décadas, rígidas Leis Ambientais e certificações, tais como a ISO 14001, que indica um comprometimento da empresa no que diz respeito à preservação ambiental. Além disso, eles apresentam um grande custo de manutenção, fazendo com que haja um repasse para o custo final do produto (Howes *et al.* 1991; Irani, 2005).

No intuito de minimizar a quantidade de fluido utilizado sem perder em qualidade final da peça e ainda otimizando o tempo de produção, será analisada a viabilidade de um bocal modificado em comparação ao método convencional. Para tanto será utilizado o rebolo de óxido de alumínio devido ao seu grande emprego atualmente nas indústrias.

Em relação ao processo de retificação cilíndrica interna, o qual será o foco de estudo desta pesquisa, cabe ressaltar que o mesmo é ainda pouco difundido, devido à dificuldade de execução.

## **2. OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é verificar as possíveis vantagens na aplicação e nos resultados do uso de um bocal de refrigeração modificado usando-se três valores de velocidade do jato de fluido em relação ao método convencional de refrigeração no processo de retificação cilíndrica interna a alta velocidade do aço endurecido SAE 52100 utilizando-se o rebolo convencional de óxido de alumínio.

Essa comparação será feita por meio das seguintes variáveis de saída: rugosidade superficial da peça, desgaste diametral do rebolo, desvios de circularidade das peças, análise no MEV (microscópio eletrônico de varredura) e microdureza; e assim será possível determinar quais parâmetros, incluindo tipo de refrigeração, vazões e velocidades do jato de fluido, proporcionarão a obtenção de melhores resultados.

### **3. JUSTIFICATIVA PARA REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO**

O processo de retificação cilíndrica interna apresenta grandes obstáculos devido principalmente as pequenas dimensões envolvidas. Neste processo a área de contato entre o rebolo e a peça é elevada e este fato juntamente com as reduzidas dimensões de ambos, dificultam a aplicação do fluido de corte e tornam a retificação cilíndrica interna mais difícil de ser realizada. Uma das metas deste trabalho é definir parâmetros a fim de otimizar o processo, tornando-o mais efetivo na obtenção de valores de rugosidade reduzidos e menores desvios de circularidade das peças retificadas.

Outro grande incentivo a realização desta pesquisa é a escassa quantidade de artigos publicados atualmente sobre o processo de retificação cilíndrica interna com diferentes bocais de refrigeração quando comparado com outros processos de retificação como a retificação cilíndrica externa.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste tópico será realizada uma revisão bibliográfica sobre os principais parâmetros e estudos realizados sobre o processo de retificação.

### **4.1. O Processo de Retificação**

O estudo da rigidez das máquinas e o aprimoramento dos motores elétricos têm contribuído para a melhoria de diversos processos de fabricação, o processo de retificação tem sido aprimorado ao longo dos anos e muitos estudos têm sido realizados por diversos pesquisadores no intuito de definir todos os parâmetros importantes para a obtenção de reduzidos valores de rugosidade e bons índices de tolerância dimensional (Marinescu, 2007).

#### **4.1.1. O processo de retificação a alta velocidade**

A retificação a alta velocidade expandiu o campo da retificação do tradicional processo de acabamento para uma usinagem de alto desempenho (Kopac, 2006). Conforme Marinescu (2007), o aumento da velocidade de corte do rebolo tem permitido um aumento significativo nas taxas de remoção de material contribuindo para a expansão do processo.

As máquinas do passado não eram projetadas para altas velocidades e havia grande vibração (Salmon, 1992). Essa vibração excessiva causava superfícies substancialmente ruins, ruídos e desgaste prematuro do rebolo. Portanto a utilização dessa técnica só foi possível devido ao intenso desenvolvimento tecnológico das ferramentas, materiais e máquinas. A usinagem a alta velocidade é responsável por reduzir as forças de corte e a energia consumida no processo e ainda promover um aumento nas taxas de remoção e melhoria da qualidade superficial da peça usinada, o que pode ser verificado nos baixos valores de rugosidade superficial das mesmas (Dolinšek *et al.*, 2004); (Dudzinski *et al.*, 2004).

A obtenção de resultados satisfatórios depende em grande parte do domínio desta técnica de usinagem (Özel & Altan, 2000), pelo fato da mesma proporcionar uma intensa elevação da temperatura na zona de corte e ainda gerar altas tensões na interface de contato peça-ferramenta, que, se mal controlados, podem gerar queimas, trincas e outros danos à peça.

#### 4.1.2. Caracterização do processo de retificação cilíndrica interna

Segundo Marinescu (2007), na indústria moderna a tecnologia de retificação é altamente desenvolvida de acordo com requisitos particulares referentes ao produto ou ao processo. Assim a retificação pode ser uma boa opção para satisfazer as necessidades das indústrias, pois através dela é possível produzir peças com boa qualidade superficial dentro de faixas de tolerâncias bastante apertadas (Rowe *et al.*, 1997); (Lee *et al.*, 2001).

Entretanto o processo de retificação é bastante complexo e delicado. Grande parte disso deve-se a fatores como a determinação das condições de dressagem e usinagem, das dificuldades na seleção do rebole, e principalmente por se tratar geralmente de uma operação de acabamento, ou seja, a peça apresenta grande valor agregado por ter passado por diversas operações e qualquer erro nesta etapa pode ocasionar grandes perdas. Sabendo-se disso, deve-se realizar uma análise bastante criteriosa de todos os parâmetros envolvidos, fazendo com que a retificação tenha o melhor desempenho possível.

A operação de retificação interna apresenta uma dificuldade maior devido, principalmente, à ferramenta utilizada. A escolha do rebole deve ser criteriosa devido às suas reduzidas dimensões e ao seu desgaste. O diâmetro do rebole deve ser de 70 a 80% do diâmetro da peça a ser usinada, pois isso permitirá a entrada do fluido de corte e saída do cavaco. A largura do rebole também não deve ultrapassar a largura da peça, pois isso prejudicaria a saída de cavacos, que com seu acúmulo poderiam gerar riscos na peça prejudicando a rugosidade. A figura 1 ilustra alguns parâmetros importantes em relação a operação de retificação cilíndrica interna.

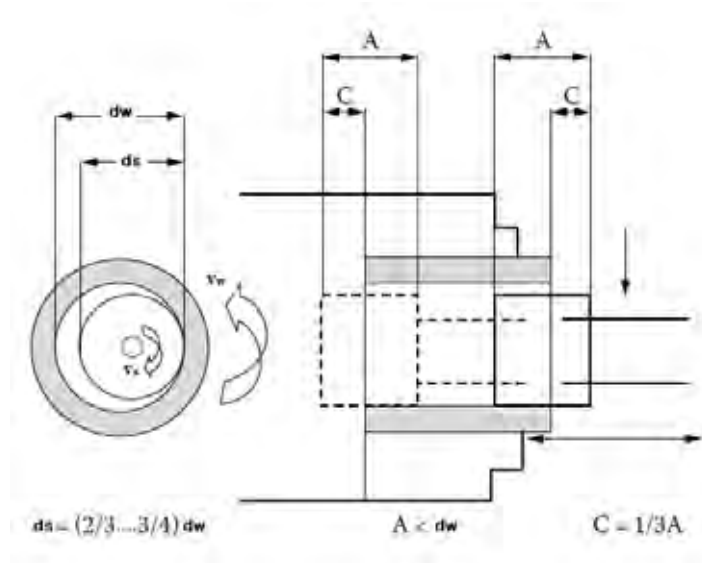


Figura 1- Parâmetros do processo de retificação cilíndrica interna (Marinescu, 2007).

Também devido à grande área de contato entre o rebolo e a peça as forças geradas na ferramenta são muito grandes e com suas pequenas dimensões temos uma elevada força de flexão da haste do rebolo, consistindo assim num problema muito comum na indústria.

A operação de retificação cilíndrica interna e alguns parâmetros do processo estão ilustrados na Figura 2.

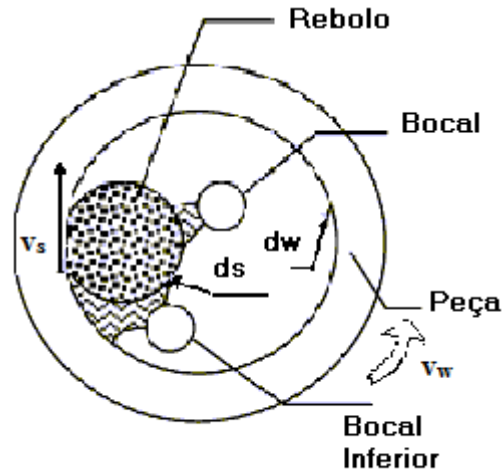


Figura 2- Esquemática da operação de retificação cilíndrica interna (Chen *et al.*, 2002).

A caracterização da operação de retificação cilíndrica interna de mergulho pode ser obtida fazendo-se o correlacionamento entre os parâmetros da figura 2, juntamente com outras variáveis, tais como avanço e vazão do fluido. A figura 2 ilustra os seguintes parâmetros: velocidade de corte do rebolo  $v_s$ , velocidade da peça  $v_w$ , diâmetro do rebolo  $d_s$ , e também o diâmetro interno da peça  $d_w$ .

#### 4.1.3. Nova cinemática para a retificação cilíndrica interna

Devido as dificuldades inerentes ao processo de retificação cilíndrica interna, tais como: dificuldade de aplicação de fluido de corte, flexão da ferramenta e principalmente ao grande comprimento de contato responsável pela geração de calor na região de contato peça-ferramenta (Tawakoli, 2007), novas cinemáticas tem sido estudadas com o objetivo de superar estas dificuldades e de criar novas topografias na superfície das peças retificadas. Neste conceito os eixos de rotação do rebolo são perpendiculares ao eixo de rotação da peça e os rebolos podem ser movidos através de um motor localizado no eixo. A figura 3 ilustra este novo conceito:

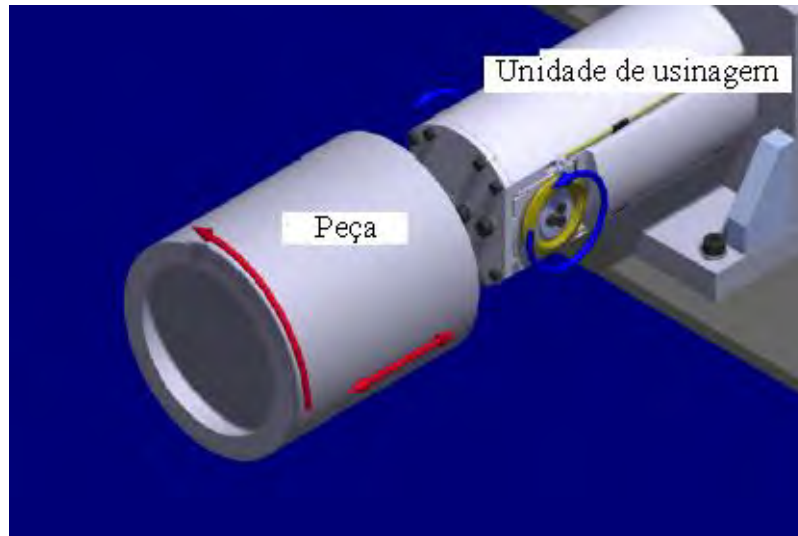


Figura 3- Novo conceito referente a retificação cilíndrica interna e possíveis movimentos peça-ferramenta (Tawakoli, 2007).

Segundo Tawakoli (2007), as vantagens na utilização deste método sobre o convencional são os seguintes:

- Contato simultâneo de ambos os rebolos com quatro pontos de contato simétricos no furo da peça (Figura 4);
- Alta taxa de remoção devido ao equilíbrio de forças no sistema;
- Possibilidade de retificação para furos de grande comprimento;
- Balanceamento das forças de usinagem pelo alinhamento simétrico das ferramentas, eliminando a deformação elástica do eixo usual em processos convencionais.

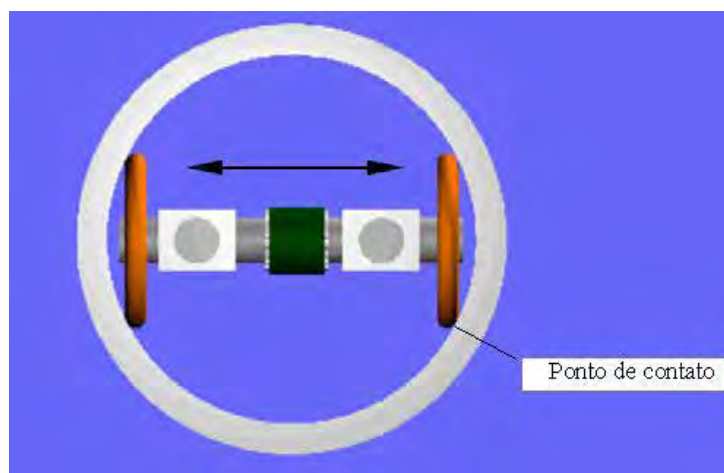


Figura 4- Contato simultâneo de ambos os rebolos em 4 pontos simétricos da peça (Tawakoli, 2007).

#### 4.1.4. O Ciclo de Retificação

O correto inter-relacionamento entre os parâmetros de entrada e as variáveis de saída do processo de retificação são essenciais para a otimização do mesmo e demandam um extenso conhecimento do processo.

O ciclo de retificação é definido como a combinação da execução de vários fatores que variam desde o posicionamento e fixação inicial da peça na máquina até o momento de retirada da mesma, seguindo uma série de especificações pré-estabelecidas. A figura 5 apresenta o avanço real e teórico do rebolo observado durante o ciclo de retificação cilíndrica.

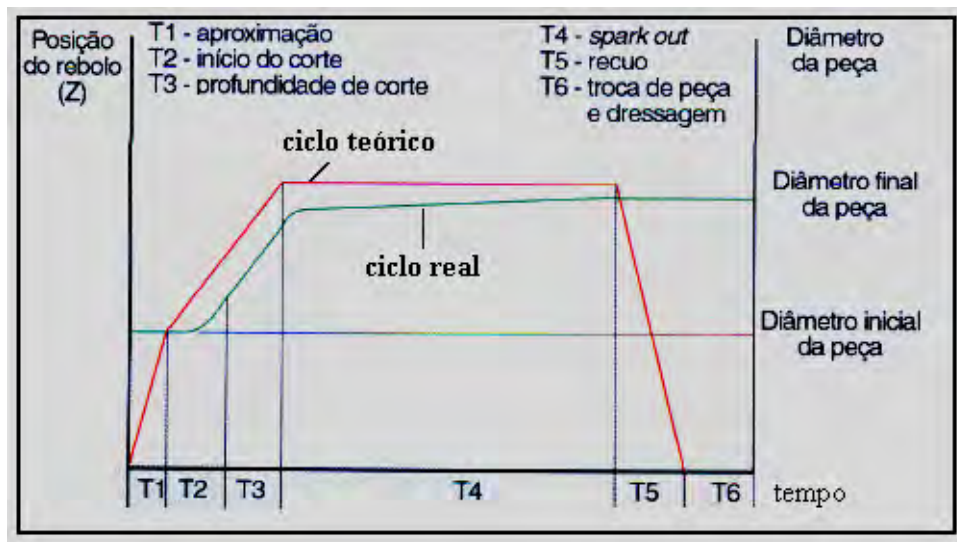


Figura 5- Esquemática gráfica de um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho (Bianchi *et al.*, 1998, adaptada).

A caracterização dos períodos indicados é fornecida abaixo:

- T1: deslocamento da ferramenta em relação à peça, sem a ocorrência de remoção de material;
- T2: momento em que se dá o contato entre o rebolo e a peça, proporcionando deformações elásticas em ambos e também na máquina. Estas deformações são responsáveis pelo atraso entre a posição real do rebolo e a posição indicada pelo comando numérico da máquina. No momento do contato observam-se aumentos momentâneos da potência consumida pelo motor da máquina e também dos índices de emissão acústica;

- T3: a profundidade total de corte estabelecida é atingida para um ciclo de retificação;
- T4: corresponde ao período de centelhamento (*spark-out*), em que não há avanço do rebolo, permitindo, desta forma, eliminar as deformações adquiridas durante o período  $T_2$ . O tempo de *spark-out* é muito importante dentro de um ciclo de retificação, pois neste momento são obtidas apertadas tolerâncias dimensionais e geométricas com reduzidos valores de rugosidade superficial que caracterizam o processo de retificação;
- T5: afastamento do rebolo, permitindo a retirada da peça usinada e a colocação de outra peça a ser trabalhada;
- T6: realização da operação de dressagem, composta pelo movimento do rebolo até o dressador, pela dressagem propriamente dita e pelo retorno do rebolo até a posição de trabalho.

A busca de métodos que permitam minimizar os tempos descritos acima sem, no entanto, afetar a qualidade da peça final constituem a otimização do processo de retificação que tem sido buscada atualmente.

#### **4.1.5. Principais parâmetros associados ao processo de retificação**

Neste item são apresentados os principais parâmetros envolvidos no processo de retificação cilíndrica.

##### **4.1.5.1. Comprimento de contato ( $l_c$ )**

O parâmetro que define a extensão de contato entre o rebolo e a peça durante a operação de retificação é denominado comprimento de contato ( $l_c$ ), este é um dos parâmetros mais utilizados e de grande importância na retificação, sendo que por meio dele o calor gerado é transmitido a peça (Marinescu, 2007). Malkin (1989) fez um equacionamento do comprimento de contato, para este equacionamento são desprezadas as deformações e

movimentos envolvidos no processo. Este equacionamento envolve a profundidade de corte  $a$  e o diâmetro equivalente  $d_e$ , como se pode verificar na equação 1:

$$l_c = (a.d_e)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

#### 4.1.5.2. Diâmetro equivalente ( $d_e$ )

Segundo Marinescu (2007) o diâmetro equivalente é um parâmetro que considera a conformidade entre o rebolo e a peça no processo de retificação cilíndrica. Este parâmetro fornece o diâmetro equivalente que o rebolo no processo de retificação plana deveria ter para obtenção do mesmo comprimento de contato da retificação cilíndrica, o diâmetro equivalente tende a  $d_s$  quando  $d_w$  tende ao infinito. A equação (2) relaciona estas variáveis:

$$d_e = \frac{d_s \times d_w}{d_s \pm d_w} \quad (2)$$

O sinal negativo representa a retificação cilíndrica interna e o sinal positivo representa a retificação cilíndrica externa, no caso da retificação plana,  $d_w$  assume valor infinito, (Marinescu, 2007). Ainda segundo o autor quanto maior o diâmetro equivalente, maior será o comprimento de contato ocasionando um aumento da força normal. Com o aumento do diâmetro da peça a ser retificada a razão  $d_w/d_s$  deve ser reduzida gerando assim um valor menor de diâmetro equivalente.

#### 4.1.5.3. Espessura de corte equivalente ( $h_{eq}$ )

De forma geral, a espessura equivalente ( $h_{eq}$ ) representa a espessura da camada de material que é removida pelo rebolo, com a velocidade periférica deste, e cujo volume específico equivale àquele retirado da peça naquele tempo de corte considerado. Este parâmetro permite quantificar uma condição de trabalho e pode ser definido como a relação entre a taxa de remoção específica do material ( $Q_w'$ ) e a velocidade periférica do rebolo ( $v_s$ ).

A espessura de corte equivalente pode ser estabelecida ainda em função dos parâmetros de entrada:  $v_f$  (velocidade de mergulho ou avanço) e  $d_w$  (diâmetro da peça) (Malkin, 1989), como pode-se verificar na equação 3:

$$h_{eq} = \frac{Q_w'}{v_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{60 \cdot 1000 \cdot v_s} \quad (3)$$

Segundo Malkin (1989), a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada ao comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas tais como forças de corte, rugosidade, topografia da ferramenta e outras. O aumento do  $h_{eq}$  reflete no aumento das forças de corte e dos valores de rugosidade e ainda na diminuição da vida do rebolo.

#### **4.1.5.4. Parâmetros de corte**

Nos próximos tópicos serão apresentados alguns parâmetros de corte responsáveis por caracterizar o processo de retificação, fornecendo dados para a análise e verificação da eficácia do processo.

##### **4.1.5.4.1. Profundidade de corte (a)**

O uso de uma profundidade de corte elevada no processo de retificação é responsável por ampliar a área de contato entre peça e ferramenta, aumentando conseqüentemente, o número de grãos em contato com a superfície que esta sendo usinada. Além disso, uma profundidade de corte maior resulta em uma espessura de corte equivalente também maior e elevados valores de  $h_{eq}$  implicam num acréscimo das forças de corte, as quais são responsáveis por causar deformações entre peça e ferramenta. Rowe & Morgan (1993) *apud* Catai (2004) afirmam que as defleções ocorridas durante o movimento de avanço da ferramenta abrasiva podem prejudicar a integridade superficial da peça usinada. Desta forma, deve-se empregar uma profundidade de corte compatível com o tipo de rebolo e de material que está sendo utilizado.

#### 4.1.5.4.2. Velocidade de mergulho ( $v_f$ )

A velocidade de mergulho é definida como uma taxa de remoção de material. Esta variável sofre influência da rigidez da retificadora, da quantidade de material a ser removida, do acabamento desejado, da quantidade de fluido de corte envolvida no processo, do material da peça entre outros fatores.

Baldo (1994) afirma que no início do processo de retificação ou desbaste, remove-se cerca de 95% do material da peça, sendo que a velocidade de mergulho deve estar entre 0,4 a 2,0 mm/min. Já para o acabamento, o avanço deve ser tomado entre 0,1 a 0,3 mm/min.

#### 4.1.5.4.3. Velocidade de corte ( $v_s$ )

Graf (2004) afirma que a velocidade de corte do rebolo, em m/s, pode ser expressa por:

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (4)$$

em que:

$n_s$  é a rotação do rebolo.

Bianchi *et al.* (1996) e Graf (2004) afirmam que aumentando-se  $v_s$  verifica-se a exposição de um maior número de arestas cortantes ativas por unidade tempo, resultando em uma redução da carga exercida sobre cada grão abrasivo. Tal fato pode ser observado pela diminuição dos valores de força tangencial de corte. Nestas condições de trabalho o rebolo possui uma dureza dinâmica elevada, pois os grãos apresentam friabilidade reduzida, ou seja, apresentam uma elevada resistência quando submetido às forças e impactos do processo.

#### 4.1.5.4.4. Velocidade da peça ( $v_w$ )

A velocidade periférica da peça na operação de retificação interna de mergulho, em m/min, é definida por Graf (2004) da seguinte forma:

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \quad (5)$$

em que:

$n_w$  é a rotação da peça.

Um aumento da velocidade da peça ocasiona um aumento da taxa de remoção de material, com a formação de cavacos mais grossos (Graf, 2004). Verifica-se também um aumento da carga sobre cada grão, aumentando os valores da força tangencial de corte.

#### 4.1.6. Mecanismo de formação de cavaco

Malkin (1989), afirma que a remoção de material durante a operação de retificação se dá por meio da interação do rebolo com a peça, formando cavacos por cisalhamento. O autor citado concluiu que o método de remoção ocorre por cisalhamento após comparar os cavacos obtidos na retificação com cavacos de outros processos de usinagem, atingindo-se uma semelhança microscópica bastante grande.

Os esforços gerados no processo responsáveis pela remoção de material e conseqüentemente, pela formação de cavaco, podem ser associados à potência de corte  $P$ , por meio do seguinte equacionamento (Malkin, 1989):

$$P = F_t \cdot (v_s \pm v_w) \quad (6)$$

em que:

$F_t$  é a força tangencial de corte;

$v_s$  é a velocidade periférica do rebolo;

$v_w$  é a velocidade periférica da peça.

O sinal positivo é empregado em relação à retificação discordante e o sinal negativo para retificação concordante.

Outro parâmetro relacionado à potência e as condições de corte, definido como energia específica de retificação  $u$ , é a energia por unidade de volume de material removido. Tal

grandeza é expressa em  $J/mm^3$  e pode ser equacionada matematicamente do seguinte modo (Malkin, 1989):

$$u = \frac{P}{Q_w} \quad (7)$$

Sendo que:

P é a potência de corte;

$Q_w$  é a taxa de remoção volumétrica, que no processo de retificação pode ser expressa da seguinte forma:

$$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b \quad (8)$$

em que:

$v_f$  é a velocidade de avanço do rebolo;

e b é a largura do rebolo.

Malkin (1989), afirma que a energia específica envolvida no processo de retificação é muito maior do que nos outros processos de usinagem, principalmente quando se trabalha com baixos índices de  $h_{eq}$ . Isto ocorre pelo fato de que apenas uma parcela da energia é empregada no processo de remoção de cavaco, sendo que a grande porcentagem restante é envolvida em outros mecanismos, como por exemplo, no atrito existente entre as regiões planas dos grãos e a peça e na deformação plástica da peça antes da formação do cavaco. Partindo deste princípio, Malkin (1989) dividiu o processo de remoção de cavaco em três regiões, estas regiões podem ser visualizadas na figura 6:

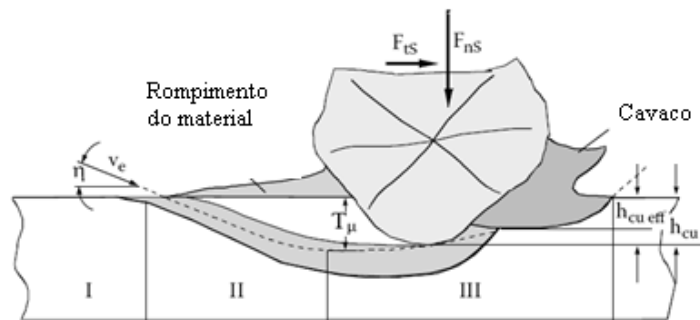


Figura 6- Três regiões de micro-fenômenos envolvidos no processo de formação de cavacos na retificação, (Koenig e Klocke, 1996 *apud* Marinescu, 2007).

- **Região 1:** primeiro contato entre grão abrasivo e peça. Nesta etapa ocorre apenas a deformação elástica do material da peça, sendo que toda a energia fornecida ao processo é consumida pelo atrito, calor e deformações.
- **Região 2:** etapa em que os grãos abrasivos continuam penetrando na peça, proporcionando deformações plásticas, escoamento lateral e recuperação das deformações elásticas ocorridas no estágio anterior. A maior penetração dos grãos implica em maiores forças de atrito entre peça e rebolo e desta forma, grande parte da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor.
- **Região 3:** um valor de penetração crítico é atingido pela aresta de corte nesta fase, que por consequência gera uma pressão também crítica  $P_c$ . Esta pressão é definida como sendo a pressão mínima para que ocorra a ruptura do material. Neste instante inicia-se a formação de cavaco e grande parte da energia passa a ser consumida no cisalhamento do material.

Depois de formado, o cavaco é removido da região de corte, sendo posteriormente expulso da ferramenta pela ação da força centrífuga ou pela ação de limpeza exercida pelo fluido de corte na superfície de trabalho do rebolo. Quando os cavacos não são eficientemente removidos das porosidades do rebolo, tem-se perda do poder de corte da ferramenta, aumento do atrito do processo e por consequência, incremento da temperatura na região de corte e também nos valores de rugosidade superficial da peça.

A deformação lateral do material da peça proporciona um aumento da profundidade de retificação possibilitando a atuação de grãos abrasivos que estão menos expostos.

## **4.2. Métodos de aplicação de fluido de corte e sua importância no processo de retificação**

Neste tópico será feita uma abordagem da importância da correta aplicação do fluido de corte no processo de retificação, será abordado os principais tipos de bocais utilizados e diferentes métodos de lubrificação.

### **4.2.1. Fatores relevantes na aplicação do fluido de corte**

A alta eficácia alcançada atualmente pelo processo de retificação permite que se utilize taxas de remoção de material cada vez maiores, graças a utilização de rebolos com

maiores diâmetros ou maiores velocidades de corte (Ramesh, 2001). Quando se utiliza elevadas velocidades de corte, uma barreira de ar surge ao redor do rebolo, a qual dificulta o alcance do fluido de corte na região de contato peça/ferramenta. Esta dificuldade deve ser superada de alguma forma, pois a aplicação correta de fluido no processo de retificação é imprescindível para a obtenção de êxito técnico e econômico na operação desenvolvida (Campbell, 1995). Normalmente a importância dos métodos de aplicação de fluido de corte é subestimada, pois não existe um método totalmente eficaz de mensurar o efeito dos vários parâmetros envolvidos.

Webster *et al.* (1995), Campbell (1995), e Ramesh *et al.* (2001) realizaram diversos estudos definindo parâmetros adequados que viabilizassem um método de lubri-refrigeração a alta pressão capaz de vencer a barreira de ar formada em torno do rebolo. Na figura 7, Campbell (1995) apresenta os principais fatores associados a aplicação de fluido de corte.



Figura 7- Fatores que afetam a aplicação do fluido (Campbell, 1995 - adaptada).

A seguir, visando otimizar o processo e tornar a retificação mais eficiente, apresentam-se alguns tipos diferenciados de bocais para aplicação de fluido de corte e ainda diferentes modelos dos mesmos, além de serem apresentados alguns sistemas de defletores e placas defletoras que facilitam ao fluido chegar com maior eficácia na região da interface peça/ferramenta.

#### 4.2.2. Bicos arredondados e sua utilização

A utilização de bocais convencionais tem-se tornado inadequada devido ao crescimento na utilização de fluidos a base de água (com reduzida densidade) os quais apresentam grande dispersão e se perdem na região de corte. Para eliminar tal barreira seria ideal adotar-se a velocidade de saída do jato igual à velocidade periférica do rebolo. No entanto, alguns bocais convencionais apresentam um desenho do orifício de saída desfavorável, necessitando de um aumento da pressão da bomba para proporcionar uma velocidade de saída do fluido adequada, o que por outro lado conduz a um aumento da dispersão do jato, diminuindo a eficiência do mesmo. De acordo com Webster (1999) o aproveitamento do aumento da pressão da bomba, sem prejudicar a coerência do jato de fluido de corte, pode ser conseguido utilizando-se bocais com formatos otimizados.

A figura 8 apresenta um bocal tradicional, caracterizado por uma parede convexa, a qual causa a separação do fluxo do fluido na saída. Isto porque tal parede provoca um escoamento turbulento de fluido, utilizado para baixas pressões de aplicação, o que dificulta a coerência do jato (Webster *et al.*, 1995).

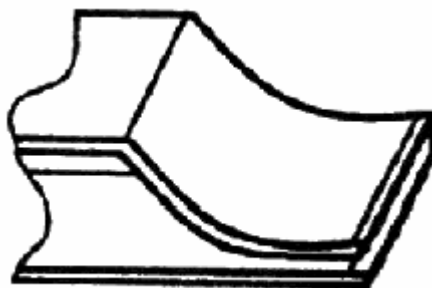


Figura 8- Bocal tradicional (Webster *et al.*, 1995).

O desenvolvimento de bicos especiais possibilita um fluxo adequado de fluido à região de corte. Segundo Webster *et al.* (1995) *apud* Silva (2000), um bico ideal para retificar pequenas larguras de retificação, seria de formato arredondado com paredes internas côncavas. Este bico arredondado foi desenvolvido baseando-se no bico projetado por Rouse *et al.* (1952) para mangueiras de combate à incêndios. Estes bicos são capazes de garantir uma maior coerência do jato. Na figura 9,  $D$  [mm] é o diâmetro interno da tubulação de alimentação do fluido e  $d$  [mm] é o diâmetro do orifício de saída de fluido. Nota-se que este bocal de formato arredondado por possuir superfícies côncavas aproxima as lâminas de fluido

que se formam durante o escoamento, minimizando a ocorrência da queda de pressão e turbulência ocasionada durante a passagem e saída do fluido de corte. Já nos bocais com superfície convexa, a tendência é de que as lâminas de fluido formadas no interior do mesmo se separem, aumentando o efeito de turbulência. Na figura 10 é apresentada uma outra versão deste bocal onde a área cilíndrica da saída do bocal foi transformada numa área retangular para que o fluido atue em toda extensão do contato entre o rebolo e a peça a ser retificada.

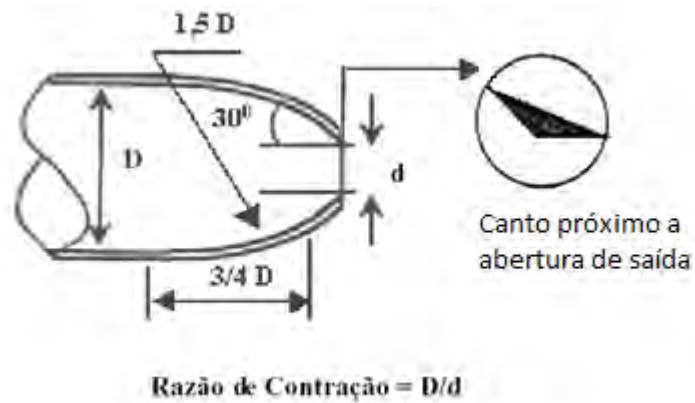


Figura 9- Bico especial arredondado (Webster *et al.*, 1995).

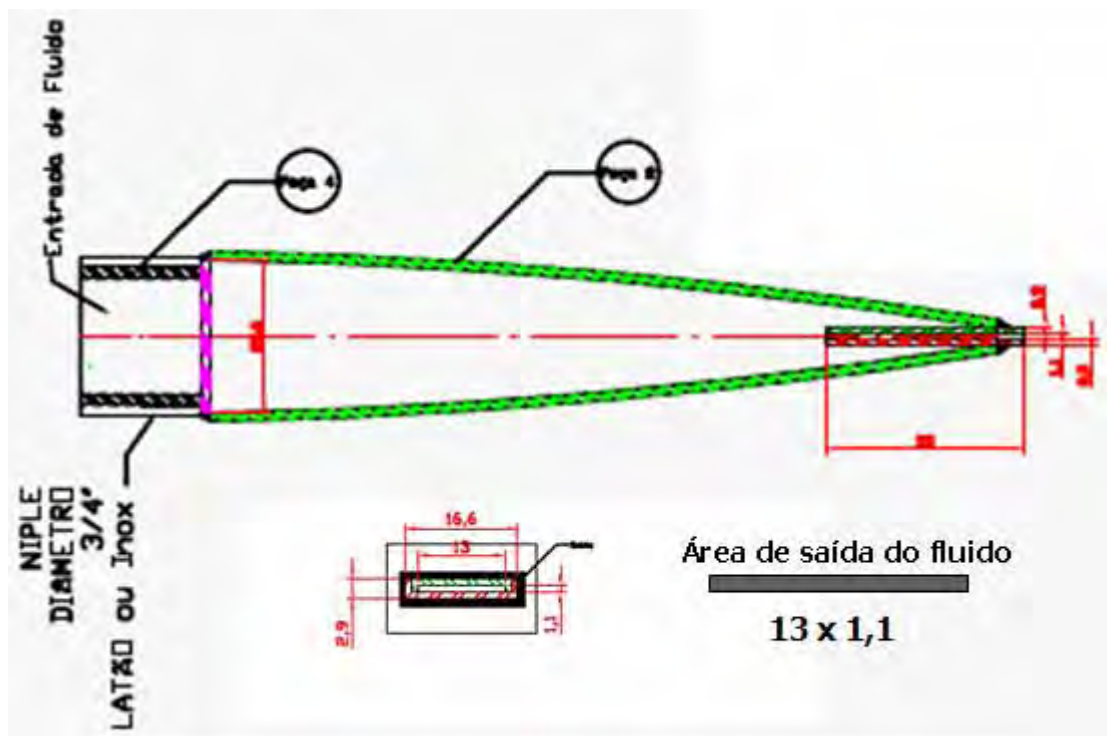


Figura 10- Bocal modificado.

Webster *et al.* (1995) apresentaram algumas conclusões utilizando o bico arredondado, são elas:

- A abertura geométrica dos bocais na entrada e saída, e as superfícies internas devem ser bem estudadas, pois apresentam grande importância, na tentativa de diminuir a turbulência do fluido de corte no interior do bico;
- A temperatura na região de corte diminuiu em relação aos processos com bicos tradicionais;
- Deve-se atribuir grande importância ao raio de contração, que expressa a razão entre os diâmetros de entrada e saída do bocal, sendo que tal razão apresenta de maneira significativa a possibilidade da ocorrência de turbulência no bocal;
- A velocidade periférica do rebolo em relação ao jato do fluido é muito significativa para a refrigeração da peça.

Com relação ao raio de contração, pode-se afirmar que quanto maior o seu valor, maior também será a velocidade do fluido de corte, sendo que os melhores resultados são obtidos com maiores raios de contração.

#### **4.2.3. Utilização de bicos especiais com uma envolvente**

Os métodos convencionais de aplicação de fluidos de corte no processo não são completamente eficazes na remoção de calor da região de corte, pois os mesmos não alcançam efetivamente o local onde o calor é gerado (Silliman, 1992). Isto porque a velocidade de corte elevada do rebolo, cria um filme de ar em sua volta, bloqueando a entrada do fluido. Para evitar tais problemas, pode-se utilizar bocais especiais capazes de recobrir o rebolo. Tais bocais, ilustrados na figura 11, devem ser ajustáveis a uma grande faixa de tamanho de rebolos, contanto que uma espécie de envolvente, a qual deve ser conjugada ao bico, também seja regulável.

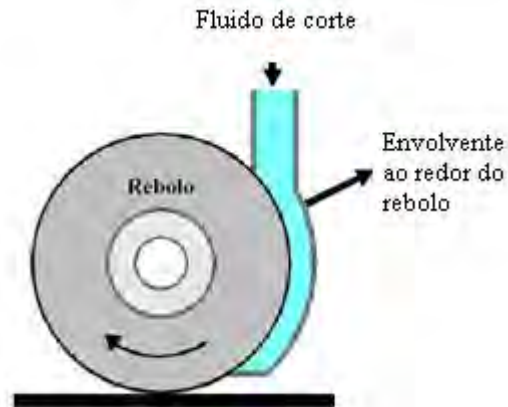


Figura 11- Bico especial, com uma envoltura ao redor do rebolo (Silliman, 1992).

#### 4.2.4. Utilização de bicos injetores com elementos condutores

Um método otimizado de aplicação constituído de bicos injetores do tipo sapata, com condutores capazes de direcionar melhor o fluxo do fluido de corte e melhorar a lubrificação são ilustrados na figura 12. Tem-se a esquematização de bicos injetores com condutores radiais, retos, tangenciais e sem os mesmos.

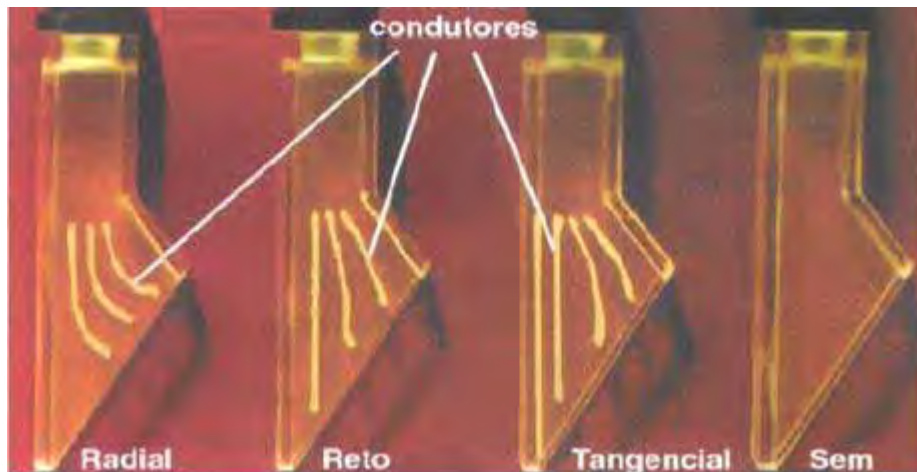


Figura 12- Bicos injetores (tipo sapata) com elementos condutores (Brinksmeier *et al.*, 2001).

Necessita-se uma combinação adequada da vazão do fluido e velocidade de corte para a obtenção de um processo ideal para estes bicos, além da utilização da forma correta de disposição dos elementos condutores no interior do bico, para que a separação do fluxo seja evitada.

#### 4.2.5. Utilização de sapatas refrigerantes e defletores

Os defletores são placas utilizadas próximas a superfície do rebolo com o intuito de eliminar a barreira de ar formada ao redor deste. O efeito desta camada é diretamente proporcional à velocidade de corte. A eliminação desta camada de ar é capaz de proporcionar redução de até 20% dos valores de rugosidade (Ramesh *et al.*, 2001).

Verifica-se, no entanto, que na operação de retificação cilíndrica interna não há espaço físico que permita a alocação de tais defletores, impossibilitando seu uso.

#### 4.2.6. Utilização de bicos auxiliares

Segundo Marinescu (2007), além do uso do bico de lubrificação direcionado para área de contato peça-rebolo, pode ser benéfico o uso de bicos posicionados em direções radiais ao rebolo. Estes bicos tem como principal função remover os cavacos gerados, sendo que a eficácia deste procedimento depende mais da pressão do fluido do que propriamente do volume de fluido. Pode-se notar uma redução da rugosidade de peças retificadas pela aplicação de 2 ou mais destes bocais (Konig e Klocke, 1996) *apud* Marinescu (2007). A figura 13 ilustra a redução de rugosidade com o uso de bocais auxiliares.

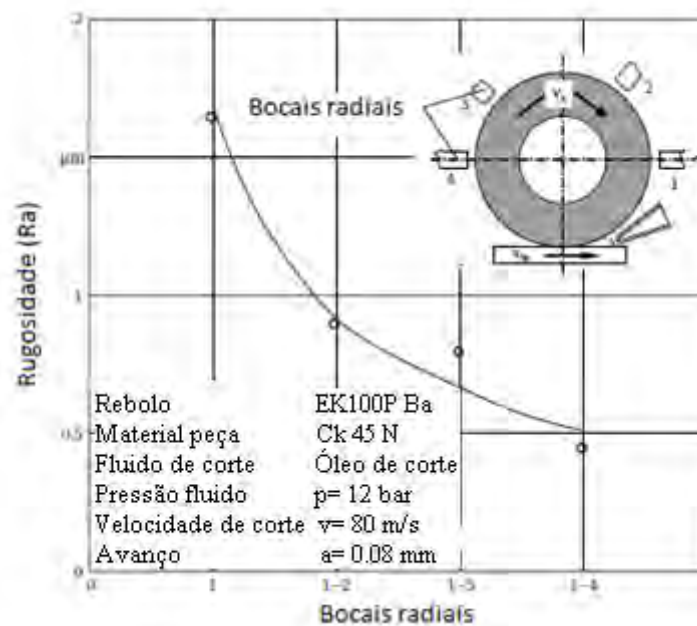


Figura 13- Influência dos bocais radiais de limpeza em um processo de retificação (Konig, 1996 *apud* Marinescu, 2007).

#### **4.2.7. Lubrificação através do rebolo**

Segundo Tawakoli (1990) *apud* Marinescu (2007), um conceito um pouco diferente de lubrificação seria o fornecimento de fluido de corte através do rebolo. Neste método o fluido é inserido em uma câmara dentro do rebolo e é expulso da mesma devido a ação da força centrífuga fluindo por meio de canais radiais, porém a complexidade técnica deste método tem dificultado sua aplicação mais ampla. Uma alternativa seria a utilização de um bocal convencional externo que fornece fluido a um rebolo poroso o qual expulsará este na região de corte por meio da força centrífuga. O desenvolvimento de diversos métodos de aplicação de fluido evidencia a sua grande importância.

#### **4.3. Danos térmicos**

Neste tópico será feita uma abordagem dos principais danos térmicos que podem ocorrer nas peças que foram sujeitas ao processo de retificação. O processo de retificação é capaz de provocar danos térmicos nas camadas superficiais das peças retificadas afetando as condições metalúrgicas e físicas das mesmas (Tarasov, 1950) *apud* (Alagumurthi, 2007).

##### **4.3.1. Queima Superficial da Peça**

A queima superficial da peça é um dos danos térmicos mais comuns encontrados na indústria. Quando a queima superficial começa existe uma tendência do crescimento de adesão de partículas metálicas nos grãos abrasivos do rebolo, tendo como consequência o aumento das forças de retificação e a deterioração da qualidade superficial da peça. Isso leva ao aumento da perda diametral do rebolo, fazendo com que o desgaste volumétrico aumente (Bianchi *et al.*, 2001).

Malkin (1989) diz que a queima superficial da peça influencia na alteração da microestrutura do material retificado. Na realização de medições de microdureza na sub-superfície de aços temperados, verificou-se que a queima superficial induzida pelo processo de retificação é acompanhada por um processo de re-austenitização do material. Em aços temperados retificados sem queima superficial existe normalmente um amolecimento do material próximo à superfície, uma vez que foram atingidas temperaturas inferiores às de austenitização. Com a queima ocorre a retempera do material, consequência da re-

austenitização, seguida da formação de martensita não-revenida. A constatação é feita com análise metalográfica, onde verifica-se o aumento da microdureza superficial.

Segundo Bianchi *et al.* (2001) evidências metalúrgicas e medições de microdureza indicam que o limite para início da queima visível coincide com o valor limite de temperatura para início de austenitização do material. A queima ocorre quando uma zona crítica de temperatura de retificação é ultrapassada. A sugestão de Malkin (1989) é que se monitore a potência do processo de retificação para evitar a ocorrência da queima.

#### **4.3.2. Tensões Residuais**

O processo de retificação origina tensões residuais na superfície usinada, afetando o comportamento mecânico do material. Tais tensões residuais são induzidas por deformações plásticas não-uniformes na superfície da peça, uma vez que o mecanismo de formação do cavaco na retificação inicia-se com deformações plásticas, resultando predominantemente em tensões residuais compressivas provocadas por deformações plásticas localizadas. Entretanto, o aquecimento e resfriamento de forma desigual ao longo da peça, mais rápido na superfície do que no núcleo, tende a gerar tensões residuais de tração. Tal fenômeno torna-se de maior complexidade se houver transformação de fases, já que isto implica em mudanças de volume. Para que a avaliação das tensões residuais seja confiável, todos esses fatores devem ser levados em conta.

Tensões residuais de compressão são consideradas benéficas nas propriedades mecânicas dos materiais e são comparáveis ao processo de *shot peening*, processo que utiliza um jateamento de granalhas de aço para induzir tensões de compressão em uma superfície (Silva, 2000). As tensões de compressão aumentam a resistência à fadiga, enquanto as tensões de tração são prejudiciais para a resistência mecânica, a corrosão e o desgaste (abrasão a altas temperaturas). De forma geral deseja-se controlar a indução das tensões residuais através da adequação das condições de usinagem. Todavia, a demanda por maiores taxas de remoção resulta em maiores tensões residuais de compressão, necessitando adotar taxas de remoção inferiores (Bianchi *et al.*, 2001).

### **4.3.3. Revenimento**

A retificação dos aços se dá após o tratamento térmico dos mesmos. O revenimento que ocorre devido ao calor do processo de retificação causa um amolecimento próximo à superfície acabada. A perda de dureza superficial é um fenômeno complexo, relacionado com o revenimento da estrutura martensítica e com a difusão de carbono, e depende da temperatura e tempos envolvidos no corte (Malkin, 1989).

Malkin (1989) refere que na prática é interessante a combinação do comportamento em relação ao revenimento com a análise térmica a fim de prever a queda de dureza na peça. Resultados experimentais demonstram que temperaturas mais altas e tempos mais longos em que a peça fica exposta a essas temperaturas, com velocidades da peça menores, ou comprimentos de contato mais longos, resultam em maior perda de dureza da peça. Passes de acabamento ou de centelhamento removem a camada afetada pelo revenimento.

### **4.3.4. Trincas**

As trincas são resultado do excessivo aquecimento durante o processo de retificação (Johnson, 1996). A severidade das trincas pode variar e a sua presença pode até não ser visível imediatamente após a retificação (Silva, 2000). Em algumas superfícies submetidas a elevadas tensões residuais de tração, as trincas irão formar-se abaixo da superfície e não serão visíveis até que o topo seja atacado eletricamente. As trincas reduzem o limite de resistência à fadiga do material, ao mesmo tempo em que aumenta a susceptibilidade da superfície do material ao ataque de processos corrosivos (Bianchi *et al.*, 2001).

## **4.4. Comandos numéricos computadorizados**

A introdução dos comandos numéricos computadorizados na indústria mudou consideravelmente os processos industriais, permitindo maior controle das máquinas. São muito utilizados em centros de usinagem e permitem o controle simultâneo de vários eixos, através de uma lista de movimentos escrita num código específico.

A implementação de Comandos Numéricos Computadorizados (CNC) às máquinas retificadoras tem auxiliado no que diz respeito ao desempenho do processo, fazendo com que todos os deslocamentos e acionamentos envolvidos estejam livres da influência do operador,

garantindo deste modo uma redução das imprecisões que conduzem a resultados insatisfatórios.

Segundo Rowe *et al.* (1996) o emprego de comandos numéricos computadorizados no processo de retificação possibilita:

- Selecionar corretamente a ferramenta abrasiva;
- Gravar e manipular informações referentes à produção dentro de um banco de dados;
- Controlar a máquina operatriz;
- Otimizar e monitorar o desempenho do processo abrasivo;
- Selecionar as condições de trabalho da máquina operatriz;
- Captar os valores otimizados dos parâmetros envolvidos no processo;
- Compensar as variações decorrentes da máquina e do processo.

Segundo Marinescu (2007), algumas desvantagens do uso dos comandos numéricos computadorizados são:

- Custo de aquisição elevado;
- Dependência de mão de obra especializada para reparos em casos de quebra;
- Necessidade de maior confiabilidade de dispositivos eletrônicos durante a vida útil dos mesmos.

#### **4.5. Revisão das variáveis de saída envolvidas no processo**

As análises das variáveis de saída do processo de retificação permitem avaliar o desempenho da operação, baseando-se nos objetivos do processo de retificação que visa a obtenção de produtos com elevada qualidade superficial, dimensional e geométrica. No entanto, tais requisitos devem estar inter-relacionados a uma busca constante por maior produtividade, redução de custos e maior flexibilidade do sistema de produção.

A seguir será feito um breve detalhamento sobre as principais variáveis de saída analisadas neste trabalho.

#### 4.5.1. Rugosidade das peças retificadas

Rugosidades são definidas como micro-irregularidades geométricas decorrentes do processo de fabricação de acordo com Agostinho *et al.* (1981) *apud* Catai (2004). A mensuração desta grandeza é feita baseando-se nos parâmetros de altura e largura dessas irregularidades.

Segundo Wang *et al.* (2005) a rugosidade das superfícies utilizadas na maioria das aplicações industriais é definida entre 0,025 e 1,5 $\mu$ m.

A qualidade da superfície gerada no processo de retificação é capaz de avaliar características da peça e da operação, tais como mínimas tolerâncias, eficácia do método de lubrificação, condições da ferramenta, transmissão de calor e vibração da máquina (Hecker & Liang, 2003). Segundo Hecker & Liang (2003), uma superfície típica do processo de retificação é isenta de sinais de corte e ranhuras. Todavia, vários micro-defeitos podem ser constatados fazendo-se uma análise minuciosa da superfície do material usinado, sendo os principais deles trincas ocasionadas por bruscas variações térmicas e crateras provocadas pelas fraturas dos grãos abrasivos. Tawfik (1993) *apud* Ali & Zhang (1999) afirmam que a qualidade superficial é diretamente dependente da profundidade de corte empregada e da dureza do material que está sendo usinado.

No que diz respeito ao comportamento da rugosidade em função do tempo de retificação, verifica-se que esta variável está diretamente relacionada com o crescimento da área plana do topo dos grãos abrasivos, que provoca sulcos mais largos nas peças. Além disso, o aumento da área de contato do topo do grão causa uma elevação da temperatura local, fazendo com que o material da peça se torne mais mole, aderindo-se mais facilmente aos poros do rebolo. Desta forma, este material aglutinado à ferramenta abrasiva acaba gerando vários riscos na peça, aumentando assim os valores de rugosidade (Malkin, 1989).

Hecker & Liang (2003) afirmam que um método eficiente de se mensurar a qualidade da superfície produzida é por meio do parâmetro definido como rugosidade, o qual é representado em função da distância entre os picos e vales existentes na superfície produzida. Assim, pode-se obter a rugosidade pela média dos valores dessa distância (rugosidade  $R_a$ ), pelo valor quadrático médio dessa distância (rugosidade  $R_q$ ) ou ainda pelo valor máximo da mesma (rugosidade  $R_t$ ).

Segundo Hecker & Liang (2003) este parâmetro é definido matematicamente, da seguinte forma:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y - y_{CL}| * dl \quad (9)$$

em que:

L é o comprimento de medição;

y é a altura do pico ou a profundidade do vale;

$y_{CL}$  é a variável que define o posicionamento da linha de centro.

Os índices de rugosidade medidos longitudinalmente em relação à direção de corte, apresentam valores mais baixos do que os medidos transversalmente (Hecker & Liang, 2003). Todavia, na indústria, aplica-se preferencialmente o método de medição transversal.

Bianchi *et al.* (1997) analisaram a rugosidade obtida na retificação de vários aços usinados com diferentes ferramentas. Os autores puderam concluir que na retificação de aços frágeis utilizando-se rebolo macio, a rugosidade decresce à medida que se amplia o número de grãos ativos, responsáveis pela redução da espessura relativa do cavaco. No que diz respeito a aços dúcteis retificados com rebolo macio de granulometria fina, observou-se que a rugosidade foi crescente de acordo com o desgaste do rebolo, devido ao aumento do número de grãos cegos na superfície do rebolo.

Kwak *et al.* (2005) estudaram a relação entre a rugosidade e a força de corte envolvida na operação de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço SCM 440. Os autores observaram que um aumento da profundidade de corte foi responsável por aumentar a intensidade da força, o que por consequência, aumentou as alturas dos picos de rugosidade. Utilizando-se maiores tempos de *spark-out* conseguiu-se reduzir a intensidade da força, no entanto, os valores de rugosidade não se enquadraram dentro dos padrões desejados.

#### **4.5.2. Desgaste do rebolo e relação G**

O desgaste do rebolo está relacionado à perda diametral da ferramenta (desgaste volumétrico) e também com a perda da capacidade de corte da face de trabalho. Tais fenômenos dependem em grande escala do tipo do rebolo, das condições de dressagem e de retificação e também da dureza do material de que a peça é feita. Normalmente os dois tipos de desgaste ocorrem simultaneamente, diferindo apenas em intensidade. Observa-se, contudo, que o desgaste abrasivo prevalece sobre os outros desgastes, resultando na perda das arestas

cortantes dos grãos. Isso pode ser verificado pela remoção forçada de material e ineficiente expulsão dos cavacos da porosidade do rebolo, formando um empastamento na região de corte.

O desgaste do rebolo se dá de modo bastante complexo em função dos diversos fenômenos que ocorrem entre os grãos abrasivos e a peça durante o processo de retificação. Segundo Malkin (1989) é deficiente o equacionamento que rege o mecanismo de desgaste de uma ferramenta abrasiva, sendo ele feito quase que integralmente de maneira empírica, por meio de um inter-relacionamento dos parâmetros envolvidos no processo.

O desgaste por atrito está relacionado ao ‘cegamento’ dos grãos abrasivos e conseqüente ampliação de áreas planas, as quais promovem um aumento do atrito entre o rebolo e a peça, podendo ocasionar danos térmicos. A fratura do grão e do aglomerante está relacionada à submissão da ferramenta a esforços demasiados. A fratura do aglomerante implica num desgaste bastante acentuado do rebolo pelo fato de permitir o desalojamento de grãos abrasivos inteiros.

Todavia, o desgaste por atrito é o mais importante dentre todos os outros desgastes, pois é ele quem controla diretamente a intensidade das forças de retificação e também a taxa de fratura do aglomerante. Sabe-se que os grãos abrasivos, durante o processo de retificação, são submetidos a esforços normais e tangenciais. Esforços normais ( $f_n$ ) tendem a gerar tensões compressivas, enquanto esforços tangenciais ( $f_t$ ) proporcionam o surgimento de tensões de tração (Malkin, 1989).

O parâmetro relação  $G$  define a resistência do rebolo ao desgaste, definido como sendo a relação entre o volume de material removido ( $Z_w$ ) e o correspondente volume de rebolo gasto ( $Z_s$ ), ambos em  $\text{mm}^3$ . Logo, a relação  $G$  pode ser expressa, segundo Malkin (1989) da seguinte forma:

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (10)$$

Partindo-se desta equação, verifica-se que um valor pequeno da relação  $G$  implica em um desgaste elevado do rebolo, indicando a ocorrência de auto-afiação com renovação automática dos grãos abrasivos. Todavia, se o desgaste for pequeno, a relação  $G$  é alta, não havendo troca dos grãos gastos, resultando na perda da agressividade do rebolo.

Bianchi (1996) estudou a influência da velocidade da peça no desgaste do rebolo e verificou que o emprego de maiores velocidades da peça, mantendo-se a velocidade de avanço e a rotação do rebolo constantes, resulta em uma menor penetração da ferramenta por

volta da peça, provocando grandes impactos entre os grãos e a peça, proporcionando a formação de cavacos curtos. Este fenômeno reduz o número de grãos abrasivos localizados na superfície do rebolo, aumentando os esforços sobre cada um deles. Sob esforços os grãos tendem a se fraturarem e a se auto-afiarem, estabilizando as forças de corte. Esta condição, no entanto, provoca um desgaste volumétrico maior da ferramenta.

Por outro lado, utilizando-se baixas velocidades da peça, observa-se uma maior penetração do rebolo por volta da peça, fato que implica em menores impactos dos grãos abrasivos com a peça formando, deste modo, cavacos alongados. Com menores impactos, o tempo de contato e o número de grãos ativos são maiores, reduzindo os esforços por grão abrasivo. Neste caso, observa-se uma tendência à formação de áreas planas nos grãos, aumentando os esforços de corte gradativamente, resultando em um desgaste volumétrico menor.

#### 4.5.3. Desvios de Circularidade

É fundamental o monitoramento dos desvios de circularidade para que se consiga uma análise de tolerância bastante precisa de peças com geometria circular (Cho & Tu, 2001). Os erros de circularidade ocasionados pelo processo durante a usinagem (figura 14), estão relacionados as condições de retificação, aos danos térmicos que possam ter ocorrido, às solicitações mecânicas e às condições de aplicação do fluido de corte. O erro de circularidade expressa qual o erro de forma final da peça usinada, ou seja, indica o estado cilíndrico final da peça, fator muito importante nos processos de retificação de precisão (Fusse *et al.*, 2005).

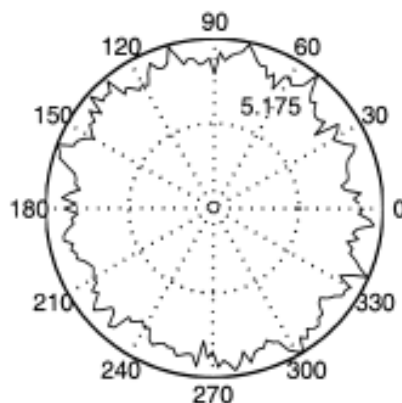


Figura 14- Desvio de Circularidade observado em uma peça retificada (Cho & Tu, 2001).

De acordo com Cho & Tu (2001) o desvio de circularidade é definido baseando-se em dois limites circulares concêntricos que compreendem o maior pico e menor vale de um perfil (ASME Y14.5M-1994).

Um fator responsável por ocasionar desvios de circularidade é o desbalanceamento do rebolo, o qual é causado por uma massa ou concentração de massa que não está distribuída simetricamente sobre o eixo de rotação. Este desbalanceamento de massa do rebolo irá atritar a peça de maneira alternada.

Segundo Chen (2002) os desvios de circularidade estão relacionados a rotações imperfeitas do conjunto peça-ferramenta, a vibrações associadas ao desbalanceamento do rebolo, a ações de corte errôneas, a lubrificação inadequada, ao desgaste da ferramenta e a defeitos em componentes da máquina. Isto é explicado pelo fato de tais componentes serem fabricados por outras máquinas-ferramentas, que também produzem peças com erros de circularidade, ocasionando deste modo a transferência dos desvios de uma máquina para outra.

#### **4.5.4. Microdureza**

A queima superficial, quando da retificação de aços temperados e revenidos, provoca um aumento da dureza superficial, em função da retêmpera do material, a qual é conseqüência da reaustenitização do mesmo, seguido da formação da martensita não-revenida. Isto traz um aspecto adverso quanto ao limite de resistência à fadiga do material, pela formação de uma microestrutura frágil. Para os mesmos aços retificados sem a incidência da queima superficial, geralmente existe um amolecimento do material, devido ao fato de se atingir temperaturas inferiores à de austenitização.

De acordo com Malkin (1989), a queima visível da peça é caracterizada pela presença de tons azulados na sua superfície, os quais são conseqüência da formação de uma camada de óxidos. A queima pode levar ao aumento da perda diametral do rebolo em função do crescimento da adesão de partículas metálicas nos grãos do mesmo, elevando assim os esforços de corte.

Os aços são geralmente retificados em seu estado temperado-revenido. Dependendo da intensidade do aquecimento gerado durante o processo de retificação e da taxa de resfriamento imposta à peça retificada pela ação do fluido de corte, pode-se obter uma diminuição de sua dureza superficial, bem como levar à formação de estruturas martensíticas

não-revenidas (Malkin, 1989). Estas são formadas quando atinge-se a temperatura de austenitização do material, seguido de um processo de resfriamento rápido. A formação ou não desta estrutura martensítica, a qual é regida por mecanismos de difusão de carbono, é um processo complexo, definido em função da temperatura atingida durante o processo de corte, do tempo de aquecimento e das velocidades de resfriamento impostas pelo fluido de corte.

O ensaio de dureza é realizado através da aplicação de uma carga a um indentedor sobre a superfície de um material. Dividindo o valor da carga aplicada pela calota proveniente da deformação iniciada sob a ação da carga obtém-se o valor da dureza.

O ensaio de dureza é amplamente aplicado em pesquisas e no ramo industrial por ser um método barato e rápido de execução sendo possível a utilização de durômetros portáteis.

Atualmente existem vários métodos qualitativos para a análise da dureza de materiais, tais como: Vickers, Rockwell, Brinell e microdureza Knoop.

A microdureza Vickers é obtida com um penetrador de diamante em forma de pirâmide, de base quadrada, com um ângulo de  $136^\circ$  entre as faces opostas (Figuras 15a, 15b e 15c). Utiliza-se carga menor que 1kgf, a qual produz uma impressão em forma de losango regular com a base quadrada (Ferreira, 2004).

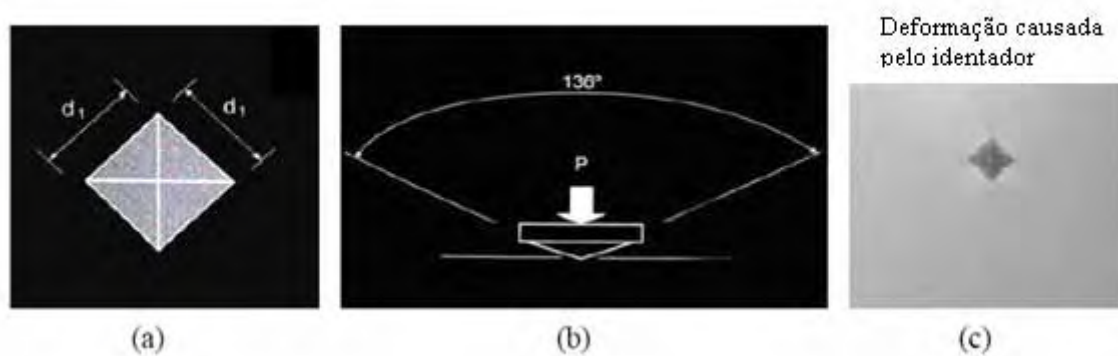


Figura 15- a) Base quadrada; b) Angulação; c) Indentação Vickers. (Ferreira, 2004).

Segundo Ferreira (2004) a microdureza Knoop é obtida com um indentedor de diamante em forma de pirâmide, alongada (Figuras 16a e 16b).

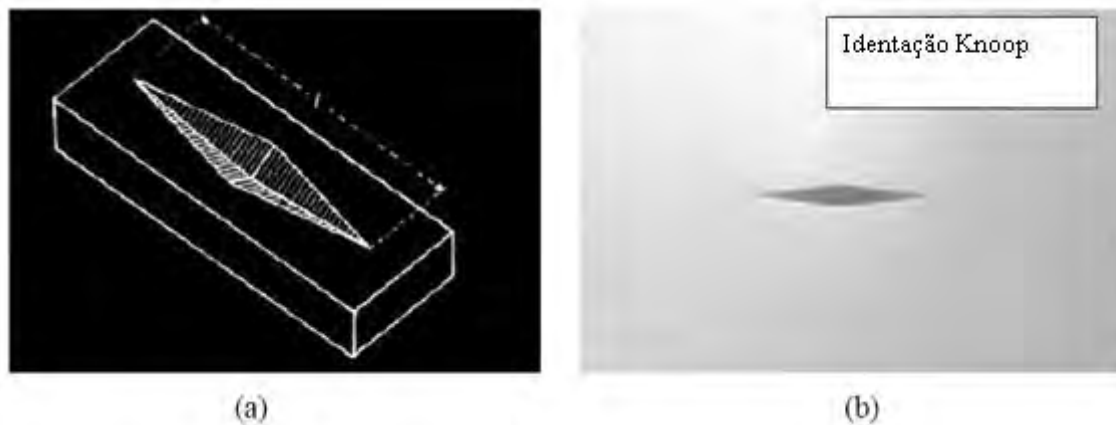


Figura 16- a) Desenho esquemático; b) Indentação Knoop (Ferreira, 2004).

A impressão Knoop é largamente utilizada em função de seu formato estreito. O indentador Knoop possibilita o trabalho em regiões finas, ao contrário do indentador Vickers. Para uma mesma carga, a profundidade da impressão Knoop é menor do que a metade da profundidade obtida com a impressão Vickers.

A microdureza é uma variável que reforça as afirmações que podem ser feitas na análise da microscopia do material usinado.

#### 4.5.5. Microestrutura - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura é capaz de possibilitar a visualização da superfície de amostras volumosas. Estes instrumentos obtiveram rapidamente grande aceitação devido à sua ampla gama de utilização e a facilidade na preparação das amostras. Mannheim (2002) afirma que o MEV tem sua maior aplicação no exame de superfícies rugosas (contraste topográfico). A fácil visualização e interpretação das imagens foram desde o início um dos elementos marcantes do sucesso do instrumento.

O MEV possui vantagens com relação ao microscópio óptico, possui alta resolução em torno de  $0,003\mu\text{m}$  contra  $0,1\mu\text{m}$  do microscópio óptico. O poder de resolução do MEV garante ampliações da ordem de 10 a 300.000 vezes (Goldstein *et al.*, 1992). Outra vantagem é a profundidade de foco, cerca de 300 vezes maior no MEV. O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento de grande potencial, podendo realizar diferentes análises. Na área de materiais o MEV é utilizado principalmente na análise microestrutural, como fases, análise de superfícies fraturadas, micro-análise qualitativa e quantitativa com o auxílio de acessórios, determinação do tamanho de grão e porcentagem de fase em microestruturas de

materiais, além disso possui uma análise voltada para pesquisa e desenvolvimento com fácil interpretação das imagens, com aparência tridimensional.

#### 4.5.5.1. Componentes Básicos do MEV

O MEV apresenta uma construção complexa com diversos componentes, tais como: coluna, unidade de varredura, câmara da amostra, sistema de detectores e sistema de visualização de imagens (Maliska, 2006). Um esquema simplificado pode ser visualizado por meio da figura 17:

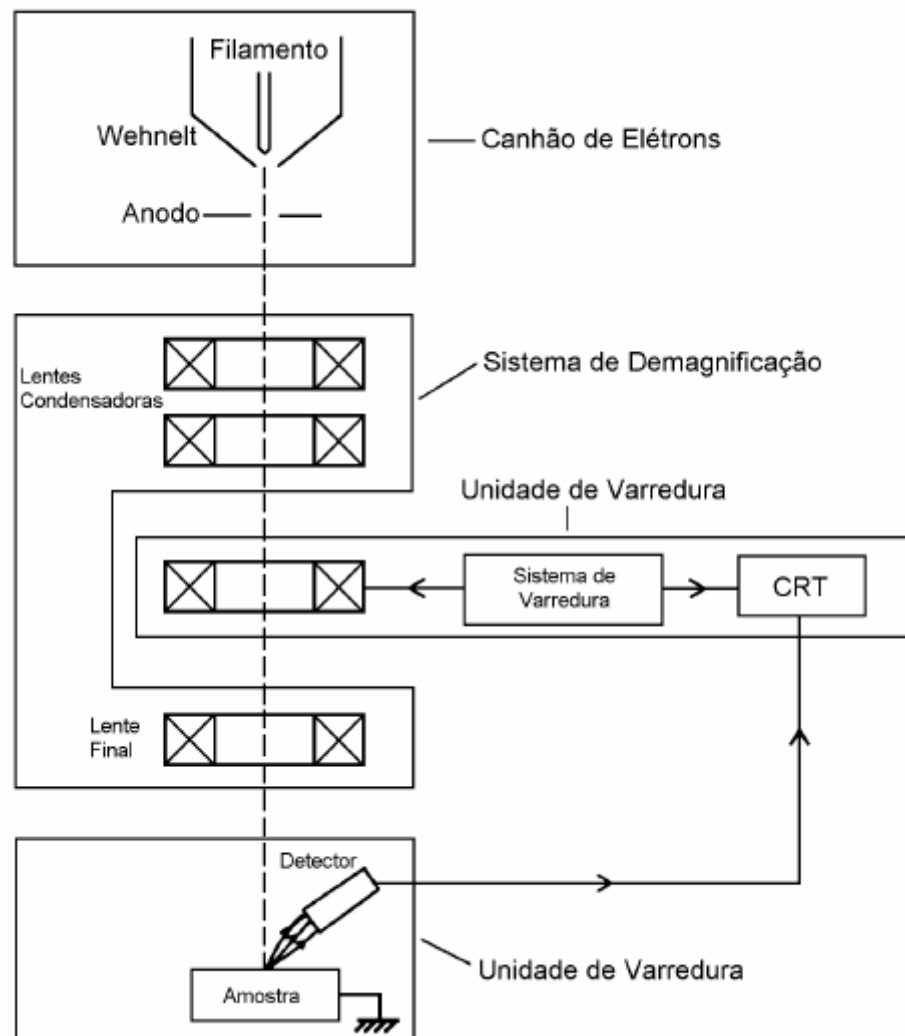


Figura 17- Esquema de construção do MEV (Maliska, 2006).

#### **4.5.5.2. Preparação de Amostras para MEV**

O MEV permite que se trabalhe com uma grande variedade de tipos de amostras (Botta e Moreira, 2001). O usuário deve estar apto a trabalhar com diversos métodos de preparação. Podem ser usadas amostras polidas, de fratura, pós, partículas e outras, cada uma com suas particularidades. Para que se obtenham bons resultados nos trabalhos com o MEV, é importante que as amostras sejam de boa qualidade. Sendo assim, pode-se obter imagens de boa qualidade e microanálises confiáveis. Este item apresenta uma explicação básica sobre alguns tipos de amostras e sua forma de preparação para observação no MEV.

##### **4.5.5.2.1. Tamanho da amostra**

A câmara da amostra é um compartimento fechado, que permanece sob vácuo. Portanto, a necessidade básica quanto ao tamanho da amostra é que ela caiba dentro da câmara. Deve-se atentar para que quanto maior a amostra, maiores os cuidados a serem tomados durante a operação do equipamento. Isto porque os movimentos nos eixos X, Y e Z ficam limitados, aumentando a possibilidade de colisão nas paredes na câmara ou em algum detector. Existem MEVs que permitem trabalhos com amostras de até 125 mm de diâmetro, mas segundo Botta e Moreira (2001) o convencional são os equipamentos que permitem o uso de porta-amostra com diâmetro de 40-50 mm.

##### **4.5.5.2.2. Limpeza da amostra**

A amostra para MEV deve estar bastante limpa, isenta de poeira, líquidos, óleos, graxas ou qualquer outro tipo de contaminante para que se façam boas observações e para preservar o equipamento. A presença de óleos e graxas contamina a coluna, detectores, aberturas, entre outros componentes. Esse problema da limpeza é mais crítico em equipamento que trabalham sob alto vácuo, pois a presença de substâncias voláteis torna difícil a obtenção do vácuo necessário.

Recomenda-se que a amostra seja limpa com um solvente orgânico em um banho de ultra-som. Os solventes mais empregados são acetona e etanol, comuns na prática metalográfica. Após a limpeza com solvente sopra-se ar limpo sobre a amostra. Se a amostra

não puder ser limpa com solvente, deve-se escová-la com um pincel ou escova de cerdas macias, soprando-se ar em seguida. Caso a amostra não seja utilizada após à limpeza, deve-se guardá-la em um lugar limpo e seco, sendo bastante recomendado o uso de dessecadores para que a amostra fique protegida contra umidade e poeira.

#### **4.5.5.2.3. Montagem das amostras**

As amostras devem ser colocadas em porta-amostras apropriados que são encaixados dentro da câmara da amostra. O objeto a ser observado deve estar bem fixo, evitando movimentos que prejudiquem o trabalho ou mesmo que haja queda dentro da câmara. Outra questão fundamental é que a amostra deve permitir que o excesso de elétrons atinja o potencial de terra, ou seja, os elétrons que não são reemitidos pela amostra tenham possibilidade de seguir um caminho que lhes permita “sair” da mesma, evitando o carregamento. O contato elétrico para permitir essa passagem dos elétrons é feito através de fitas condutoras ou de camadas condutoras depositadas sobre a superfície da amostra.

#### **4.5.5.2.4. Amostras embutidas**

A fixação das amostras metalográficas embutidas é simples. As amostras são inseridas em um porta-amostras pouco maior que seu diâmetro, sendo fixadas em seguida por parafusos. Deve-se aplicar uma camada condutora sobre sua superfície se a amostra não for condutora, para evitar o carregamento. O contato entre a amostra e o porta-amostra é feita por uma fita metálica, que toca um canto da amostra e o parafuso de fixação. A figura 18 apresenta este esquema de fixação. A superfície da amostra deve ficar na altura do porta-amostra, pois caso fique muito acima, aumentam-se as chances de colisão no interior da câmara. Se ficar muito abaixo há perda de sinal, pois uma parte do sinal emitido atinge as paredes do porta-amostra. Para se atingir a altura correta, utilizam-se calços sob a amostra.

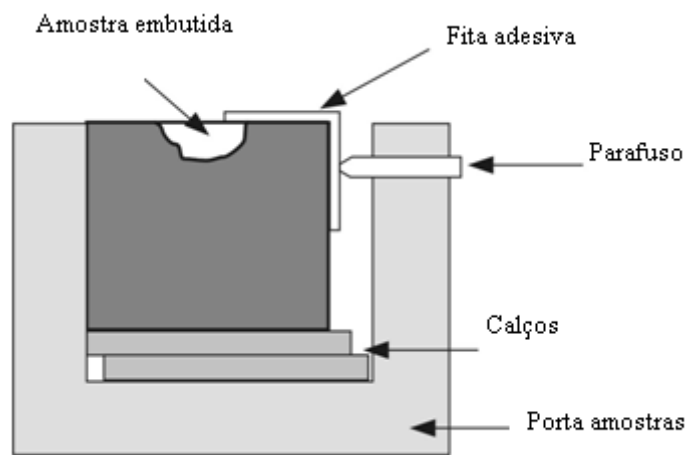


Figura 18- Fixação de amostra embutida.

A utilização de resinas condutoras (contendo pó de cobre ou de ferro) para embutimento de amostras a serem analisadas em MEV dispensa a necessidade de se usar fita condutora para contato.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada uma descrição detalhada dos materiais utilizados, bem como dos procedimentos adotados para a realização dos ensaios de retificação cilíndrica interna de mergulho.

O banco de ensaios montado consistia basicamente de uma retificadora cilíndrica da marca SULMECÂNICA, modelo RUAP 515 H-CNC, na qual foram instalados alguns acessórios necessários para o trabalho tais como o medidor de vazão de fluido de corte, cabeçote pneumático, bocal convencional, bocal modificado de lubri-refrigeração e suporte para a fixação dos corpos de prova. A retificadora pode ser visualizada na figura 19.



Figura 19- Banco de ensaios montado para a realização dos experimentos.

### 5.1. Ensaios e Testes Preliminares

Para a realização dos ensaios foram utilizados rebolos 38A100MVHB, os quais foram doados pela empresa Saint-Gobain com diâmetro de 12 mm e largura de 19 mm em óxido de alumínio branco, granulometria 100, dureza M e liga vitrificada, os quais possuíam uma haste roscada para facilitar e agilizar a troca de ferramentas como pode ser observado na figura 20. No entanto, para realizar sua fixação foi necessário confeccionar uma haste que seria fixada ao cabeçote pneumático. Inicialmente esta foi confeccionada conforme mostrado na figura 21 prevendo reforços onde haveria esforços de flexão e observando a limitação imposta pelo

fabricante do cabeçote de que o rebolo montado na haste não deveria possuir comprimento superior a 40 mm.



Figura 20- Rebolo de óxido de alumínio utilizado para realização dos ensaios.

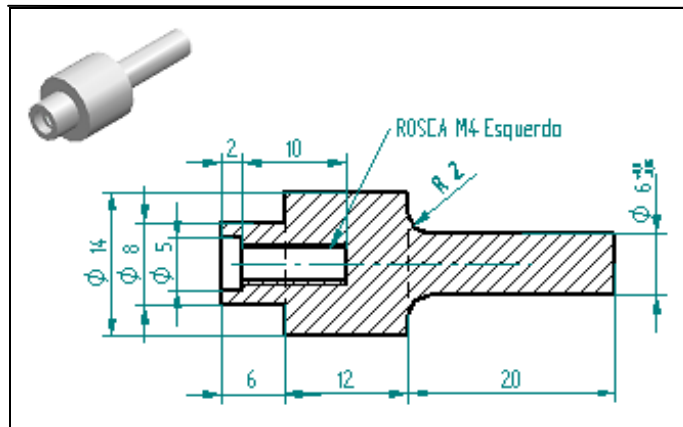


Figura 21- Projeto inicial da haste para fixação do rebolo.

Entretanto, devido a esforços durante a usinagem e a vibrações produzidas pelo cabeçote o rebolo soltava-se da haste durante o processo. Isto ocorreu devido a direção da rosca do rebolo fornecido pela empresa, esta rosca impossibilitava o auto-aperto durante o processo de retificação. No intuito de corrigir esse problema foi acrescentado ao projeto da haste a utilização de dois parafusos que contribuiriam para a fixação do rebolo como visto na figura 22.



Figura 22- Detalhe da haste utilizada para fixação do rebolo.

## 5.2. Corpos de prova e suportes de fixação

Os corpos de prova foram confeccionados em aço SAE 52100, aço muito utilizado em pistas e esferas de rolamentos. A figura 23 apresenta o corpo de prova que foi utilizado nesta pesquisa com diâmetro externo de 52mm , diâmetro interno de 38mm e largura de 28mm.



Figura 23- Corpo de prova definitivo.

Após a confecção dos corpos de prova, os mesmos foram submetidos ao tratamento térmico de têmpera em banho de sal executada em forno elétrico, a temperatura de 860 °C durante 1 hora e revenimento, a temperatura de 160°C durante 2 horas passando a possuir uma dureza média de 60 HRc.

A geometria dos corpos de prova visou facilitar o procedimento de fixação, além de garantir perfeito encaixe no novo suporte fixador empregado, capaz de fixar peças de 52 mm de diâmetro externo. O suporte pode ser visualizado na figura 24.



Figura 24- Suporte fixador do corpo de prova.

### 5.3. O Cabeçote Retificador

O cabeçote da marca Fae, modelo F-70 utilizado para a execução dos ensaios é alimentado por ar comprimido, o qual aciona uma turbina responsável por fazer o eixo girar. Para a alimentação do cabeçote retificador (figura 25) com ar comprimido utilizou-se um compressor da marca Schulz com capacidade de vazão de 30 pés<sup>3</sup>/min.



Figura 25- Cabeçote retificador utilizado nesta pesquisa.

As especificações do cabeçote retificador encontram se abaixo:

Potência: 540 watts

Pressão: 2 a 4 kg/cm<sup>2</sup>

Consumo: 210 l/min

Profundidade total de retificação: 40 mm

#### 5.4. Medição da Rotação do Rebolo

Para aferir a rotação atingida pelo cabeçote foi utilizado um tacômetro óptico da marca Instruterm, modelo TDR-800, o qual faz a medição por meio da emissão de um feixe de luz infravermelha que incide sobre uma fita reflexiva adequadamente fixada sobre a superfície em movimento. A cada rotação a luz incide sobre a fita e é refletida para o tacômetro, possibilitando a medição. Inicialmente tinha-se o objetivo de fixar esta fita em uma região neutra do cabeçote, de modo a não interferir na operação de retificação, buscando monitorar a rotação em tempo real durante todo o processo. No entanto, as dimensões da fita eram maiores do que as dimensões das áreas disponíveis no rebolo. Nesta situação, optou-se por fixar a fita sobre a superfície de corte de um rebolo já desgastado, que passou então a ser utilizado apenas para realizar a aferição da rotação, conforme figura 26.



Figura 26- Medição da rotação do cabeçote retificador.

## 5.5. Sentido de Avanço do Rebolo

Tendo em vista a possibilidade de se efetuar a retificação na face interna anterior e posterior da peça, ambos no sentido concordante, optou-se por averiguar o desempenho de ambas as faces, avaliando qual posição possibilitaria a obtenção de uma melhor qualidade superficial em função do sentido de avanço do rebolo, conforme figura 27.

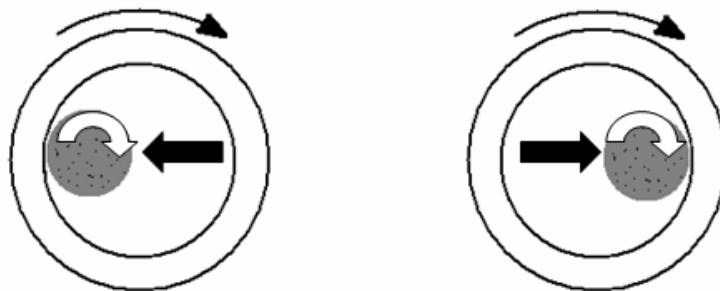


Figura 27- Esquemática dos sentidos de avanço do rebolo.

Após a execução dos testes não se observou diferença significativa entre os dois métodos. Desta forma, a escolha da face usinada pôde ser definida em função da facilidade de alocação do bocal convencional e principalmente do bocal modificado, o qual requer um posicionamento mais cuidadoso de modo a evitar possíveis colisões com a peça.

## 5.6. Preparação do Fluido de Corte

O fluido de corte semi-sintético (Rocol Ultracut 370) foi preparado objetivando-se uma concentração de 5% de óleo, seguindo a recomendação do fabricante. Para isso, diluiu-se cerca de 4,5 litros de óleo em 90 litros de água contidos no reservatório.

Fez-se necessário em alguns momentos, adicionar água à emulsão a fim de manter a concentração dentro dos patamares desejados. Para a medição da concentração utilizou-se um refratômetro manual de bolso, da marca ATAGO modelo N-1E.

### 5.7. Método convencional de lubri-refrigeração

Para o método convencional de lubri-refrigeração utilizou-se vazão de 10 litros por minuto. Na figura 28 pode-se observar a operação de retificação cilíndrica interna de mergulho empregando-se a técnica convencional de lubri-refrigeração.



Figura 28- Operação de retificação interna empregando-se a técnica convencional de lubri-refrigeração.

### 5.8. Método de lubri-refrigeração com bocal modificado

Para a realização dos ensaios onde foi empregado o bocal modificado foi confeccionado um bocal com características construtivas semelhantes ao modelo proposto por Webster que apresenta a tendência de aproximar as lâminas de fluido que se formam no interior do bocal diminuindo o efeito de turbulência do fluido de corte e mantendo uma velocidade com que o fluido penetra na região de corte de modo a minimizar os possíveis impactos fluido/ferramenta. Levou-se em consideração o comprimento da face do rebolo para determinação da largura do bocal, objetivando atingir toda a região de corte. O bocal confeccionado é apresentado na figura 29.

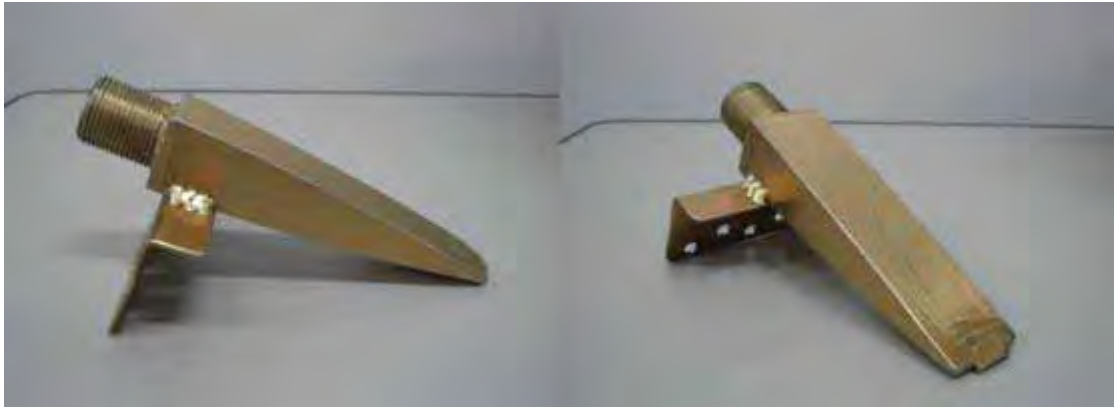


Figura 29- Bocal modificado.

### 5.9. Medição de vazão

A medição da vazão foi feita conectando-se um medidor de vazão modelo SVTG DMY-2030 fabricado pela empresa Contech, à rede de fluido de corte, fornecendo diretamente através do visor a leitura da vazão em l/min. Este medidor é do tipo turbina, capaz de gerar um campo magnético em função da rotação da turbina. Este campo magnético é captado por sensor posicionado logo acima da turbina do medidor e a vazão é mostrada no visor de leitura do aparelho.

### 5.10. Vazões e velocidades do fluido de corte

Nos ensaios realizados com o bocal modificado foram utilizadas vazões de 12 l/min, 16 l/min e 21 l/min. Considerando-se a área de saída do bocal modificado, tem-se que a velocidade de saída do jato de fluido é dada pela equação da continuidade da mecânica dos fluidos (11), conforme abaixo:

$$v_j = Q/A \quad (11)$$

Onde Q é a vazão de fluido.

Utilizando-se o método acima descrito, foram obtidos os seguintes valores de velocidade de saída do jato de fluido, apresentados na tabela 1:

Tabela 1 – Velocidades de saída do jato de fluido em função da vazão.

Vazão adotada (l/min)	Área de saída do bocal (mm <sup>2</sup> )	Velocidade saída jato (m/s)
12	14,3	14
16	14,3	19
21	14,3	25

### 5.11. Classificação dos Ensaiois

Neste trabalho retificou-se 20 corpos de prova, sendo os 5 primeiros submetidos ao método convencional de lubri-refrigeração com vazão de fluido igual a 10 l/min e os outros submetidos ao método com bocal modificado. Utilizou-se para o bocal modificado três vazões distintas de fluido: 12 l/min, 16 l/min e 21 l/min que garantiam velocidades de saída do fluido de aproximadamente 14 m/s, 19 m/s e 25 m/s respectivamente, conforme Tabela 1 citada anteriormente. O intuito de se empregar essas vazões era verificar a influência da velocidade do jato na eficiência do processo. Inicialmente desejava-se uma velocidade de jato do fluido igual à velocidade periférica do rebolo de 30 m/s (condição ótima), porém a bomba não fornecia vazão suficiente e por isso foi adotado o valor de 25 m/s ou 21 l/min de vazão. Na tabela 2 é feita a classificação dos ensaios executados neste trabalho.

Tabela 2 - Classificação dos Ensaiois

Sequência de Ensaiois	Método de Refrigeração	Vazão de Fluido (l/min)	Velocidade fluido (m/s)
1	Convencional	10	-
2	Bocal Modificado	12	14
3	Bocal Modificado	16	19
4	Bocal Modificado	21	25

### 5.12. Operação de Dressagem

A dressagem foi executada, aplicando-se 2kgf/cm<sup>2</sup> de pressão de ar comprimido ao cabeçote, que manteve uma rotação de aproximadamente 35.000 rpm, evitando-se desta forma uma rotação excessiva do rebolo que pudesse danificar a sua superfície. Utilizou-se para tal

operação um dressador do tipo conglomerado da Marca Master Diamond de 10 x 15 mm. Este dressador apresenta diversos diamantes em uma matriz metálica, este tipo de dressador foi utilizado devido a maior possibilidade de obtenção de valores de rugosidade reduzidos pela ação do micro efeito de dressagem. Pode-se visualizar a operação de dressagem analisada através da figura 30.



Figura 30- Operação de dressagem do rebolo.

### **5.13. Procedimentos Adotados para a Realização dos Ensaios**

Neste item será feito um detalhamento dos procedimentos empregados para a execução de cada ensaio.

1. Dressagem do rebolo, retirando-se  $2\mu\text{m}$  por passada do dressador, executando-se 10 passadas do dressador por dressagem, removendo-se desta forma  $20\mu\text{m}$  do raio do rebolo. Como o deslocamento da mesa era feito manualmente, procurou-se executar cuidadosamente os deslocamentos com velocidade constante;
2. Fixação do corpo de prova no suporte de fixação da máquina retificadora, deslocando em seguida o rebolo para a posição de contato rebolo/peça manualmente,

determinando deste modo a coordenada de contato que seria introduzida no programa CNC;

3. Checagem da concentração de fluido de corte e então inicialização do programa CNC da máquina para a execução do ensaio. Nesta operação executou-se 180 ciclos de 8 $\mu$ m de avanço radial (ou mergulho), removendo ao final um total de 1,44 mm no raio interno da peça;
4. Numeração e armazenagem do corpo de prova para análises posteriores, onde era aplicada uma camada de óleo lubrificante para proteger a superfície.

Depois de realizados todos os ensaios foi feita a limpeza das peças através de banhos em querosene, thinner, álcool anidro e tetracloreto de carbono para evitar que partículas influenciassem nas medições das variáveis de saída. Em seguida foram feitas as medições de rugosidade, erros de circularidade e desgaste diametral do rebolo.

#### **5.14. Parâmetros de usinagem**

Os parâmetros de usinagem utilizados neste trabalho foram:

- $d_s = 12,0$  mm (diâmetro do rebolo)
- $v_s = 30,0$  m/s (velocidade periférica do rebolo)
- $n_{w1} = 810$  rpm (rotação do suporte de fixação do corpo de prova)
- $d_{w1} = 38,0$  mm (diâmetro interno da peça)
- $v_{w1} = 96,6$  m/min (Velocidade periférica peça)
- $v_f = 0,25$  mm/min (Velocidade de mergulho)
- Tempo de spark-out: 20 segundos
- Volume de material removido: 1,4 mm<sup>3</sup> aproximadamente.

#### **5.15. Procedimentos Adotados para a Medição das Variáveis de Saída**

Neste tópico será feita uma descrição detalhada dos procedimentos que foram efetuados para a medição das variáveis de saída analisadas neste trabalho.

### 5.15.1. Medição dos desvios de circularidade

As medidas dos desvios de circularidade foram feitas utilizando-se uma máquina específica para controle de tolerâncias geométricas e de forma, denominada TALYROND 31 C, da marca Taylor Robson®.

Antes de cada medição as peças foram limpas com banhos de produtos químicos (Querosene, Thinner, Álcool Anidro e Tetracloreto de Carbono), responsáveis pela remoção de pequenas partículas que podiam interferir nos resultados.

As peças foram fixadas no aparelho através das castanhas da placa. Depois de fixada a peça, aproximava-se o apalpador, conforme figura 31 e então executava-se cinco medições em posições verticais distintas do apalpador, executando o deslocamento de 2,0 mm da haste no eixo Z (vertical) da máquina entre cada medição.



Figura 31- Medição dos desvios de circularidade da peça retificada.

### 5.15.2. Medição da rugosidade

Foram feitas as medições de rugosidade utilizando-se um rugosímetro da marca Hank Taylor Robson®, modelo Surtronic 3+. O comprimento de medição (cut-off) utilizado foi de 0,8 mm e o filtro foi o 2CR - fase corrigida. O raio da ponta do diamante medidor de rugosidade foi de 0,2  $\mu\text{m}$ .

Foram realizadas cinco medições para cada peça, sendo estas feitas em regiões distintas e equidistantes em relação ao perímetro da mesma. Com estes valores foi possível obter uma média aritmética e também um desvio-padrão, podendo-se então, disponibilizar os

resultados referentes à rugosidade na forma de gráficos de barras, os quais serão apresentados posteriormente.

### 5.15.3 Medição do desgaste diametral do rebolo

Para a verificação do desgaste diametral do rebolo utilizou-se um microscópio esterioscópico óptico da marca NIKON, modelo SMZ 800 conectado a uma câmera digital de alta definição da marca COPI modelo DSP e placa processadora de imagens *PixelView Station 4* instalada em microcomputador. Dos 19 mm de largura do rebolo apenas 10 mm foram utilizados para usinar as amostras e desta forma foi possível neste equipamento visualizar o degrau característico do desgaste da ferramenta e assim determinar computacionalmente através de um programa de CAD (Solid Edge) o desgaste diametral do rebolo (diferença de altura entre o degrau). Para termos um parâmetro de comparação para determinação da medida em micrometros do degrau foi feita uma fotografia através do microscópio de uma escala. Novamente foram realizadas cinco medições em fotografias feitas em diferentes regiões do rebolo de modo a possibilitar o cálculo de uma média e um desvio padrão. Tal equipamento está localizado no Laboratório da Tecnologia de Usinagem (LATUS), da UNESP *campus* de Bauru, cujo responsável, Prof. Dr. Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez, gentilmente permitiu sua utilização.



Figura 32- Degrau característico do desgaste do rebolo fotografado através de um microscópio.

#### 5.15.4. Preparação das amostras para análise de microdureza e MEV

Ao final dos ensaios os corpos de prova utilizados para cada condição foram preparados, antes de serem submetidos às análises de MEV e microdureza. Foram cortadas duas partes como mostra a figura 33, utilizando para isto uma policorte e uma grande quantidade de fluido refrigerante visando impedir a formação de novas zonas termicamente afetadas.

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica, do Instituto de Física de São Carlos (IFSC), da Universidade de São Paulo – USP, *campus* de São Carlos.

O microscópio eletrônico de varredura que foi utilizado é da marca ZEISS, modelo DSM 960, utilizando-se a técnica dos elétrons espalhados, que permite a visualização com maior facilidade do relevo das estruturas na superfície analisada.

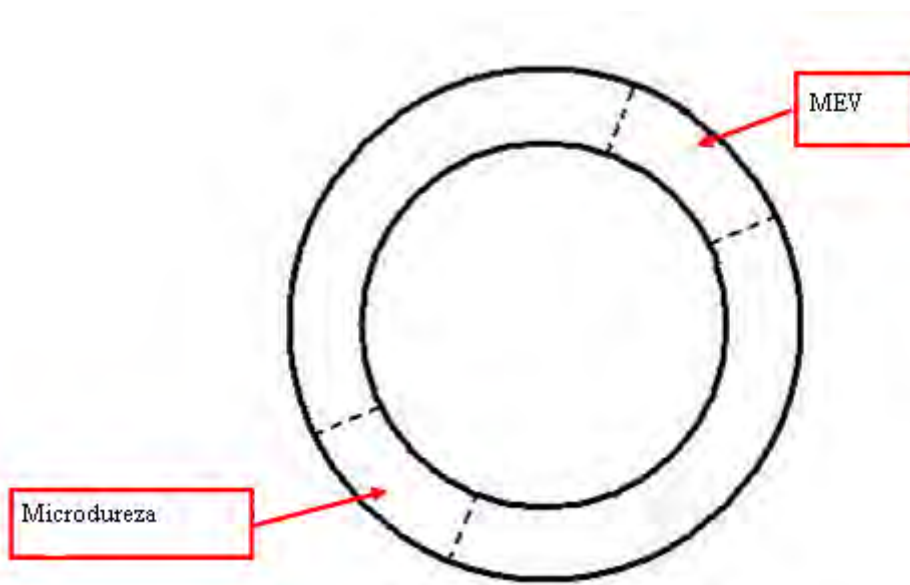


Figura 33- Cortes feitos no corpo de prova para análise.

Após terem sido cortadas as amostras foram embutidas devido à necessidade de que as amostras submetidas à MEV e a microdureza fossem lixadas, polidas e atacadas quimicamente. Normalmente lixa-se as amostras empregando-se lixas d'água com as seguintes granulometrias: 120, 220, 320, 400, 600, 1200 e 1400. Depois de lixadas, as peças embutidas foram polidas numa máquina politriz utilizando-se alumina para polimento metalográfico com elevado grau de pureza (99,99%), com partículas de 1 $\mu$ m, 0,3 $\mu$ m e

0,05 $\mu$ m. Em seguida, executou-se o ataque químico nas amostras com Nital na concentração 1% (1ml de ácido nítrico e 99 ml de álcool etílico), durante 30 segundos. Somente depois as peças foram encaminhadas para a medição das variáveis de saída.

A disposição do corpo de prova na resina para o MEV seguia o esquema conforme figura 34.

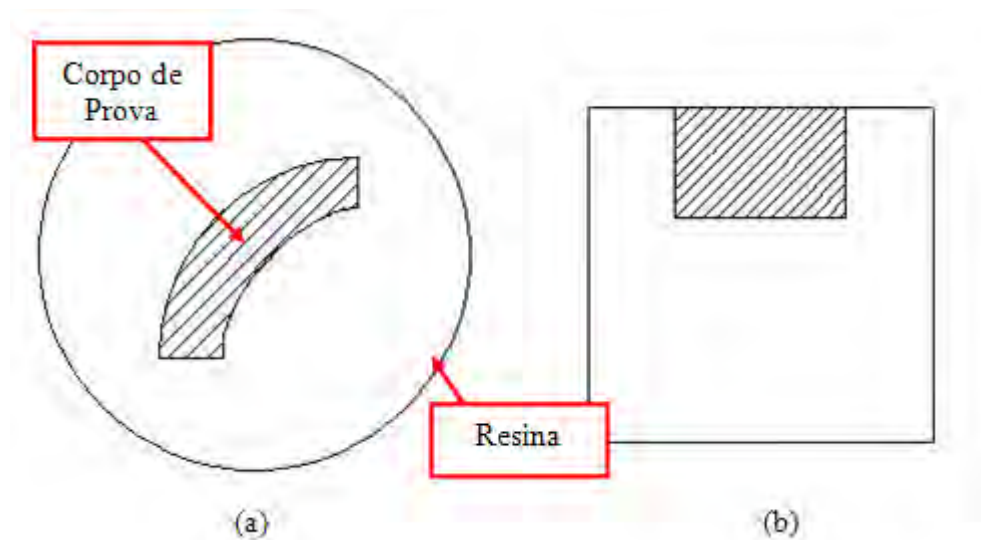


Figura 34- Vista superior (a) e lateral (b) do embutimento destinado a análise de MEV.

Os resultados de microdureza foram realizados no Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) empregando-se um microdurômetro BUEHLER, modelo 1600-6300.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados coletados que se encontram dispostos na forma de gráficos de barras com seus respectivos desvios padrão para facilitar a visualização, e posteriormente será feita uma análise desses parâmetros verificando a influência das variáveis de entrada.

### 6.1. Rugosidade

Os valores de rugosidade de uma peça são influenciados por diversos fatores, entre eles o tamanho do grão abrasivo, as condições de dressagem do rebolo, a taxa de remoção do material, o tempo de spark-out e pelas condições de lubri-refrigeração.

Na figura 35 são apresentados os valores de rugosidade (Ra) expressos em micrometros ( $\mu\text{m}$ ) em função das condições de lubri-refrigeração empregadas.

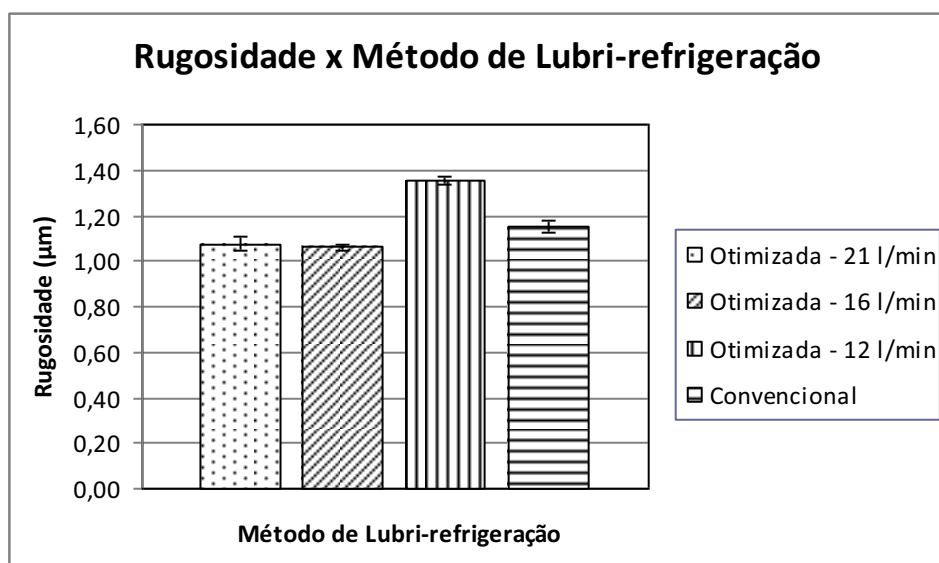


Figura 35- Valores de rugosidade obtidos através de diferentes métodos de lubri-refrigeração.

Pode-se verificar que para as condições de ensaios onde se utilizou as vazões de 21 l/min e 16 l/min; ou seja, 25 m/s e 19 m/s, houve uma maior penetração do fluido de corte na região de contato rebolo/peça pela quebra da barreira aerodinâmica e pela introdução do fluido no contato com maior proximidade da velocidade de corte (30 m/s). Ou seja, a

refrigeração passou a possibilitar a diminuição da rugosidade da peça pela melhor eficiência (quebra da barreira aerodinâmica e introdução do fluido) na sua aplicação. Pressupõe-se que houve a minimização do atrito entre o rebolo e a peça e, conseqüentemente, da geração de calor e da força de corte. Quando foi utilizada a vazão de 12 l/min (14 m/s) a eficiência da refrigeração foi substancialmente reduzida, provocando a elevação da rugosidade da peça já que não houve a quebra da barreira aerodinâmica e considerando que o jato de fluido é restrito; ou seja, fica limitado a área de saída do bocal que é restrita se comparado com a área do bocal convencional. Assim, quando da sua utilização o valor da rugosidade obtida foi a pior de todos os casos estudados.

Pela avaliação do gráfico, pode-se verificar que os valores de rugosidade onde se utilizou as vazões de 21 l/min e 16 l/min; ou seja, 25 m/s e 19 m/s respectivamente, foram bem próximos.

Assim, pode-se verificar que a refrigeração com o bocal modificado com velocidade do fluido mais próxima a velocidade de corte pode ser mais eficiente do que a refrigeração convencional.

## 6.2. Desvios de Circularidade

A medição dos desvios de circularidade dos corpos de prova retificados possibilita obter maiores informações acerca do erro de forma resultante na peça usinada para cada condição de lubri-refrigeração avaliada neste trabalho. Na figura 36 são apresentados os valores dos desvios de circularidade expressos em micrometros ( $\mu\text{m}$ ).

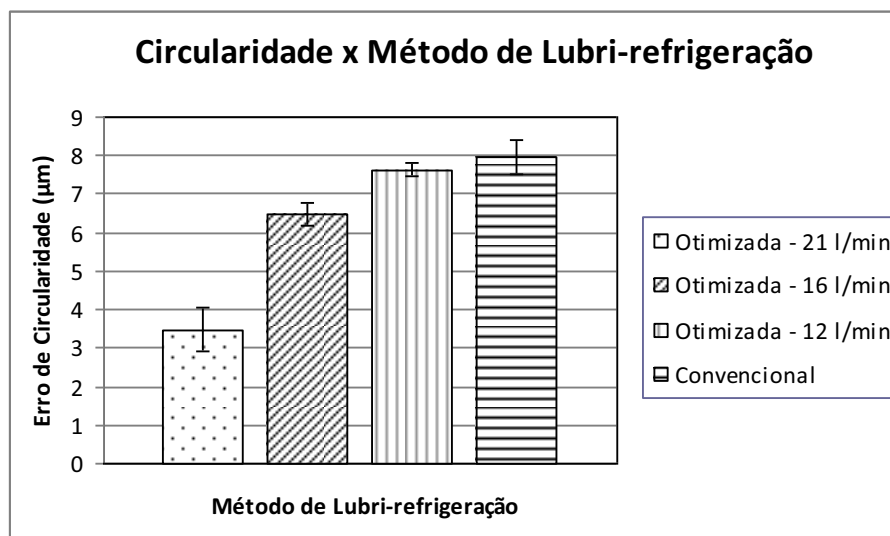


Figura 36- Desvios de circularidade em função do método de lubri-refrigeração empregado.

De forma similar ao que ocorreu com os resultados de rugosidade, pode-se verificar que houve a diminuição do erro de circularidade para os maiores valores de velocidade do fluido. A diminuição do erro de circularidade foi significativamente maior quando foi utilizada a vazão de 21 l/min (25 m/s).

Isto ocorre pelo fato de que com uma refrigeração mais eficiente, há a redução do atrito entre o rebolo e a peça e pressupõe-se que a força de corte é menor fazendo com que a flexão do eixo que suporta o rebolo seja menor do que nos casos onde a refrigeração foi menos eficiente. Neste sentido a vibração provocada pelo processo de retificação no sistema máquina/rebolo/peça é menor; portanto, com a melhora da forma de aplicação do fluido de corte há a redução do erro de circularidade.

Para os ensaios com refrigeração convencional e refrigeração com bocal modificado com 12 l/min (14 m/s), não houve diferenças significativas. Assim, a refrigeração com vazão de 21 l/min (25 m/s) foi a melhor de todas quanto a circularidade.

### **6.3. Desgaste Diametral dos Rebolos**

O desgaste do rebolo se deve a três fatores principais: desgaste do aglomerante, desgaste do grão abrasivo e da friabilidade (capacidade do grão abrasivo em gerar novas arestas de corte, quando submetidos aos esforços de corte) dos grãos. Esta variável apresenta enorme importância no processo de retificação já que maiores desgastes significam menor vida do rebolo.

Na figura 37 são apresentados os valores do desgaste do rebolo em relação ao método utilizado para refrigeração.

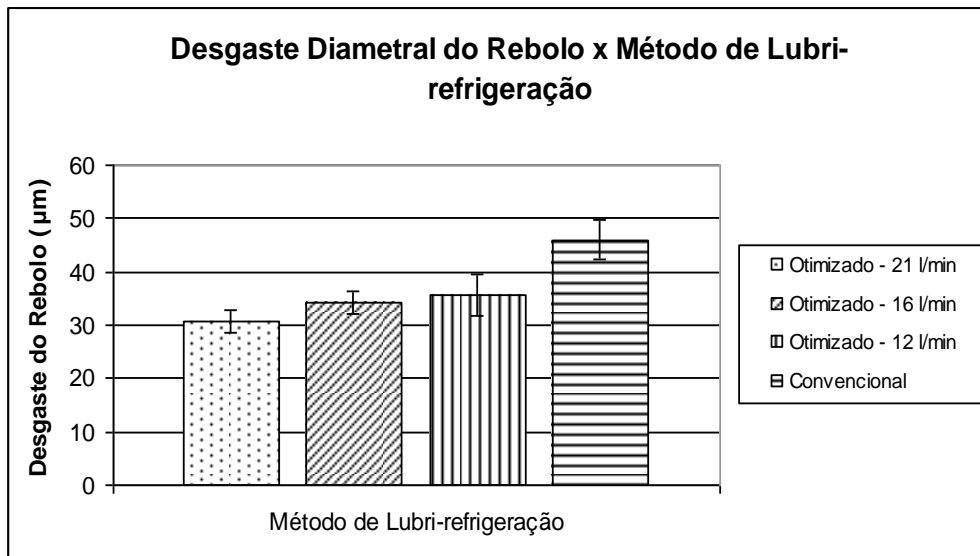


Figura 37- Desgaste do Rebolo em função do método de lubri-refrigeração utilizado.

Considerando que o desgaste do rebolo está diretamente relacionado aos esforços de corte pode-se verificar pela figura 37 que em média o ensaio onde se utilizou a vazão de 21 l/min (25 m/s) foi o melhor resultado obtido. No entanto, não houve diferenças significativas entre os ensaios com refrigeração otimizada, ou seja todos encontraram-se na faixa de 30 a 40 µm de desgaste, entretanto, todos esses resultados foram melhores com relação à refrigeração convencional.

Assim, o desgaste do rebolo foi minimizado com a quebra da barreira aerodinâmica, mesmo sendo esta realizada de forma menos eficiente como a que foi obtida com a vazão de 12 l/min (14m/s).

#### 6.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

A seguir serão demonstrados alguns resultados a respeito do MEV realizado. As micrografias apresentam um aumento de 2000 vezes da superfície retificada. Tem-se uma micrografia para o método convencional e uma micrografia para cada vazão do método com bocal modificado, com o intuito de verificar se houve dano superficial e facilitar a visualização do efeito da retificação na microestrutura em cada condição

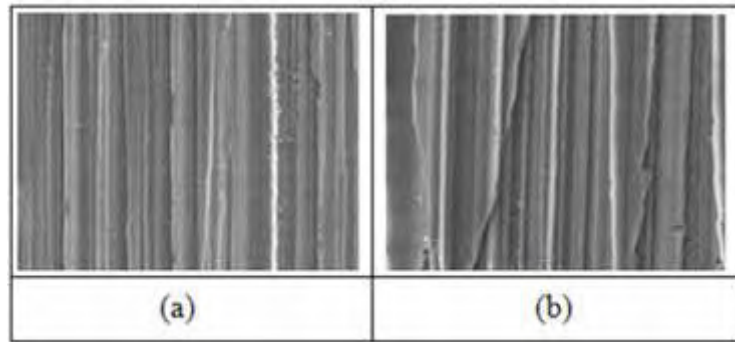


Figura 38- Micrografias com aumento de 2000 vezes para ensaio utilizando-se o método convencional (a), bocal modificado com vazão de 12 l/min (b).

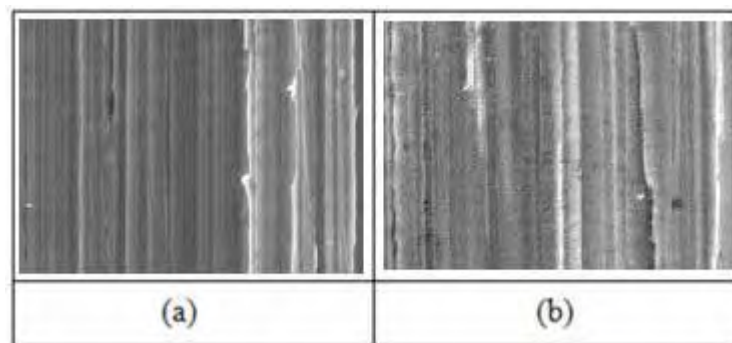


Figura 39- Micrografias para ensaio utilizando-se o método com bocal modificado com vazão de 16 l/min (a), bocal modificado com vazão de 21 l/min (b).

Da figura 38 e 39 conclui-se que independente do método utilizado de lubrificação o resultado obtido em relação à microestrutura foi o mesmo, e pode-se notar que não ocorreram alterações na estrutura, evidenciando assim a ausência de trincas ou qualquer dano à superfície. Deve-se ressaltar que este padrão de resultado se manteve em todos os corpos de prova analisados.

## 6.5. Microdureza

Na figura 40 são apresentados os valores de microdureza Vickers em função das condições de lubrificação empregadas.

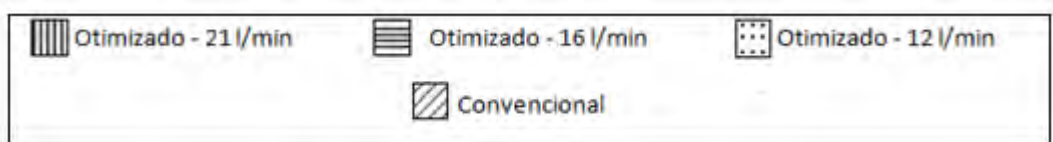
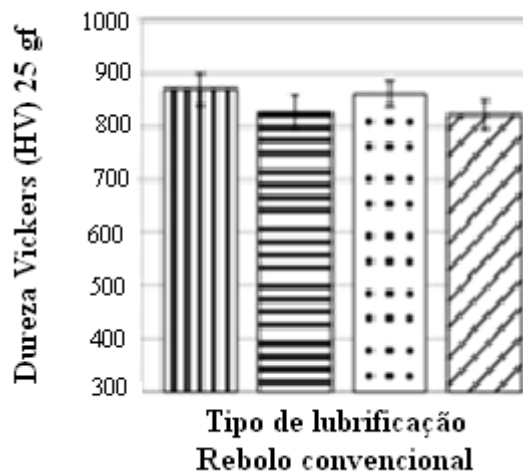


Figura 390- Microdureza Vickers em função do tipo de lubrificação.

De acordo com a figura 40, pode-se perceber que os valores de microdureza Vickers encontrados para ambos métodos de lubrificação estudados estão variando de aproximadamente 730 HV a 920 HV o que corresponde na escala Rockwell a, respectivamente, 61,5 HRc e 67,5 HRc. Considerando que os corpos de prova temperados e revenidos apresentavam dureza média de 60 HRc, pode-se perceber que não houve grande alteração na dureza da superfície usinada, caracterizando assim a não existência de queima superficial ou revenimento da superfície usinada, evidenciado por uma diminuição na dureza da superfície. Deste modo podemos concluir que ambos os métodos de lubrificação empregados foram eficientes com relação a análise da variável em questão, não permitindo que houvesse um aumento excessivo da temperatura na região de corte e evitando a mudança de fase do material.

## 7. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos experimentos realizados com os dois métodos de lubri-refrigeração (convencional e com bocal modificado), pode-se concluir para a retificação cilíndrica interna de mergulho do aço SAE 52100 temperado e revenido com dureza média de 60 HRc que:

- A quebra da barreira aerodinâmica e a melhor eficiência da penetração do fluido de corte na região de contato entre o rebolo e a peça foi maior quando se utilizou a refrigeração otimizada com vazão de 21 l/min (25 m/s); neste caso pressupõe-se que houve uma maior redução do atrito, das forças de corte e da temperatura fazendo com que os resultados de rugosidade, erro de circularidade e desgaste do rebolo fossem sempre os menores obtidos.
- Deve se observar que a velocidade de saída do fluido seja a mais próxima possível da velocidade de corte do rebolo, para que ocorra uma melhor penetração do fluido de corte na região de contato peça/rebolo.
- A lubri-refrigeração com bocal modificado apresenta-se como uma alternativa viável à utilização de fluidos de corte na indústria, já que através dela foi possível obter bons resultados nas variáveis de saída em relação ao método convencional.
- Independente do tipo de lubrificação utilizado, pela análise da microdureza e do MEV das peças retificadas, comprova-se que não houve alterações estruturais significativas, visto que a dureza média se manteve constante e próxima a do material antes de ser retificado, as micrografias não apresentaram nenhuma evidência de alteração da superfície usinada. Portanto os métodos de lubri-refrigeração empregados foram eficientes na remoção do calor, impossibilitando a geração de queimas ou revenimento da superfície da peça usinada.

## **8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- 1) Uso de um cabeçote de maior torque que permita maiores taxas de remoção de material.
- 2) Realização de novos ensaios igualando-se a velocidade do fluido de corte com a velocidade periférica da peça.
- 3) Análise da força de corte e emissão acústica, uma vez que estes são parâmetros importantes na análise dos resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

ALAGUMURTHI, N.; PALANIRADJA, K.; SOUNDARARAJAN, V. Cylindrical grinding- A review on surface integrity. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing** V. 8, n.3, 2007.

ALI, Y. M.; ZHANG, L.C. **Surface roughness prediction of ground components using a fuzzy logic approach.** Journal of Materials Processing Technology 89–90, p. 561–568, 1999.

BALDO, E. D. **Redução do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com auxílio da emissão acústica.** Dissertação de Mestrado - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, p. 86, 1994.

BIANCHI, E. C.; DIAS, A. C. P.; BORTOLOTO, R. G.; JÚNIOR, C. E. S.; SANCHEZ, L. E. A.; JÚNIOR, M. V. **A otimização da agressividade de rebolos pelas condições de usinagem e dressagem.** Revista Máquinas e Metais, maio, p.70-83, 1996.

BOTTA, W. J. F., MOREIRA, A. Jr. “**Uso da microscopia analítica em análise microestrutural**” Universidade Federal de São Carlos - UFSCar - Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais - CCDM – Curso ministrado em 20 e 21 de setembro de 2001.

BRINKSMEIER, E., HEINZEL, C., WITTMANN, M., SCHMID, U., DREYER, M., RATH, H. J. **Como a aplicação do fluido refrigerante pode ser melhorada na retificação.** Revista Máquinas e Metais, Outubro, 2001, p. 34-41.

CAMPBELL, J. D. **Optimized coolant application.** Technical Paper, MR95-211, Society of Manufacturing Engineers . 1995.

CAMPBELL, J. D., **Optimized coolant application.** In: 1st International Machining and Grinding Conference, Technical Paper, MR95-211, Society of Manufacturing Engineers, 12-14 September, Dearborn, Michigan, 1995, p. 895-904.

CATAI, R. E. **Otimização das condições de refrigeração/lubrificação no processo de retificação cilíndrica de mergulho.** 2004. Tese de Doutorado em Engenharia – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.

CHEN, M. C. **Roundness measurements for discontinuous perimeters via machine visions.** Computers in Industry, Vol. 47, p. 185-197, 2002.

CHO, N.; TU, J. **Roundness modeling of machined parts for tolerance analysis.** Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 25, p. 35–47, 2001.

DOLINŠEK, S., ŠUŠTARŠIČ, B., KOPAC, J. **Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes.** Wear, Vol. 250, 2004, p. 349-356.

DUDZINSKI, D., DEVILLEZ A., MOUFKI A., LARROUQUE`RE D., ZERROUKI, V., VIGNEAU, J. **A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, 2004, p. 439–456.

EBBRELL, S.; WOOLLEY, N. H.; TRIDIMAS, Y. D.; ALLANSON, D. R.; ROWE, W. B. **The effects of cutting fluid application methods on the grinding process.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, School of Engineering, Liverpool, Reino Unido, Vol. 40, p. 209-223, junho 1999.

FERREIRA, M. C. **Apostila de preparo de amostras para a realização do teste de microdureza,** UFSC. Florianópolis, 2004.

FUSSE, R. Y. **Estudo comparativo entre a lubri-refrigeração convencional e a mql no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, UNESP, Bauru, SP, Brasil, março 2005.

GOLDSTEIN, J., NEWBURY, D.; ECHLIN, P.; JOY, D. C. **Scanning electron microscopy and microanalysis: a text for biologists, materials scientists and geologists.** Plenum Pub Corp, 2nd edition, USA, 1992, 820 p.  
GRAF, W. **Cylindrical grinding.** Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 2004.

HASSUI, A. **Estudo da vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho.** Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2002.

HASSUI, A.; DINIZ A. E. **Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, p. 855–862, 2003.

HECKER, R. L.; LIANG S. Y. **Predictive modeling of surface roughness in grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, p. 755–761, 2003.

HOWES, T. D., TOENSCHOFF, H. K., HEUER, W. **Environmental aspects of grinding fluids**. CIRP Grinding STC Keynote Paper, August 1991.

IRANI R. A., BAUER R. J., WARKENTIN A. **A review of cutting fluid application in the grinding process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol 45, 2005, p. 1696-1705.

JOHNSON, G. A. **Beneficial compressive residual stress resulting from CBN grinding**. SME Second International Grinding Conference, Philadelphia, Pennsylvania, p. 1-12, 1986.

KING, R. I., HAHN, R. 5. **Handbook of modern grinding technology**. 3a Ed., Cap.6, P.119-167, 1992.

KOPAC J., KRAJNIK P. **High-performance grinding – A review**. Journal of Materials Processing Technology, Vol 175, 2006, p. 278-284.

KWAK, J. S., SIM, S. B.; JEONG, Y. D. **An analysis of grinding power and surface roughness in external cylindrical grinding of hardened SCM440 steel using the response surface method**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, p. 1–9, 2005.

LEE E. S., KIM N. H. **A study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, 2001, p. 937–951.

MALISKA, A. M. **Microscopia eletrônica de varredura**. Site da Universidade Federal de Santa Catarina, Disponível em: <[http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV\\_Apostila.pdf](http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV_Apostila.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2010.

MALKIN, S. **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives**. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

MANNHEIMER, W. A. **Microscopia dos materiais**, Rio de Janeiro, E-papers Serviços Editorais, 2002.

MARINESCU, I. D. **Handbook of machining with grinding wheels**, CRC Press, 2007.

NOVASKI, O., DÖRR, J. **Usinagem sem refrigeração**. Revista Máquinas e Metais, Ano XXXV, nº 398, p. 18-27, março, 1999.

OLIVEIRA, J. F. G. de; BIANCHI, E. C.; SOUZA, G. F. **O desempenho de rebolos pode ser controlado pela dressagem.** Revista Máquinas e Metais, Ano XVII, nº 317, junho, p. 12-28, 1992.

ÖZEL T., ALTAN T., **Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 40, 2000, p. 133-152.

RAMESH, K.; YEO, S. H.; ZHONG, Z. W.; SIM, K. C. **Coolant shoe development for high efficiency grinding.** Journal of Materials Processing Technology, nº 114, p. 240-245, 2001.

ROWE W. B.; MILLS Y. L. B.; ALLANSON D. R. **Application of intelligent CNC in grinding.** Computers in Industry, nº 31, p. 45-60, 1996.

ROWE W. B.; CHEN Y.; MORUZZI J. L.; MILLS B. **A generic intelligent control system for grinding. Computer Integrated Manufacturing Systems.** Vol 10, nº 3, p. 231-241, 1997.

SALMON, S. C. **Modern grinding process technology,** McGraw-Hill, 1992.

SILLIMAN, J. D. **Cutting and grinding fluids – Selection an application,** Society of Manufacturing Division, 1992.

SILVA, E. J. **Análise da influência dos tipos de fluido de corte e rebolo na retificação do aço SAE HVN-3.** Dissertação de Mestrado - UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2000.

SILVA, E. J.; BIANCHI, E. C.; OLIVEIRA, JOÃO FERNANDO GOMES DE.; AGUIAR, P. R. **Grinding fluids evaluation in the grinding of a martensitic valve steel with CBN and alumina abrasives.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture, Inglaterra, v. 8, n. 217, p. 1047-1055, 2003.

TAWAKOLI, T. **Minimum coolant lubrication in grinding.** Industrial Diamond Review, nº 1, p. 60-65, 2003.

TAWAKOLI, T.; RASIFARD, A.; RABIEY, M. **High efficiency internal cylindrical grinding with a new kinematic.** International Journal of Machine Tools and Manufacture 47, p. 729-733, 2007.

WANG, W.; CHEN, H.; HU, Y.; WANG, H. **Effect of surface roughness parameters on mixed lubrication characteristics.** Tribology International, p. 1–6, 2005.

WEBSTER, J. A. **Selection of coolant type and application technique in grinding.** Supergrind, p. 206-220, 1995.

WEBSTER, J. A.; CUI, C.; MINDEK Jr. R. B. **Grinding fluid application system design.** In: Annals of the CIRP, vol. 44, p. 333-338, 1995.

WEBSTER J. A. **Optimizing coolant application systems for high productivity grinding.** Abrasives Magazine, 1999.