



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS
"POSMAT"**

DANILO DE JESUS OLIVEIRA

**APRIMORAMENTO DA TÉCNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE
(MQL) NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE Mergulho
DE AÇOS ENDURECIDOS**

BAURU

2011



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS
"POSMAT"**

DANILO DE JESUS OLIVEIRA

**APRIMORAMENTO DA TÉCNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE
(MQL) NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO
DE AÇOS ENDURECIDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais (POSMAT) da Universidade Estadual Paulista como requisito para a obtenção do título de mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Co-Orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

BAURU

2011

Oliveira, Danilo de Jesus.

Aprimoramento da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos./ Danilo de Jesus Oliveira, 2011. 97 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2011.

1. Retificação. 2. Fluidos de corte. 3. Mínima quantidade de lubrificante (MQL). 4. Produção mais limpa. 5. Rebolo de CBN. 6. Limpeza do rebolo. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências. II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Francisco e Rita, minha esposa Débora e minha filha do coração Anna Clara.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS pelo dom da vida, pela saúde, força, paciência para resolver as adversidades e por todas as bênçãos.

Aos meus pais Francisco e Rita, aos quais devo minha vida, por me ensinarem valores e sempre me incentivarem a buscar novas conquistas.

À minha esposa Débora e a minha filha do coração Anna Clara, pela paciência pelo carinho, apoio e dedicação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi pela amizade, constante apoio e confiança em meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, pelas sugestões e por aceitar co-orientar meu trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP por ter nos concedido recursos para realizar esta pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais da Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista campus Bauru pela oportunidade que me foi concedida. Agradeço também em especial ao coordenador do POSMAT Prof. Dr. Paulo Noronha Lisboa Filho, aos docentes do Campus de Sorocaba Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini, Prof. Dr. Steven Frederick Durrant, Prof. Dr. Nilson Cristino Cruz, Prof. Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto e Prof^a. Dr^a. Elidiane Cipriano Rangel pela colaboração na minha formação e neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, pela grande contribuição e apoios cedidos durante a realização do projeto.

Aos Professores Doutores Amauri Hassui e Eraldo Jannone da Silva pela participação em minha qualificação e as valiosas sugestões para melhoria deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - *campus* de Bauru, por gentilmente ceder os Laboratórios de Usinagem por Abrasão e de Materiais para a elaboração deste trabalho.

À empresa ITW Chemical por fornecer os fluidos de corte usados neste trabalho.

À empresa INA do Schaeffler Group em especial aos Srs. Gilvan Silva, Ricardo Cumino, Wander Silva e Luciano Lacerda por permitirem visitar e utilizar os recursos da empresa e pelos valiosos conselhos na elaboração do trabalho.

Ao amigo Luiz Gustavo Guermandi pela dedicação e empenho para realização deste projeto.

Agradeço aos técnicos: Hamilton José de Mello, do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica e Osmar Luis Martinelli, do Laboratório de Acionamentos e Controle de Máquinas Elétricas, do Departamento de Engenharia Elétrica, todos da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - *campus* de Bauru, por gentilmente colaborarem neste projeto.

A todos os amigos e familiares que contribuíram mesmo que de forma indireta para realização deste trabalho.

"A verdadeira sabedoria consiste em saber como aumentar o bem-estar do mundo."
(Benjamin Franklin)

RESUMO

A aplicação da mínima quantidade de lubrificante (MQL) na usinagem dos metais surgiu como uma alternativa para reduzir a abundância de fluidos de corte e, com isso, atingir produção mais limpa. Na retificação, apesar de ser considerada uma técnica inovadora no aspecto ambiental, sua aplicação é restrita devido à geração excessiva de calor e ao entupimento dos poros do rebolo causado pelos cavacos, prejudicando a qualidade final do produto e aumentando o desgaste da ferramenta. Esta pesquisa buscou aprimorar o uso do MQL usando, além do jato com a mistura ar e óleo injetado na interface rebolo-peça à alta velocidade, um jato de ar comprimido para minimizar o empastamento do rebolo gerado durante o processo de usinagem pela mistura formada pelo óleo do MQL mais os cavacos. Foram realizados ensaios na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340, temperado e revenido com dureza média de 54 HR_C, usando rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN) com ligante vitrificado. Os métodos de lubri-refrigeração propostos foram o convencional com fluido em abundância, MQL (estes dois sem o uso do jato de ar para limpeza do rebolo) e MQL com a limpeza, variando o ângulo de incidência do ar comprimido na superfície de corte do rebolo. Consideraram-se as variáveis de saída do processo: rugosidade, desgaste diametral do rebolo, circularidade, além de análises metalográficas e medições de microdureza da superfície retificada para verificação de danos térmicos; de forma a analisar a viabilidade da substituição do tradicional método de aplicação dos fluidos em abundância pelo MQL com a limpeza. Os resultados mostraram a possibilidade de implementação da técnica da limpeza do rebolo como um aprimoramento tecnológico da mínima quantidade de lubrificante na retificação, reduzindo o consumo dos fluidos de corte. A técnica MQL com limpeza para um ângulo específico de incidência do ar comprimido mostrou-se extremamente eficiente com a obtenção de melhor acabamento superficial e dimensional, além de menor desgaste da ferramenta abrasiva e isenção de danos térmicos, quando comparada com os métodos convencionais sem a limpeza do rebolo.

Palavras chaves: Retificação, fluidos de corte, mínima quantidade de lubrificante (MQL), produção mais limpa, rebolo CBN, limpeza do rebolo.

ABSTRACT

The application of minimum quantity of lubricant (MQL) on machining of metals has emerged as an alternative to reduce the abundance of cutting fluids and then achieve a cleaner production. In grinding, although considered a breakthrough technique in the environmental aspect, its application is restricted due to excessive generation of heat and grinding wheel loading caused by the chips, damaging the final product quality and increasing tool wear. The objective of this research was to improve the MQL technique by using an additional jet of compressed air to clean the clogged pores of the wheel. Tests were performed in cylindrical plunge grinding of the ABNT 4340 steel, quenched and tempered (54 HR_C), with a vitrified cubic boron nitride (CBN) grinding wheel. The suggested methods of lubrication were conventional (abundant fluid), MQL (that without the use of air jet to cleaning the wheel) and MQL plus cleaning system, changing the incident angle of the jet of compressed air in the cutting surface of the grinding wheel. The performance of the proposal technique was evaluated based on an analysis of the process output variables: roughness, diametric wear of the grinding, roundness, and metallographic analysis plus microhardness measurements of the grounded surface to verify thermal damage incidence. The results showed the possibility of implementing the technique of cleaning as a technological enhancement to minimum quantity of lubricant in the grinding, reducing the use of cutting fluids. The technique MQL plus cleaning system, in a specific incident angle of the compressed air was extremely efficient, resulting in better surface finish, reduced tool wear and free of thermal damage when compared with conventional methods without cleaning of the wheel.

Key words: Grinding, cutting fluids, minimum quantity of lubricant (MQL), cleaner production, CBN grinding wheel, grinding wheel cleaning.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	4
AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	16
1. INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVO	19
1.2 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	19
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2. REVISÃO BIBILOGRÁFICA	22
2.1 A RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO	22
2.1.1 Parâmetros do Processo de Retificação	23
2.1.1.1 Comprimento de contato (l_c)	23
2.1.1.2 Profundidade de corte (a)	24
2.1.1.3 Velocidade de Corte (v_s)	24
2.1.1.4 Velocidade da Peça (v_w)	25
2.1.1.5 Velocidade de mergulho (v_f)	25
2.1.1.6 Taxa de remoção de material	25
2.1.1.7 Espessura equivalente de corte (h_{eq})	26
2.1.2 O ciclo de retificação cilíndrica externa de mergulho	27
2.2 MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO NA RETIFICAÇÃO	29
2.3 O REBOLO DE NITRETO DE BORO CÚBICO (CBN)	30
2.4 OS PROBLEMAS DOS FLUIDOS DE CORTE	31
2.5 OTIMIZAÇÃO NA APLICAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE NA RETIFICAÇÃO	33
2.6 A BUSCA POR FORMAS ALTERNATIVAS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	34
2.6.1 Usinagem à seco	35
2.7 A TÉCNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL)	36
	10

2.8	FENÔMENO DO EMPASTAMENTO DAS POROSIDADES DO REBOLO	39
2.9	SISTEMAS QUE PROMOVEM A LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DE REBOLOS ENTUPIDOS POR CAVACOS	41
2.9.1	Limpeza a laser	41
2.9.2	Limpeza por um sistema secundário de fluido de corte	42
2.9.2.1	Alguns problemas referentes ao uso de fluidos de corte na limpeza e os mecanismo de incidência na superfície de corte do rebolo	43
2.9.3	A perspectiva de aplicação de ar comprimido como um sistema alternativo para a limpeza do rebolo	45
2.10	DANOS TÉRMICOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	46
2.10.1	Queima Visível (Oxidação)	47
2.10.2	Perda de Dureza	47
2.10.3	Retêmpera – Queima Branca	48
2.11	AS VARIÁVEIS DE SAÍDA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	48
2.11.1	Erro de Circularidade	49
2.11.2	Rugosidade	49
2.11.3	Desgaste diametral do rebolo	50
2.11.4	Microdureza	51
2.11.5	Análises metalográficas	52
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS	53
3.1.1	Retificadora cilíndrica externa	53
3.1.2	Corpo de prova	54
3.1.3	Rebolo Utilizado	54
3.1.4	O sistema de refrigeração convencional	54
3.1.5	O sistema MQL	55
3.1.6	O sistema de limpeza	57
3.2	CLASSIFICAÇÃO E PARÂMETROS DOS ENSAIOS	59
3.3	SEQÜÊNCIA DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	62
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA	64
3.4.1	Medição da Rugosidade	64

3.4.2	Medição da Circularidade	64
3.4.3	Medição do Desgaste diametral do rebolo	65
3.4.4	Preparação das amostras para análise de microdureza e metalografia	67
3.4.5	Ensaio de microdureza e metalografia	68
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	RUGOSIDADE	70
4.2	CIRCULARIDADE	73
4.3	DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO	75
4.4	ANÁLISE DA INTEGRIDADE DAS SUPERFÍCIES RETIFICADAS	77
4.4.1	ANÁLISES METALOGRAFICAS	78
4.4.2	MICRODUREZA	81
5.	CONCLUSÕES	85
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1- Retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN, 1989, modificado).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2 - Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (adaptado de SOARES & OLIVEIRA, 2002).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3 - Formação do cavaco por um grão abrasivo (KLOCKE, 2009).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4 – Bocal construído por Webster et al. (1995).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 5 - Bocal de sapata (IRANI et al. 2005 (modificado)).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 6 - Fenômeno do empastamento do rebolo.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 7 – Rebolo empastado, com cavacos aderidos (aumento de 100X).....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 8 - Limpeza a laser da superfície de corte do rebolo (JACKSON et al. 2007).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 9 - Influência da limpeza do rebolo no patamar de energia específica (CAMERON et al. (2010)).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 10 - Mecanismo da incidência do jato de fluido para limpeza da superfície de corte do rebolo (SINOT et al. 2006).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 11 – Efeito do jato de ar comprimido (a) Retificação sem limpeza do rebolo; (b) Retificação com limpeza do rebolo (LEE et al. 2002, adaptado).....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12 - Efeito do jato de ar comprimido na limpeza do rebolo.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 13 - Queima visível de retificação (TAWAKOLI et al. 2007).....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 14 - Queimas de retificação (aço ABNT 52100 apresentando queimas após a retificação com abrasivo convencional (1000x)).....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 15 - Sistema de ar comprimido e medição de vazão para o MQL.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 16 – Projeto do bocal para experimentação com MQL.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 17 – Bocal de limpeza.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 18 – Sistema de fixação e posicionamento do bocal de limpeza.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 19 – Fixação do bocal de limpeza.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 20 – Detalhe dos ângulos de incidência do jato de ar comprimido.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 21 - Matriz de ensaios.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 22 - Operação de dressagem do rebolo.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 23 - Ensaio em operação.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 24 - Detalhe do apalpador.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 25 - Processo de marcação do rebolo.....</i>	<i>66</i>

<i>Figura 26 – Medição do desgaste diametral do rebolo.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 27 - Esquema da medição do desgaste do rebolo.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 28 – Amostras para microdureza e metalografia.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 29 – Esquema de medição das microdurezas (espaçamentos recomendados segundo ASTM E384).....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 30 – Resultados de rugosidade.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 31 – Resultados de circularidade.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 32 – Resultados de desgaste diametral do rebolo.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 33 – Metalografia da peça temperada antes da retificação.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 34 - Metalografias das peças retificadas com $v_f = 0,25$ mm/min: (a) convencional; (b) MQL e (c) MQL+ 30°.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 35 - Metalografias das peças retificadas com $v_f = 0,50$ mm/min: (a) convencional; (b) MQL e (c) MQL+ 30°.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 36 - Metalografias das peças retificadas com $v_f = 0,75$ mm/min: (a) convencional; (b) MQL e (c) MQL+ 30°.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 37 – Resultados de microdureza para a não retificada.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 38 – Resultados de microdureza para a lubri-refrigeração convencional.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 39 – Resultados de microdureza para a lubri-refrigeração MQL.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 40 – Resultados de microdureza para a lubri-refrigeração MQL + 30°.....</i>	<i>83</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Composição química do aço ABNT 4340 (CALLISTER, 2010).....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 2 – Parâmetros de retificação.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 3 – Quadro ANOVA sobre os resultados de Rugosidade.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 4 – Quadro ANOVA sobre os resultados de Circularidade.....</i>	<i>74</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a - profundidade de retificação	[mm]
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas	
a_d - profundidade de dressagem	[μm]
ASTM - American Society for Testing and Materials	
b - largura de retificação	[mm]
CBN – nitreto cúbico de boro	
CNC - comando numérico computadorizado	
d_e – diâmetro equivalente	[mm]
d_s – diâmetro do rebolo	[mm]
d_w – diâmetro da peça	[mm]
F_{cl} – Força que o jato de limpeza atinge a superfície de corte do rebolo	[N]
G – relação G	[-]
h_{eq} – espessura equivalente de corte	[mm]
h_{max} - espessura teórica máxima do cavaco	[mm]
HK – Dureza Knoop	
HR _C - Dureza Rockwell C	
ISO – International Organization for Standardization	
l_c – comprimento de contato	[mm]
L - espaçamento médio entre grãos abrasivos	[mm]
L_z - Superfície do rebolo que é atingida pelo jato	[mm ²]
MQL – Mínima Quantidade de Lubrificante	
n_s - velocidade ou rotação crítica do rebolo	[rpm]
n_w - rotação da peça	[rpm]
P'_{cl} - critério de eficiência da limpeza	[-]
Q_w - taxa de remoção volumétrica	[mm ³ /s]
Q'_w - taxa específica de remoção volumétrica	[mm ² /s]
R_a - rugosidade média	[μm]
RPM - rotações por minuto	[rpm]
t_s – tempo de centelhamento (spark-out)	[s]
v_f - velocidade de avanço ou mergulho	[m/min]

v_s - velocidade tangencial (ou periférica) do rebolo	[m/s]
v_w - velocidade tangencial (ou periférica) da peça	[m/s]
V_s - volume de rebolo gasto	[mm ³]
V_w - volume de material removido	[mm ³]
δ - ângulo de deflexão do jato de limpeza	[°]

1. INTRODUÇÃO

Os fluidos de corte desempenham um importante papel nos processos de usinagem dos materiais, seu uso implica, em muitas situações, em uma maior vida da ferramenta associada a uma maior qualidade da peça (DINIZ *et al.* 2008).

Entretanto, a aplicação destas substâncias traz alguns inconvenientes como: alto custo, considerando a aquisição, manuseio, manutenção e descarte, malefícios à saúde dos operadores (doenças de pele e pulmão) e poluição do meio ambiente. Em virtude destes inconvenientes, diversas pesquisas visam desenvolver formas de reduzir o consumo dos fluidos de corte (GONÇALVES, 2008).

Segundo Tawakoli *et al* (2007), o uso de uma quantidade cada vez menor de fluido na região de corte tem representado grande importância no cotidiano, desde que não ocorra o comprometimento da usinagem. Porém, a redução nas quantidades de fluidos de corte proposta em diversas técnicas deve estar tecnológica e economicamente coerentes, reduzindo os impactos ambientais, mas mantendo os parâmetros finais do processo.

Dentre as técnicas que promovem a redução do consumo de fluido de corte estão a usinagem à seco e a mínima quantidade de lubrificante (MQL). Contudo, a aplicação destas técnicas apresenta resultados diferentes considerando os vários processos de usinagem, isto em virtude dos diferentes comprimentos de contato na região de corte, das ferramentas empregadas e de outros fatores inerentes aos processos. Nesse aspecto, os processos de usinagem por abrasão necessitam de maior lubrificação, inviabilizando a usinagem à seco em algumas situações (WEINERT *et al.* 2004).

A retificação é um processo de usinagem por abrasão, no qual a remoção do material é realizada pela interação entre o abrasivo e a peça (REN *et al.* 2009). Segundo Diniz *et al.* (2008) é aplicada na fabricação de componentes de maior qualidade em termos de forma e acabamento superficial (tolerâncias dimensionais e geométricas), considerando-se em geral um processo típico de acabamento.

Silva *et al.* (2007) e Tawakoli *et al.* (2010) estudaram a aplicação da técnica MQL na retificação cilíndrica usando rebolos de alumina na retificação dos aços ABNT 4340 e DIN 100Cr6, e os resultados mostraram um desempenho próximo ou superior ao da lubri-refrigeração convencional (fluido de corte em abundância).

Contudo, Sadeghi *et al.* (2009) mostram que uma redução no uso de fluidos de corte gera dificuldade em manter os poros do rebolo limpos, favorecendo a tendência de entupimento, o que gera o decréscimo da potencialidade de corte dos rebolos.

De maneira semelhante, Alves (2007) realizou um estudo sobre a influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN, e foi constatado um desempenho inferior da técnica MQL considerando a rugosidade, circularidade e desgaste do rebolo.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo promover um aprimoramento da técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) adicionando-se ao MQL um sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo. A eficácia do sistema será testada na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 com dureza de 54 HR_C, temperado e revenido, usando um rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN), comparando os parâmetros de saída aos obtidos com a lubri-refrigeração apenas com o MQL e com o método convencional (fluido em abundância).

A avaliação do desempenho do novo método proposto, será realizada com base na comparação e análise de dados de rugosidade, desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, além de metalografias e análise da microdureza superficial para avaliação de danos térmicos às superfícies retificadas.

Espera-se que o método proposto apresente resultados superiores ao método MQL, contribuindo assim para uma ampliação do uso desta técnica.

1.2 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Os problemas apresentados como o uso e o elevado custo dos fluidos de corte levam as empresas e instituições de pesquisa buscar formas de reduzir estes inconvenientes (FRATILA & CAIZAR 2011). Neste aspecto, a técnica MQL é um excelente meio para

minimizar esses problemas propiciando benefícios econômicos e ambientais (MIN *et al.* 2005).

Contudo, esta técnica deve ser aprimorada tecnologicamente para se produzir peças com a mesma qualidade obtida com o uso dos fluidos de corte em abundância nos processos de retificação, devido ao fenômeno do empastamento do rebolo relatado por Sadeghi *et al.* (2009).

Assim, analisando algumas pesquisas realizadas nos últimos anos no laboratório de usinagem por abrasão da UNESP (ALVES, 2007; FUJITA, 2007; SILVA *et al.* 2007), o desempenho da técnica MQL mostrou-se inferior ao método de lubri-refrigeração convencional, provavelmente pelo fenômeno do empastamento do rebolo.

Cameron *et al.* (2010), estudaram na lubri-refrigeração convencional a aplicação da limpeza de rebolo com jato secundário de fluido de corte, e verificaram que a redução do empastamento do rebolo promoveu a redução da energia no processo de retificação.

Baseando-se nos bons resultados alcançados por estes autores, foi proposta a aplicação de um jato de ar comprimido para a limpeza do rebolo em condições de lubri-refrigeração MQL a fim de reduzir o empastamento do rebolo e verificar a qualidade e integridade da superfície retificada nestas condições.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho, para melhor estruturação, encontra-se dividido em capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre os problemas com o uso dos fluidos de corte, a técnica MQL e sua aplicação na retificação. Segue ainda neste capítulo o objetivo desta pesquisa e a motivação para sua realização.

O capítulo dois apresenta uma revisão bibliográfica que compreende os principais assuntos discutidos neste projeto, como a retificação cilíndrica externa de mergulho, rebolos superabrasivos de CBN, o uso dos fluidos de corte, a técnica de mínima quantidade de lubrificante, além de alguns parâmetros e variáveis de saída do processo de retificação.

Já no capítulo três descreve a metodologia empregada neste trabalho bem como os materiais e equipamentos utilizados.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos juntamente com as discussões.

O capítulo cinco lista as considerações sobre a pesquisa e o capítulo seis algumas sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, seguem referências bibliográficas utilizadas como base para a execução desta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica elaborada aborda os principais conceitos relativos ao tema que será desenvolvido: a retificação cilíndrica externa de mergulho, os parâmetros e variáveis de saída, o rebolo de CBN, aplicação dos fluidos de corte, limpeza da superfície de corte dos rebolos, entre outros assuntos pertinentes ao tema.

2.1 A RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO

Destaca-se entre as variações da operação de retificação a cilíndrica externa de mergulho, pois é um processo rápido e econômico. Na retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo executa movimento de avanço numa direção perpendicular a superfície retificada. O rebolo normalmente é mais largo que o comprimento da peça, há possibilidade de se fazer a retificação de várias superfícies simultaneamente através da montagem de diversos rebolos ou a retificação de perfis, através da afiação do rebolo no perfil adequado (DINIZ *et al.* 2008).

A retificação cilíndrica externa de mergulho é representada na figura 1.

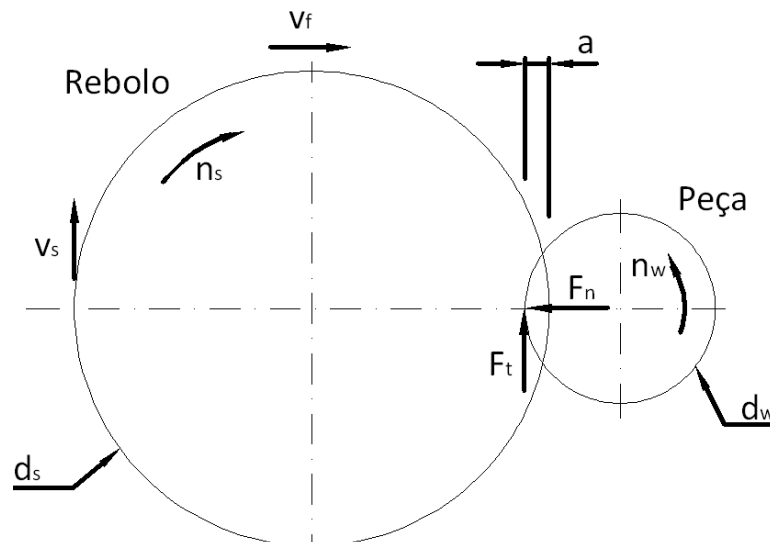


Figura 1- Retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN, 1989, (modificado)).

Onde: v_s - velocidade periférica; v_f - velocidade de avanço; d_s - diâmetro do rebolo; d_w - diâmetro da peça; n_s - rotação do rebolo; n_w - rotação da peça; a - profundidade de corte; F_t - força tangencial; F_n - força normal.

2.1.1 Parâmetros do processo de retificação

Os parâmetros de retificação foram criados com a finalidade de facilitar a compreensão de alguns fenômenos do processo. A seguir serão descritos os parâmetros do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.

2.1.1.1 Comprimento de contato (l_c)

Define a extensão de contato entre a peça e o rebolo. Pode ser calculado considerando apenas a geometria dos elementos em contato. Marinescu *et al.* (2007) equacionam o comprimento de contato conforme a equação (1):

$$l_c = \sqrt{a \cdot d_e} \quad (1)$$

Onde: l_c = comprimento de contato (mm); a = profundidade de corte (mm) e d_e = diâmetro equivalente (mm)

Segundo Malkin (1989), a equação (1) não considera os movimentos e deformações envolvidas e por isso ela descreve uma área aparente de contato entre a peça e o rebolo e, com isso, esse parâmetro pode ser descrito como *comprimento de contato estático*.

King & Hahn (1992) afirmam que a diferença de curvatura entre a peça e o rebolo influencia no comprimento de contato. Além do mais, a diferença de curvatura entre a retificação cilíndrica externa e interna pode ser relacionada, segundo Guo & Malkin (2000), com a retificação plana através do diâmetro equivalente (d_e), conforme a equação (2):

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \frac{d_s}{d_w}} \quad (2)$$

Onde: d_s = diâmetro do rebolo (mm) e d_w = diâmetro da peça (mm).

Malkin (1989) ainda relata que para a equação (2) adota-se o sinal negativo quando se trata da retificação cilíndrica interna e o sinal positivo referindo-se à externa. Para a plana, o diâmetro da peça (d_w) deve ser considerado infinito e, então, $d_e = d_s$. Ainda, segundo esse autor, a curvatura oposta do rebolo e da peça diminui l_c na retificação cilíndrica externa e, na interna, aumenta. Considerando a equação acima, a retificação

cilíndrica externa de mergulho apresenta o menor comprimento de contato comparado às outras variações de processo.

Anderson *et al.* (2008) afirmam que a remoção de cavaco e a subsequente geração de calor ocorrem ao longo do comprimento de contato.

2.1.1.2 Profundidade de corte (a)

Segundo Malkin (1989), “a” é a profundidade que o rebolo entra na peça com uma velocidade v_f durante uma revolução completa da mesma. A profundidade de corte é definida pela equação (3).

$$a = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \quad (3)$$

Onde: v_f = velocidade de avanço (mm/min) e v_w = velocidade da peça (mm/min).

Marinescu *et al.* (2004) relatam que a peça, o rebolo e a estrutura da máquina deformam quando se estabelece o contato entre o rebolo e a peça. Dessa forma, o real valor do parâmetro “a” é menor do que o calculado baseado na velocidade de avanço v_f . Isso ocorre devido às deflexões mecânicas e térmicas e o desgaste do rebolo. Entretanto, depois de certo tempo de avanço, as deflexões se estabilizam e se tornam constantes.

A profundidade de corte está amplamente relacionada com o parâmetro espessura equivalente de corte (h_{eq}) que será definido adiante, onde, aumentando “a” ocorre aumento dessa espessura e, com isso, maiores são os esforços de corte, o desgaste do rebolo e rugosidade (DINIZ *et al.* 2008).

2.1.1.3 Velocidade de Corte (v_s)

Hwang *et al.* (2000) relatam que um aumento na velocidade do rebolo diminui a severidade do processo de corte pelo aumento da dureza dinâmica do rebolo. Ademais Jackson *et al.* (2001) afirmam que um aumento na velocidade do rebolo, melhora a qualidade final da peça, diminuindo o desgaste da ferramenta abrasiva.

Assim, em altas velocidades, costuma-se usar rebolos de ligante metálico ou eletro-depositado.

Graf (2004) define essa velocidade como a equação (4).

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

Onde: v_s = velocidade de corte (m/s); n_s = rotação do rebolo (RPM).

2.1.1.4 Velocidade da Peça (v_w)

Essa velocidade representa a velocidade periférica da peça. De acordo com Graf (2004), a velocidade da peça v_w pode ser determinada em função do diâmetro e rotação da mesma, conforme equação (5). Ainda segundo esse autor, pode-se afirmar que o aumento da velocidade da peça acarreta uma elevação da taxa de remoção de material, gerando cavacos mais grossos e maior carga sobre cada grão abrasivo do rebolo.

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (5)$$

Onde: n_w = rotação da peça (RPM).

2.1.1.5 Velocidade de mergulho (v_f)

A velocidade de mergulho v_f também definida como a velocidade de avanço do rebolo, corresponde a velocidade do movimento normal ou tangencial à superfície retificada; esta afeta o acabamento pretendido e também a força tangencial de corte, que se eleva com o aumento da mesma (MARINESCU *et al.* 2004).

Segundo Baldo (1994), 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 2,0mm/min. Já para o acabamento, a velocidade de mergulho deve estar entre 0,1 a 0,3mm/min.

2.1.1.6 Taxa de remoção de material

De acordo com Malkin (1989), durante a retificação a taxa de remoção de material (Q_w) é um parâmetro determinado pela profundidade de corte (a), pela velocidade relativa

entre a peça e o rebolo (v_w) e pela largura de retificação (b). Dessa forma, Demirci *et al.* (2007) utilizam em seu trabalho a seguinte relação, segundo a equação (6), onde v_f é a velocidade de avanço e d_w é o diâmetro da peça:

$$Q_w = a \cdot v_w \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b \quad (6)$$

Onde: Q_w = taxa de remoção de material (mm^3/min); e b = largura de retificação (mm).

Ainda segundo Malkin (1989), pode-se obter a taxa específica de remoção de material (Q'_w), dividindo a taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de retificação (b) e, com base nesta taxa específica, pode-se avaliar a produtividade de um processo de retificação:

$$Q'_w = a \cdot v_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (7)$$

Onde: Q'_w = taxa de remoção de material ($\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{min}$).

2.1.1.7 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

Segundo Shaw (1996), a espessura da camada de material removida pelo rebolo com a velocidade periférica do mesmo denomina-se espessura equivalente de corte h_{eq} , e é um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho. Heinzl & Bleil (2007) definem esse parâmetro na retificação cilíndrica como a razão entre a taxa de remoção específica do material Q'_w e a velocidade de corte v_s , conforme a equação (8):

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{v_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{60 \cdot 1000 \cdot v_s} \quad (8)$$

Onde: h_{eq} = espessura equivalente de corte (mm).

Tal parâmetro melhor caracteriza o processo de retificação, uma vez que está englobando três importantes características do processo (v_s , v_f , d_w). A velocidade de corte, responsável pela “dureza dinâmica” do rebolo, cuja elevação proporciona o aumento do número de grãos ativos num mesmo intervalo de tempo, provoca o decréscimo na força de corte (MALKIN, 1989).

Ainda de acordo com Malkin (1989), além da força de corte, a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada ao comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas tais como: rugosidade, topografia do rebolo, etc.

Segundo Marinescu *et al.* (2004), esse parâmetro não leva em conta o espaçamento dos grãos do rebolo e para que também sejam consideradas as características do rebolo é possível calcular a espessura teórica máxima do cavaco h_{max} que é apresentada na equação (9):

$$h_{max} = 2L \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a}{d_s}} \quad (9)$$

Onde: h_{max} = espessura teórica máxima do cavaco (mm); L = espaçamento médio entre grãos abrasivos (mm).

2.1.2 O ciclo de retificação cilíndrica externa de mergulho

Pode-se definir como ciclo de retificação o conjunto de etapas necessárias à realização da operação, compreendendo desde a aproximação do rebolo até sua saída da peça. Para cada uma destas etapas é associado um tempo, e a somatória de todos os tempos resulta no tempo total da retificação. (HASSUI *et al.* 1998)

Segundo Diniz *et al.* (2008), quando o rebolo toca a peça e começa seu avanço radial, o conjunto peça/rebolo se deforma elasticamente, ocasionando um avanço efetivo diferente do real. Assim, a posição real do rebolo está atrasada em relação à teórica. Depois de algumas rotações, o avanço real se iguala ao avanço estabelecido, porém, a diferença entre a profundidade de corte real e a teórica continua.

Então, com o intuito de garantir a dimensão desejada da peça, é necessário que, ao fim da usinagem, o rebolo pare seu movimento de avanço radial por alguns instantes até que o eixo porta-rebolo e a peça se recuperem da deformação; este período recebe o nome de tempo de centelhamento ou tempo de spark-out.

Soares & Oliveira (2002) demonstram, na figura 2, o ciclo de retificação e as respectivas etapas.

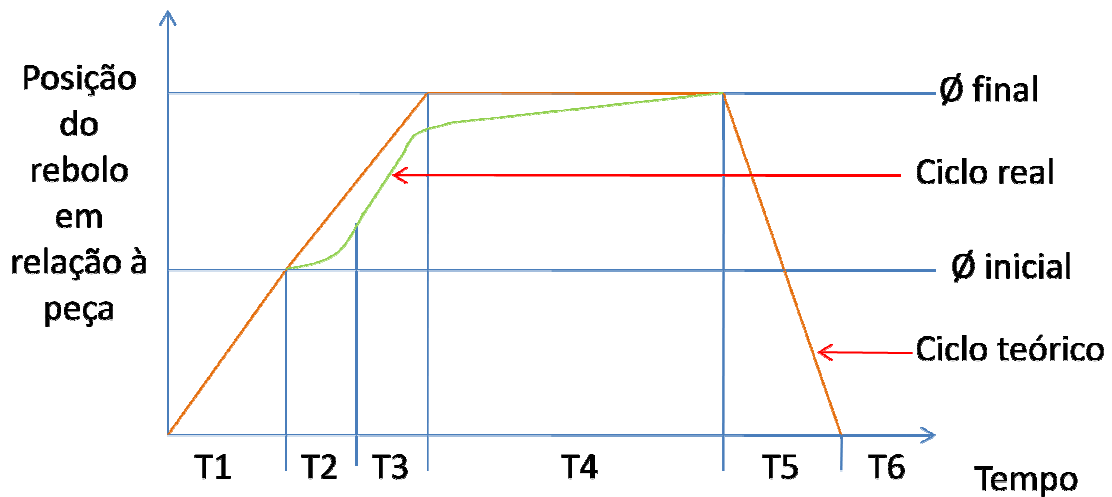


Figura 2 - Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (adaptado de SOARES & OLIVEIRA, 2002).

Uma descrição dos intervalos de tempo indicados na figura 2 é feita a seguir:

- T1: deslocamento do rebolo em direção à peça, sem remoção de material;
- T2: início do 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 da máquina. Também nesta fase inicia-se a formação do cavaco.
- T3: atinge-se a profundidade de corte estabelecida para um ciclo;
- T4: período de centelhamento, onde não há avanço do rebolo, permitindo, desta forma, eliminar as deformações adquiridas durante o período T2. O tempo de centelhamento é de fundamental importância dentro de um ciclo de retificação, pois é neste momento que se atingem as tolerâncias dimensionais e geométricas com reduzidos valores de rugosidade superficial, característicos do processo de retificação;
- T5: afastamento do rebolo, permitindo a retirada da peça usinada e a colocação de outra peça a ser trabalhada;
- T6: realização de uma possível operação de dressagem, a qual é composta pelo movimento do rebolo até o dressador, pela dressagem propriamente dita e pelo retorno do rebolo até a posição de trabalho.

2.2 MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO NA RETIFICAÇÃO

Com base no trabalho de Nguyen & Butler (2005), dependendo das condições de retificação, somente um pequeno número de grãos abrasivos do rebolo entram em contato com a superfície da peça. Dentre os grãos ativos, somente uma pequena parte corta e produz cavaco. Na retificação de materiais, três fases distintas de interação do grão com a peça são percebidas: região elástica, plástica e de corte. Quando a profundidade de corte é muito pequena o grão desliza na superfície, causando deformações elásticas sem remoção de material (fase elástica). A fase plástica ocorre quando a deformação torna-se permanente na direção do escorregamento, com o material sendo escoado e “quebrado”. Os modos de remoção dependem das propriedades mecânicas do material, lubrificação, entre outros.

Na retificação, o corte não é a única situação que produz forças no grão. Em adição, há uma força de escorregamento do grão quando este e a peça se deformam elasticamente. Então, quando a tensão entre o grão e a peça aumenta, ocorre a deformação plástica e, assim, o escoamento do material. Se o material deformado na frente da aresta de corte entra em contato com esta, então há a formação do cavaco. Esses três estágios aumentam a força e energia no processo (ALFARES & ELSHARKAWY, 2009).

Um entendimento dos mecanismos de remoção de material e da natureza dos problemas associados são pré-requisitos que podem ajudar no desenvolvimento do processo de retificação (NGUYEN & BUTLER, 2005). Conforme a figura 3, Klocke (2009) descreve as três fases do mecanismo de remoção do material durante a retificação:

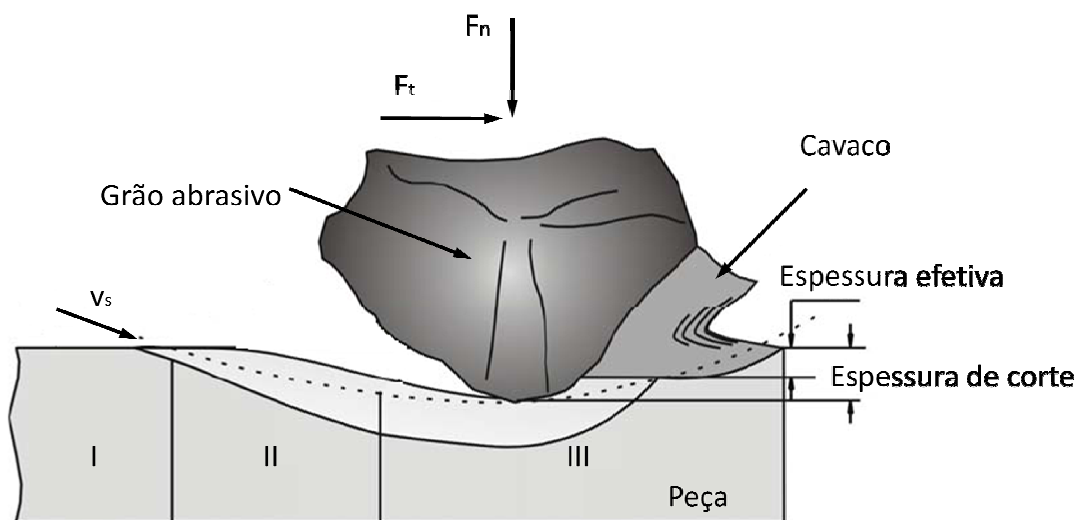


Figura 3 - Formação do cavaco por um grão abrasivo (KLOCKE, 2009).

- ✓ *Região I* – ocorre apenas deformação elástica e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- ✓ *Região II* – ocorrem deformações: elástica e plástica e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- ✓ *Região III* – ocorrem deformações: elástica e plástica, o atrito entre grão abrasivo e peça e o sulcamento associado à formação de cavacos, nesta região é atingida a espessura de corte, contudo devido às deformações elásticas a espessura efetiva é ligeiramente menor.

2.3 O REBOLO DE NITRETO DE BORO CÚBICO (CBN)

O superabrasivo, Nitreto de Boro Cúbico, foi introduzido em 1969 pela empresa General Electric com o nome borazon (SALMON, 1992).

Segundo Guo *et al.* (2007), os rebolos de CBN estão se tornando amplamente usados no lugar dos convencionais em diversos seguimentos industriais. Uma vez que o grão superabrasivo de CBN é conhecido pela sua alta resistência ao desgaste, a retificação com o mesmo ocasiona menores temperaturas, resultando em menor tendência a danos térmicos e redução das indesejáveis tensões residuais. Devido também a grande condutividade térmica dos grãos de CBN é menor a quantidade de calor transmitida à peça, na faixa de 20%, ao passo que esse percentual sobe para 60 - 70% com o uso de óxido de alumínio.

Sua alta condutibilidade térmica da ordem de 1300 W/m.K permite uma maior dissipação do calor gerado na região de corte implicando em menor incidência de danos térmicos (MARINESCU *et al.* 2007).

O Nitreto de Boro Cúbico (CBN) é um material sintético obtido através da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal, mediante elevadas pressões e temperaturas. Com altíssima dureza (K100 = 4700 Knoop), independente da orientação dos cristais, apresenta vantagens na aplicação quando comparado ao diamante, devido à possibilidade de usinagem de metais ferrosos. Isso porque, apesar da extrema dureza do diamante (K100 = 7000 Knoop), o seu emprego na usinagem de aços, é dificultado pela tendência do carbono existente na estrutura cristalina do diamante se difundir no ferro, sob condições de pressão e temperatura usuais de usinagem (BERTALAN, 1997).

Um fator limitante para o emprego de rebolos superabrasivos é o seu elevado custo. No entanto quando se faz uma análise global dos custos, observa-se que se utilizando rebolos de CBN tem-se uma redução do tempo de retificação, além de um menor número de trocas de ferramentas e paradas para ajuste visando compensar o desgaste do rebole. Todos esses fatores são responsáveis por uma redução de 40% dos custos totais do processo de retificação (FUSSE *et al.* 2004).

2.4 OS PROBLEMAS DOS FLUIDOS DE CORTE

Os fluidos de corte são aplicados na usinagem dos materiais com o propósito de reduzir, através da lubrificação, as características dos processos tribológicos que estão sempre presentes na superfície de contato entre a peça e a ferramenta e também reduzir o calor na região de corte através da refrigeração (PAWLAK *et al.* 2004).

Stanford *et al.* (2007) e Tawakoli *et al.* (2007) afirmam que os fluidos de corte também dificultam a corrosão da peça e da máquina ferramenta, transportam os cavacos gerados e promovem a limpeza do rebole.

Devido à natureza do processo de retificação grandes quantidades de fluido de corte são aplicadas com o objetivo de reduzir as altas temperaturas oriundas do processo. Quando se aplica fluido de corte no processo de retificação, o tipo de refrigerante, sua composição, a posição do bocal e seu design e vazão são parâmetros que influenciam na produtividade, qualidade da peça e desgaste do rebole (BRINKSMEIER *et al.* 1999).

Segundo Irani *et al.* (2005), uma vez usado, o fluido de corte contém pequenas partículas de materiais, como pedaços do rebole, cavacos e outras impurezas. Em função disso, depois de certo tempo, por causa da contaminação, todo fluido deve ser trocado e descartado. Entretanto, esse descarte feito de forma indevida é prejudicial ao meio ambiente.

O principal problema decorrente do processo da usinagem, em particular da retificação, está relacionado com o uso de fluidos de corte. Isso se deve aos grandes danos que essas substâncias provocam à saúde das pessoas e ao meio-ambiente (BARTZ, 1998).

A causa maior desses problemas é a composição química dos fluidos de corte. Dessa forma, alguns componentes de sua composição são anticorrosivos, antiespumantes e

biocidas. Os biocidas são uns dos aditivos mais perigosos aos operadores das máquinas (HONG & BROOMER, 2000).

Dessa forma, os principais problemas à saúde humana, decorrentes dos fluidos de corte são relatados no trabalho de Howell *et al.* (2006). Assim pode haver danos na pele, aparelho respiratório e até mesmo digestivo, devido aos metais pesados. O contato pela pele pode ocasionar alergias e dermatites dependendo do tipo de pele da pessoa e o tempo de exposição. Já os danos respiratórios e digestivos ocorrem, respectivamente, pela inspiração da névoa de fluido e por engolir pequenas partículas. Entretanto, Howes *et al.* (1991) averiguou que os principais problemas registrados são respiratórios e dermatológicos.

Além dos problemas ecológicos, existe a preocupação com o fator econômico, pois, conforme Byrne (1993), a utilização dos fluidos de corte representa uma porção significativa dos gastos no processo de manufatura de uma peça, ou seja, em torno de 15 - 17%. Isso ocorre, porque é necessária, além da compra, a preocupação com a manutenção do fluido para que ele não perca suas propriedades. Com isso, é conveniente monitorar sua temperatura, tratar a água que é adicionada, gastar energia com sistemas que o faça circular na máquina evitando ficar parado, controlar o pH entre outros.

Ainda segundo Ebrell *et al.* (2000), apesar de os fluidos de corte trazerem muitos benefícios ao processo produtivo, às vezes são utilizados, tecnologicamente, de forma errônea com um índice muito alto de desperdício. Para que a lubrificação e refrigeração sejam eficientes, é importante que o fluido entre efetivamente na região de corte entre a peça e a ferramenta, reduzindo assim os gastos excessivos e os problemas que implicam em ofender o bem estar humano e ambiental.

Assim, Dhar *et al.* (2006) afirmam que, apesar das vantagens tecnológicas que os fluidos de corte promovem, ultimamente vêm sendo questionados os efeitos negativos que eles causam, ou seja, além das agressões ambientais, também problemas relacionados à saúde do trabalhador. Dessa forma, Sokovic & Mijanovic (2001) relataram que as empresas estão sendo forçadas a programar estratégias de refrigeração menos nocivas no processo de usinagem.

Tawakoli *et al.* (2007) mostram que uma das estratégias para promover diminuição do uso de fluidos de corte é otimizar o fluxo de fluido, situação que ocorre com o uso da mínima quantidade de lubrificante.

2.5 OTIMIZAÇÃO NA APLICAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE NA RETIFICAÇÃO

Webster *et al.* (1995) construíram um bocal otimizado que tem sido muito usado nos últimos anos devido a seu alto desempenho numa variedade de condições. A figura 4 ilustra esse bocal.

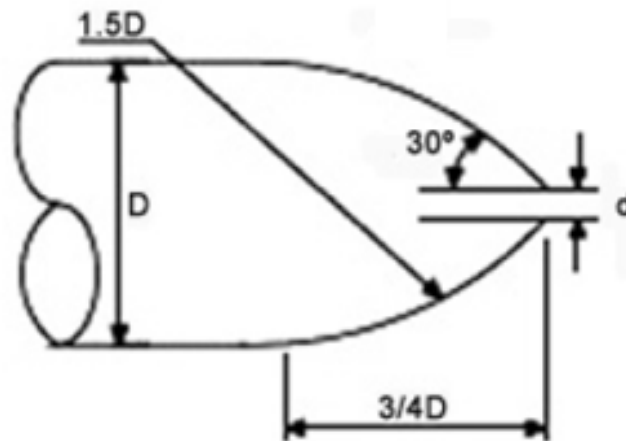


Figura 4 – Bocal construído por Webster *et al.* (1995).

Ebbrell *et al.* (2000) estudaram, com base no colchão de ar que se forma na periferia do rebolo, diferentes posições para aplicação do jato de fluido de corte e verificaram que este influencia nos resultados do processo.

Outro sistema de otimização, estudado por Irani *et al.* (2005) foi o bocal de sapata, como demonstra a figura 5. Segundo Salmon (1992), esse é o melhor método para a aplicação de fluido de corte na periferia do rebolo. Esse sistema trabalha pela entrada de fluido em uma cavidade que é expelido para a superfície do rebolo na sapata e carregado ao arco de corte. Essa técnica maximiza a quantidade de fluido passando na região de usinagem.

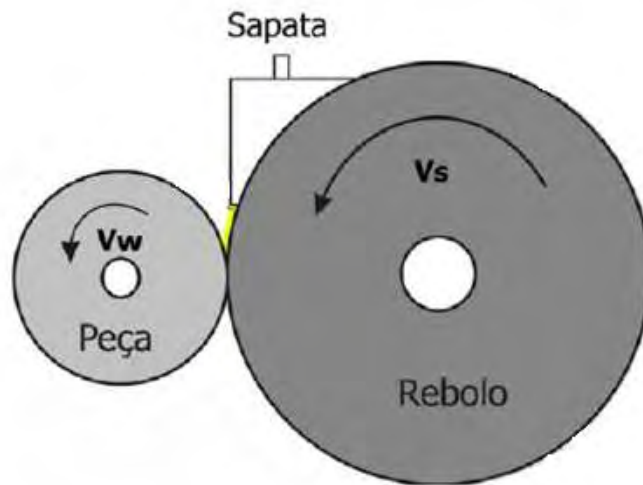


Figura 5 - Bocal de sapata (IRANI et al. 2005 (modificado)).

Ramesh *et al.* (2001) desenvolveram um bocal de sapata com três orifícios ajustáveis para promover a aplicação de fluido de corte. O primeiro orifício elimina a cortina de ar na periferia do rebolo, criando um vácuo que permite grande fluxo de fluido de corte. O segundo orifício suprira o fluido de corte que formava uma camada sobre a superfície de corte do rebolo. O terceiro, por sua vez, mandava o fluido direto à zona de corte. Com esse bocal, a força diminui 40 - 60%, a taxa de remoção aumentou e a qualidade superficial melhorou. Entretanto ocorre um aumento no consumo de potência no eixo de acionamento do rebolo para acelerar o fluido, e a diminuição da força depende do material usinado.

2.6 A BUSCA POR FORMAS ALTERNATIVAS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Uma crescente atenção tem sido voltada para a cuidadosa seleção do fluido com o intuito de preservar o meio ambiente. Dessa forma, além dos requisitos tribológicos, os fluidos de corte devem satisfazer os critérios de proteção ambiental regidos pela norma internacional ISO 14000. Em função disso, os custos crescentes com o descarte desses fluidos, forçam as empresas a programar novas estratégias de refrigeração no processo de usinagem (SOKOVIC & MIJANOVIC, 2001).

Tecnologias para reduzir o consumo de fluido de corte estão disponíveis nos processos convencionais, como por exemplo: torneamento, fresamento e furação, envolvendo a mínima quantidade de lubrificante ou até mesmo a usinagem à seco devido aos novos materiais das ferramentas e as condições de usinagem. Comparando-se aos processos de retificação, normalmente os processos convencionais apresentam uma região menor de contato entre a peça e a ferramenta (DINIZ *et al.* 2008).

Na retificação, entretanto, com o maior atrito e maior região de contato, altas temperaturas são alcançadas e grandes quantidades de calor devem ser retiradas, caso contrário danos térmicos ocorrem na peça, os quais aceleram o desgaste do rebolo e deformações são induzidas na peça pela alta elevação da temperatura, resultando em pobre qualidade final das peças retificadas. Dessa forma grandes quantidades de fluido são usadas para remover grande parte do calor gerado (SHILLOR *et al.* 2004)

Assim as técnicas de retificação que busquem a eliminação ou ao menos a minimização do uso dos fluidos de retificação, devem manter a eficiência do processo (SANCHEZ *et al.* 2010).

Dineshi *et al.* (2010), definem uma pirâmide das tecnologias em lubri-refrigerantes nos processos de usinagem. Em seu artigo a tecnologia atual disponível em grande escala são os fluidos de corte convencionais, usados em abundância. Já o MQL e a usinagem à seco são as condições mais favoráveis e desejáveis para reduzir custos e impactos ambientais.

Tawakoli *et al.* (2007) afirmam que as estratégias para diminuição do uso de fluidos de corte e a busca por formas mais eficientes de lubri-refrigeração são: usar bocais especiais, otimizar o fluxo de fluido, usar a mínima quantidade de lubrificante, aumentar a vida do fluido, usar grafite, resfriamento criogênico, bio-fluidos e usinagem à seco.

2.6.1 Usinagem à seco

A usinagem a seco é hoje de grande interesse e atual, a qual encontra o sucesso nas questões ambientais. Contudo, ela é menos eficiente quando melhor qualidade da superfície acabada e condições severas são requeridas. (SANCHEZ *et al.* 2010).

Segundo Sreejith & Ngoi (2000), a usinagem a seco é ecologicamente desejável e é considerada uma necessidade das empresas. A usinagem a seco é uma forma de reduzir os

impactos ambientais e zelar pela saúde das pessoas. As vantagens dessa técnica são: não poluir a atmosfera ou a água; não gerar resíduos de fluido nos cavacos e com isso diminuir o custo de descarte; não agredir a saúde humana. Na usinagem a seco, entretanto, haverá maior atrito entre a ferramenta e a peça, uma vez que estarão submetidos a altas temperaturas, causando aumento no desgaste da ferramenta e redução de sua vida. Entretanto, as vantagens listadas pelos autores são: redução dos choques térmicos e uso da ferramenta em um ambiente constante de corte.

A retificação a seco ainda apresenta importantes limitações para ser aplicada na prática industrial. A eliminação total dos fluidos de corte resulta em temperaturas mais elevadas durante o processo, afetando a integridade superficial e precisão geométrica da peça retificada, além de um aumento no desgaste e empastamento do rebolo (SU *et al.* 2007).

Ainda segundo Sreejith & Ngoi (2000), rebolos de diamante e CBN têm grande aplicação na usinagem a seco, pois produzem melhores superfícies com menos desgaste da ferramenta devido à elevada dureza e boa condutividade térmica desses.

A alta geração de calor está associada com o ângulo de incidência da aresta de corte e o grande comprimento de contato. Na usinagem a seco, usando condições especiais de rebolo (tamanho do grão, ligante e porosidade) ou mudanças nos parâmetros como: profundidade de corte, taxa de remoção de material ou velocidade de avanço, é possível reduzir o calor (TAWAKOLI *et al.* 2009).

Assim segundo Sadeghi *et al.* (2009), as limitações da usinagem a seco podem ser superadas pela introdução da mínima quantidade de lubrificante.

2.7 A TÉCNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL)

A mínima quantidade de lubrificante (MQL) é definida como uma pequena quantidade de óleo misturada com ar comprimido e direcionada à região de corte, evitando as inundações de óleo observadas na refrigeração convencional (OBIKAWA *et al.* 2006).

No MQL, o aerosol corresponde a inúmeras gotículas de óleo dispersas em um jato de ar que as carrega diretamente à zona de corte, proporcionando eficiente lubrificação. Os

fluidos de corte convencionais, devido ao uso de aditivos, não conseguem entrar diretamente na zona de corte, sendo o MQL mais eficiente, nesse aspecto.

Uma das vantagens do MQL é o fato de que ao fim da retificação, o cavaco, peça e ferramenta apresentam menor resíduo de fluido, sendo mais fácil e econômica a limpeza dos mesmos. Além do mais, durante a usinagem, como a peça não é totalmente coberta com fluido, é fácil de ser observada. Na mínima quantidade de lubrificante é usado baixo volume de fluido, ou seja, ao invés da ordem de litros são usados milésimos de litro, aproximadamente de 10 – 100 ml/h e pressão de 4 - 6,5 bar (ATTANASIO *et al.* 2006).

Apesar de o MQL promover lubrificação eficiente, redução da energia de retificação e da energia específica comparado com processos utilizando fluidos de corte (óleos solúveis) em abundância em situações não muito severas de usinagem, os valores de rugosidade alcançados não são relativamente bons (HAFENBRAEDEL & MALKIN, 2001).

Brinksmeier *et al.*(1999) afirma que um grande desafio da técnica da mínima quantidade de lubrificação está na refrigeração, sendo problemática sua aplicação em situações em que se necessita alta refrigeração.

Choi *et al.* (2008), estudaram o efeito da aplicação de ar comprimido refrigerado para atuar como refrigerante no processo de retificação cilíndrica de aços endurecidos. Observou-se que a eficiência do ar em reduzir os danos térmicos foi igual a dos fluidos convencionais quando a profundidade de corte era pequena. Entretanto, a tensão superficial apareceu e a rugosidade subiu com o aumento da profundidade de corte. Eles concluíram que isso ocorria devido à quantidade reduzida de lubrificante. Dessa forma, aumentou-se o desgaste do rebolo, conforme aumentaram os passes, mas a força e energia foram menores em relação aos fluidos de corte.

Silva *et al.* (2007) estudaram os parâmetros de retificação do aço ABNT 4340 usando a técnica do MQL. Concluiu-se que a rugosidade, desgaste diametral do rebolo, as forças e tensão residual foram melhoradas usando o MQL devido ao maior escorregamento do grão na zona de contato.

Já com relação ao fluido usado no sistema de MQL, Suda *et al.* (2002) afirmam que o óleo sintético de éster tem grande propriedade como, biodegradável, antidesgaste da ferramenta, anticorrosão e estabilidade ao ser armazenado. Brinksmeier *et al.* (1997) afirmam que o tipo de fluido usado na retificação com MQL influencia no processo.

Além disso, existem restrições a certos fluidos no processo do MQL. Os fluidos de corte a base de água com cloro orgânico, aditivos de zinco e óleos minerais não podem ser usados junto ao MQL (STÄBLER *et al.* 2003). Segundo Skerlos & Hayes (2003), óleos de base vegetal estão sendo vistos como uma ótima alternativa também no processo de usinagem perante os tradicionais fluidos de corte.

Heisel *et al.* (1998) e Klocke *et al.* (2000) listaram as vantagens do MQL comparado aos fluidos de corte convencionais no processo de retificação:

- ✓ Reduzida quantidade de fluido é utilizada, onde não há a necessidade de equipamentos adicionais para a circulação dos fluidos;
- ✓ Não é necessário sistema de filtragem e reciclagem;
- ✓ Menor manutenção do fluido;
- ✓ As peças saem mais limpas no final da operação;
- ✓ Reduz o volume de fluido impregnado no cavaco;
- ✓ Reduz o uso de biocidas e fungicidas.

Segundo Machado & Diniz (2000), comparada com a técnica tradicional dos fluidos de corte, o MQL apresenta custos adicionais para pressurizar o ar. Devem-se ter, também, sistemas adicionais para o transporte dos cavacos. Adicionalmente a produtividade deve decrescer devido aos danos térmicos aos componentes das máquinas. Deve-se ter um bom sistema de exaustão além de proteções para evitar que a névoa saia da máquina. O ruído do sistema de ar comprimido também excede o normalizado.

Apesar de o MQL promover lubrificação eficiente, redução da energia de retificação, da energia específica e do desgaste do rebolo para um nível de comparação com os fluidos de corte (óleos solúveis) em situações não muito severas de usinagem, os valores de rugosidade alcançados não são relativamente satisfatórios. (HAFENBRAEDEL & MALKIN, 2001).

Tawakoli *et al.* (2009) relatam que, para o uso eficiente do MQL, é preciso avaliar o efeito dos parâmetros do sistema e das diferentes peças no desempenho do processo de retificação. Eficiência na lubrificação faz com que o cavaco deslize mais facilmente na superfície da ferramenta e promova melhor acabamento superficial.

2.8 FENÔMENO DO EMPASTAMENTO DAS POROSIDADES DO REBOLO

Wang *et al.* (2000) afirma que quando a energia na interface rebolo/peça gera um aumento na temperatura, ocorre uma maior tendência de aderência de partículas metálicas nos poros da ferramenta abrasiva. Com isso, ocorrerá uma elevação ainda maior de temperatura, causando danos térmicos como a queima superficial da peça, além de piorar o acabamento da peça e aumentar o desgaste do rebolo. Portanto, quanto menor a energia específica associada ao processo, menor a chance de danos ao trabalho (SALMON, 1992).

Cameron *et al.* (2010) explicam a fenomenologia do empastamento do rebolo da seguinte forma: quando o cavaco gerado no processo de retificação não é totalmente removido da zona de corte por meio do fluido refrigerante, esses cavacos alojam-se nos poros do rebolo, não deixando os fluidos entrarem perfeitamente na zona de corte e, dessa forma, dificultando ainda mais a limpeza. Esses cavacos alojados na superfície de corte do rebolo afetam a eficiência e qualidade da operação de retificação, pois aumentam a contribuição das deformações elástica e plástica na energia total de retificação. Assim, a energia inicial do processo irá subir e o calor na zona de corte também.

Detalhando um pouco mais este fenômeno, quando o processo de retificação se inicia, os cavacos vão sendo gerados e não são eliminados da zona de corte, mas sim, quando da utilização de MQL, misturam-se ao óleo do MQL e alojam-se nos poros do rebolo como mostra a figura 6. À medida que a usinagem ocorre, essa proporção de cavacos vai aumentando até o momento em que ocorre o contato entre a peça e os cavacos alojados. Assim, haverá atrito entre eles, ocasionando apenas deformação elástica e plástica da peça, além do atrito maior, o que aumentará a potência de corte, a rugosidade e circularidade da peça e o desgaste do rebolo. O cavaco no poro do rebolo irá gerar reações nos grãos abrasivos e na peça. Com isso, desgaste do rebolo se acentuará pelo desprendimento dos grãos. Adicionalmente, a peça será riscada pelo cavaco, piorando sua rugosidade.

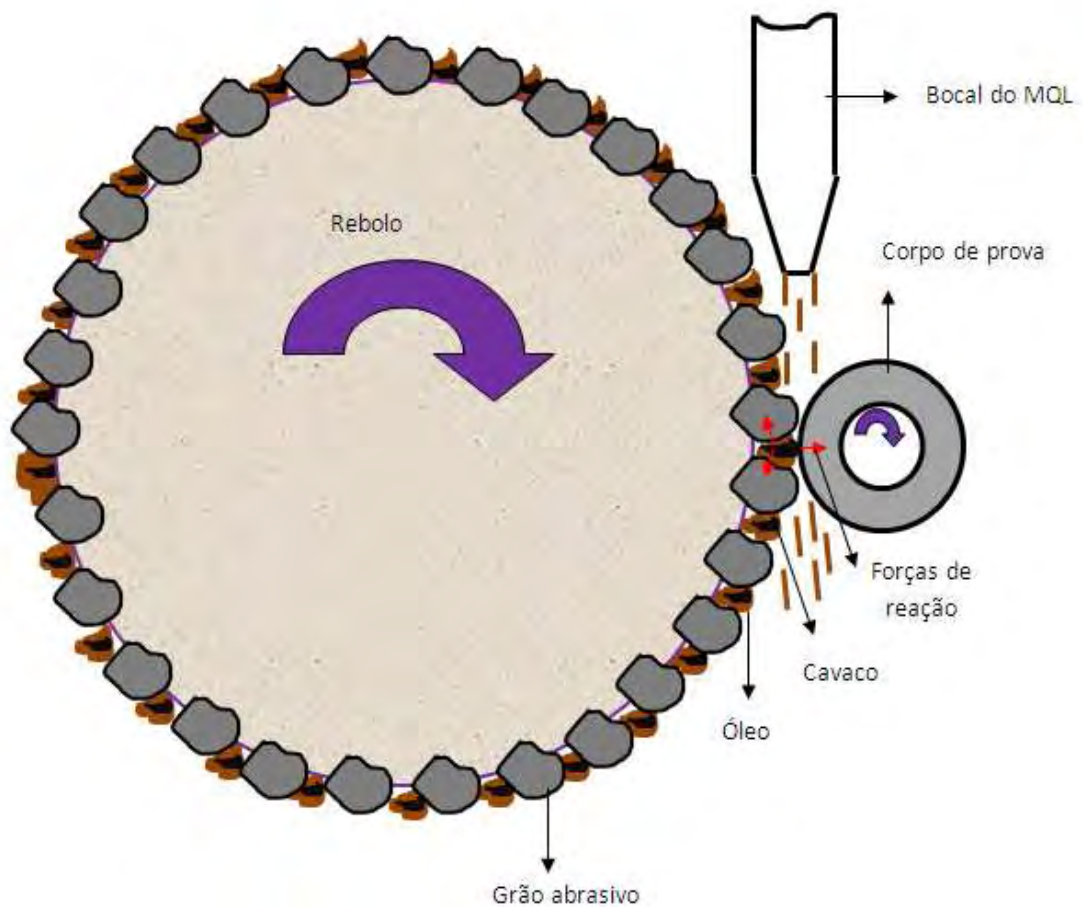


Figura 6- Fenômeno do empastamento do rebolo.

Conforme Sinot *et al.* (2006), certas ligas são caracterizadas de difícil usinabilidade, como ligas de titânio, por exemplo, entopem os poros do rebolo facilmente quando partículas metálicas são comprimidas e aderidas nos espaços entre os grãos. Com altas taxas de remoção, o fenômeno é mais acentuado e alguns rebolos estão sujeitos a entupir mais e outros menos.

Sinot *et al.* (2006) ainda descrevem duas maneiras de evitar o empastamento: usar um rebolo com uma estrutura aberta, o que pode aumentar a probabilidade da fratura do ligante; ou redressá-lo, o que aumenta o custo do processo.

A figura 7 apresenta uma pasta com tom cinza uma pasta com tom cinza perceptível a olho nu na superfície de corte do rebolo, além da imagem feita no microscópio da superfície de corte de um rebolo entupido com cavacos (aumento de 100 X).

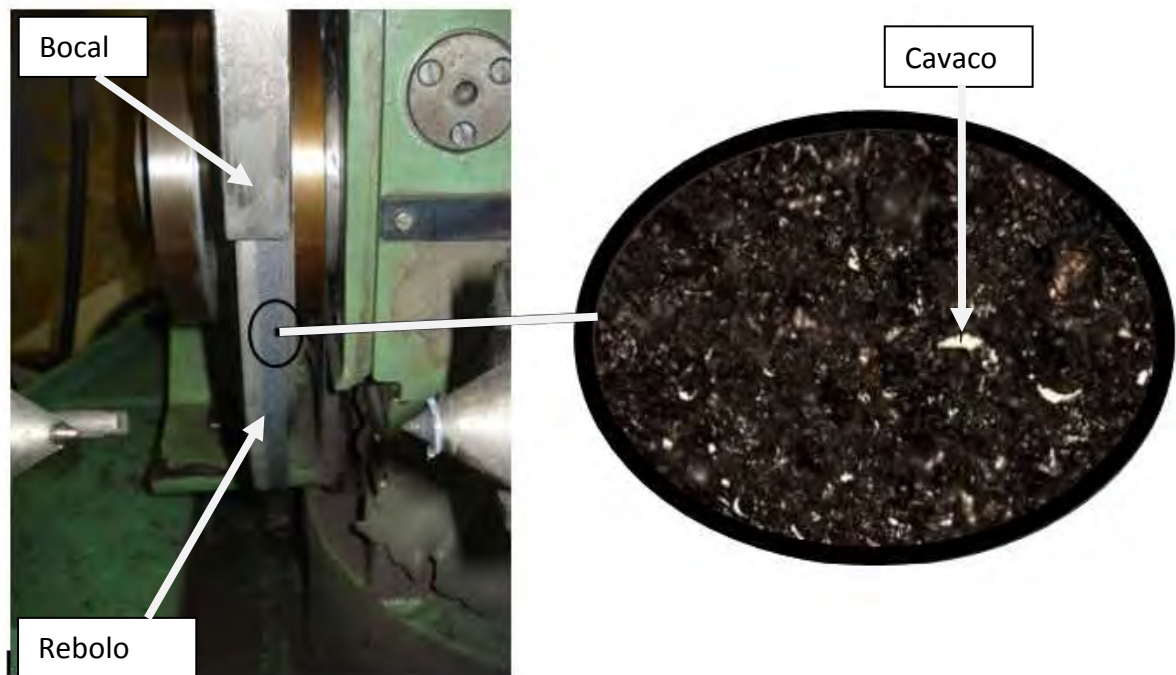


Figura 7 – Rebolo empastado com cavacos aderidos (aumento de 100X).

2.9 SISTEMAS QUE PROMOVEM A LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DE REBOLOS ENTUPIDOS POR CAVACOS

2.9.1 Limpeza a laser

Jackson *et al.* (2007) utilizaram um laser de dióxido de carbono para efetuar a limpeza da superfície de corte do rebolo. Segundo esses autores, o laser pode ser uma onda contínua ou pulsante. Como na figura 8, o laser passa por uma lente convexa e irradia na superfície do rebolo com grande quantidade de energia. Essa energia é capaz de cortar o rebolo, removendo grãos abrasivos e cavacos aderidos. Dessa forma, deve-se controlar a irradiação para que ele não danifique o rebolo, sendo dois parâmetros importantes a controlar: fluxo de energia do feixe e a duração do mesmo. Ajustando o foco, o fluxo de energia pode ser controlado. Controlar a duração do pulso do laser e sua frequência, também pode ajudar a ajustar o nível de energia de irradiação.

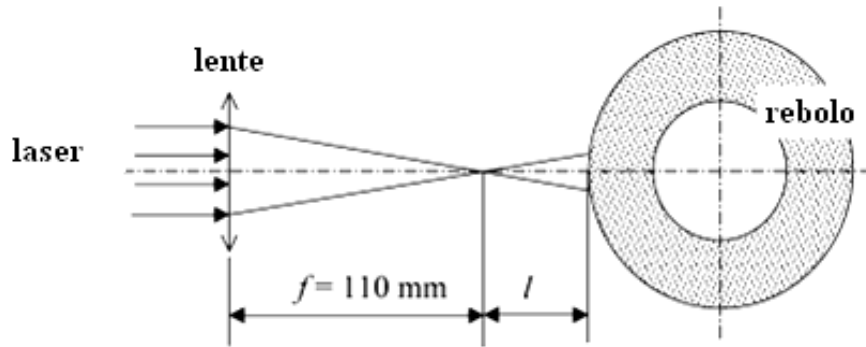


Figura 8 - Limpeza a laser da superfície de corte do rebolo (JACKSON *et al.* 2007).

2.9.2 Limpeza por um sistema secundário de fluido de corte

Cameron *et al.* (2010) estudaram a retificação de aço com rebolo de alumina usando um sistema secundário de fluido de corte (composto por bomba e bocal de aplicação) de alta velocidade para a limpeza do rebolo, em adição ao sistema normal de fluido de corte. O sistema com a limpeza proporcionou menor queima da peça. A conclusão obtida foi que o cavaco aderido à superfície de corte do rebolo causava aumento das forças e queima da peça.

Webster (2008) descreve uma avaliação em uma fábrica de cames, onde um jato separado de alta pressão foi adicionado ao processo de retificação para limpar o rebolo. Adicionando esse jato, foi possível o fabricante reduzir as inspeções de defeitos, economizando U\$ 300.000,00 por ano com mão-de-obra e consumo de materiais.

Com base no trabalho de Cameron *et al.* (2010), onde se estudou a influência do jato de fluido de corte para a limpeza sobre o processo de retificação, a figura 9 mostra que a energia específica do processo para o jato usado a 120m/s é vista como 33% menor em relação ao caso onde não se usou limpeza. Isso implicou em maior eficiência e menor ocorrência de queima.

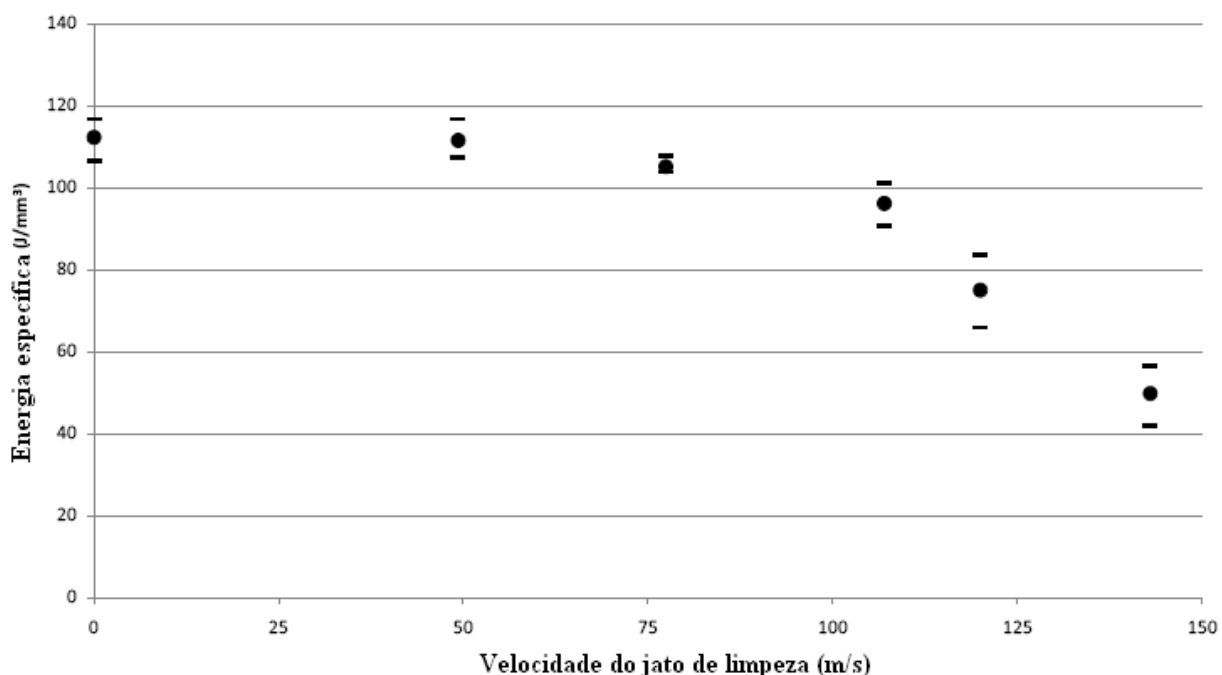


Figura 9 - Influência da limpeza do rebolo no patamar de energia específica (CAMERON *et al.* (2010))

O sistema promoveu a limpeza da superfície de corte do rebolo, bem como o seu resfriamento. A vazão usada para o jato foi 17,8 litros/min e as orientações do bocal de limpeza foram: normal à superfície de corte, 26° e outra 90° (tangencialmente). Conforme estes autores, quando o bocal estava orientado normalmente, o fluido penetrava profundamente; quando tangencialmente, refletia. Assim, notou-se que houve maior redução da força tangencial com 26°, pois o fluido espalhava-se pela superfície do rebolo abrangendo uma área maior.

2.9.2.1 Alguns problemas referentes ao uso de fluidos de corte na limpeza e os mecanismo de incidência na superfície de corte do rebolo

Segundo Sinot *et al.* (2006), com a aplicação do sistema secundário de limpeza por meio de fluidos de corte, deve-se aumentar a energia de rotação do rebolo de 30-50%. Outra dificuldade se refere à alta pressão do sistema que necessita de bombas grandes,

tanques e filtros potentes. Além do mais, existe a questão dos problemas ambientais e da saúde do operador que são ofendidos pela composição dos fluidos.

Ainda segundo esse autor, na limpeza, os jatos perpendiculares são melhores para tirar os cavacos que estão na parede do grão. Entretanto, a camada de ar na superfície do rebolo limita a penetração, então o jato é defletido de uma distância δ , conforme a figura 10. A limpeza é eficiente quando F_y e o tempo de exposição são altos. O critério de eficiência da limpeza é P'_{cl} que leva em conta o tempo de exposição e a pressão aplicada no jato, como é dado na equação (9):

$$P'_{cl} = \frac{\cos \delta \cdot F_{cl}}{L_z \cdot V_s} \quad (9)$$

Onde: L_z é a largura do rebolo que é atingida pelo jato; F_{cl} - Força do jato de limpeza; δ - ângulo de deflexão do jato.

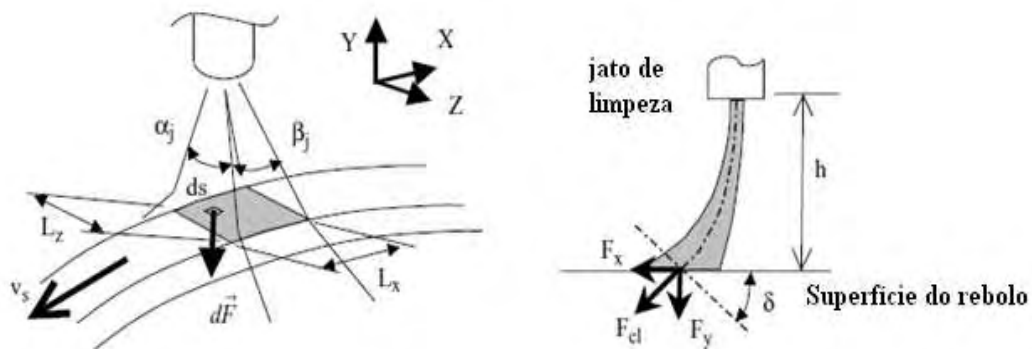


Figura 10 - Mecanismo da incidência do jato de fluido para limpeza da superfície de corte do rebolo (SINOT et al. 2006).

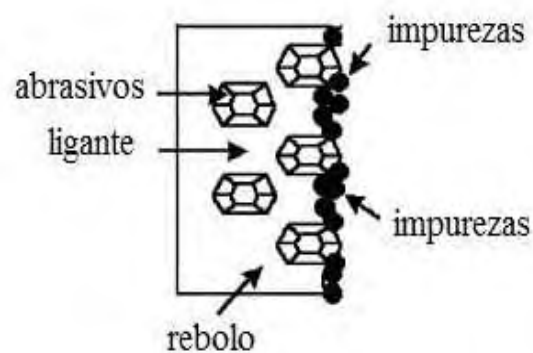
Sendo: F_x - Componente em x de F_{cl} ; F_y - Componente em y de F_{cl} ; L_x - Espessura da superfície de corte do rebolo atingida pelo jato; d_s - superfície atingida pelo jato; h - distância do jato; α_j - divergência do jato no plano YZ; β_j - divergência do jato no plano XY.

Quanto menor a distância do bocal à superfície, mais eficiente é a limpeza, pois L_z é pequeno. Assim, a área do rebolo coberta pelo jato depende da distância do mesmo ao rebolo. Se a distância é grande, a área coberta é maior que a largura do rebolo.

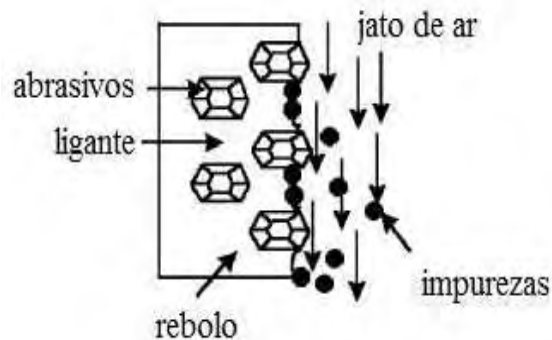
Apesar dessas tecnologias inovadoras, segundo Cameron et al. (2010), mais pesquisa é necessário para investigar os efeitos de diferentes parâmetros e configurações de limpeza do rebolo.

2.9.3 A perspectiva de aplicação de ar comprimido como um sistema alternativo para a limpeza do rebolo

Conforme o trabalho realizado por Lee *et al.* (2002) na retificação de canais em peças, o jato de ar comprimido é uma alternativa para impedir o fenômeno do empastamento do rebolo, pois o ar incide no rebolo e retira boa parte todas as impurezas que aderiram à ferramenta, segundo figura 11. Dessa forma, quanto menor a pressão do ar, menor será seu efeito de limpeza.



(a)



(b)

Figura 11 – Efeito do jato de ar comprimido (a) Retificação sem limpeza do rebolo; (b) Retificação com limpeza do rebolo (LEE *et al.* 2002, adaptado).

Lee *et al.* (2002) concluíram que é conseguido um aumento na profundidade de corte decorrente da diminuição do desgaste da ferramenta e, além do mais, é possível obter maior qualidade de forma geométrica e superficial, ou seja, melhores valores de rugosidade com a utilização de jatos de ar comprimido para a limpeza da ferramenta de corte.

Espera-se que a aplicação do sistema de limpeza na condição de lubri-refrigeração MQL promova efeito semelhante ao verificado por Lee *et al.*(2002) como mostra a figura 12.

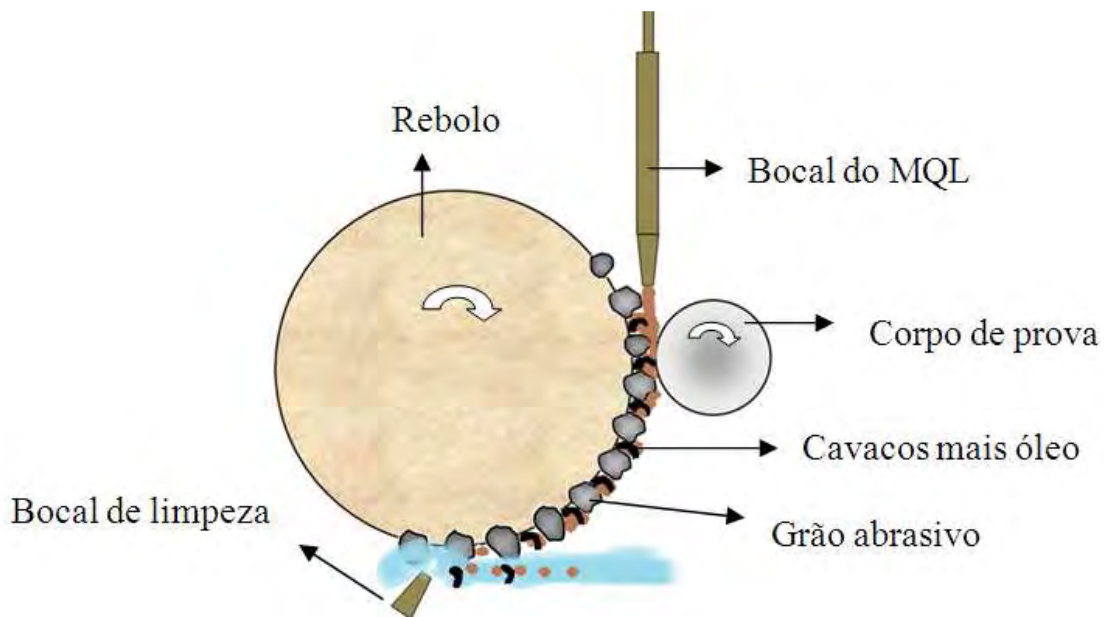


Figura 12 - Efeito do jato de ar comprimido na limpeza do rebolo.

2.10 DANOS TÉRMICOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A alta quantidade de energia por volume de material removido converte-se em sua maior parte em calor que se concentra na zona de corte e pode comprometer a integridade superficial de uma peça retificada. Danos de origem térmica causados à superfície de um material podem afetá-lo significativamente, causando redução na resistência ao desgaste, nucleação e propagação de trincas e aceleração do processo de fadiga da peça.

Um dos principais danos a integridade superficial de peças retificadas é a queima de retificação. Pode ocorrer a queima visível caracterizada por uma camada de óxido na superfície da peça, porém a ausência da camada visível não significa necessariamente que não ocorreu o dano térmico. Os danos térmicos são oriundos dos fenômenos de aquecimento durante a remoção do material, e resfriamento provocado pelo fluido de corte. Tais ciclos podem induzir transformações microestruturais na superfície do material, provocando a perda das características mecânicas obtidas no processo de fabricação anterior (SILVA *et al.*2007).

Quanto mais eficiente é a lubri-refrigeração menor é a incidência de tais danos à integridade do material (MALKIN & GUO, 2007).

2.10.1 Queima Visível (Oxidação)

A oxidação caracterizada pela alteração na coloração é a mais óbvia e muitas vezes a primeira indicação visível da ocorrência de danos térmicos. A coloração da oxidação varia de palha claro para azul escuro nos processos convencionais de retificação, normalmente ocorrem em temperaturas acima de 450 °C; onde as colorações mais claras indicam que a oxidação ocorreu em menor temperatura; porém pode ocorrer em temperaturas menores em baixas velocidades de corte (MARINESCU *et al.* 2004). A figura 13 mostra uma peça apresentando queima visível após a retificação plana realiza sem lubri-refrigeração.



Figura 13- Queima visível de retificação (TAWAKOLI *et al.* 2007).

2.10.2 Perda de Dureza

As temperaturas de retificação podem não ser altas o suficiente para ocasionar a queima visível, porém em algumas situações superam a temperatura do revenimento anterior à retificação ocasionando uma redução de dureza na superfície retificada.

Quando são realizadas metalografias, a região afetada por este novo revenimento apresenta-se mais escura, e por este fato é tratada por profissionais da área como queima escura de retificação. A queima escura não indica transformações microestruturais, porém, quando a martensita sofre este super-revenimento há uma diminuição da dureza. A profundidade de ocorrência da queima escura não é superior a 100 μm . (MARINESCU *et al.* 2004).

2.10.3 Retêmpera – Queima Branca

Em algumas situações durante a retificação são atingidas temperaturas superiores à de austenitização do material e um rápido resfriamento pode promover uma nova tempera a superfície retificada. Normalmente esta camada retemperada possui pequena espessura e é seguida de uma região com perda de dureza, queima escura. Devido a sua coloração clara quando vista ao microscópio um termo utilizado para sua denominação é queima branca.

A queima branca é muito prejudicial à integridade da peça, pois a superfície endurecida torna-se extremamente frágil, além de serem verificadas tensões residuais de tração que tornam o material suscetível a trincas, reduzindo consideravelmente a resistência ao desgaste e à fadiga da peça. A queima branca seguida de uma queima escura pode ser vista na figura 14. (MARINESCU *et al.* 2004).



Figura 14 - Queimas de retificação (aço ABNT 52100 apresentando queimas após a retificação com abrasivo convencional (1000x)).

2.11 AS VARIÁVEIS DE SAÍDA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Diversas variáveis podem ser analisadas a fim de verificar as características do processo de retificação. Tais variáveis são especificadas em função dos diferentes tipos de materiais que apresentam diferentes mecanismos de remoção de cavacos, (KRAMER, 2007). As variáveis de saída são analisadas para melhor compreensão dos resultados, pois a interação singular entre o grão abrasivo e a peça possui uma influência direta na modelagem de tais variáveis (HECKER *et al.* 2007).

2.11.1 Erro de Circularidade

O erro de circularidade define-se como espaçamento radial entre dois círculos teóricos perfeitos e concêntricos onde deve - se encontrar um círculo real. Tal tolerância é definida em função da aplicação da peça (JEDRZEJEWSKI & MODRZEJCKY, 1997).

Dessa forma, segundo Holesovsky & Hrala (2004), a precisão de uma peça trabalhada na retificação é predita pela precisão do equipamento de produção, a magnitude de desgaste do rebolo, rigidez do conjunto máquina/peça/ferramenta/sistema de fixação, a taxa de remoção do material e energia específica. Com base nisso, quanto maior o calor na zona de corte maior dilatação e deformações térmicas e então ocorrerá na peça um aumento nos erros geométricos, especialmente no erro de circularidade (DEMETER & HOCKENBERGER, 1997).

2.11.2 Rugosidade

A qualidade da superfície gerada na retificação de qualquer material determina muitas características da peça trabalhada como a mínima tolerância, a eficiência na lubrificação, a vida útil, propriedades funcionais, resistência à fadiga e corrosão, entre outras. Dessa forma, um parâmetro típico que tem sido utilizado para quantificar a qualidade topográfica da superfície é a rugosidade (HECKER & LIANG, 2003).

Assim, Marinescu *et al.* (1998) define a rugosidade como o conjunto de irregularidades (erros microgeométricos) encontradas nas superfícies usinadas. Um dos parâmetros de rugosidade utilizado é a rugosidade média (*Ra*) que é definida como a média aritmética do desvio do perfil de rugosidade em relação à linha média (MAYER & FANG, 1993).

Weck *et al.* (2001) diz que a qualidade superficial depende principalmente dos aspectos tecnológicos como o rebolo, parâmetros de dressagem, taxa de remoção de material e o uso de lubri-refrigerantes que reduzem as forças e energia. Bigerelle *et al.* (2008) relata que a redução da rugosidade está diretamente relacionada com o tamanho e a forma do grão abrasivo do rebolo, onde quanto mais arestas de corte em contato com a

superfície melhor a rugosidade. A natureza do ligante também influencia nessa variável, segundo Demirci *et al.* (2008).

Já para Hecker & Liang (2003), a rugosidade é função das condições cinemáticas do processo (profundidade de corte, velocidade de corte e da peça) e também do material usinado. Assim, uma maior velocidade melhora a qualidade superficial, pois haverá uma maior quantidade de grãos em contato com a peça.

Além disso, Ramesh & Huang (2003) dizem que o tempo de centelhamento, e o tipo de dressagem melhoram a qualidade superficial porque há uma fragmentação nos cavacos.

2.11.3 Desgaste diametral do rebolo

Durante a retificação de uma peça existem três formas de desgaste da ferramenta abrasiva: pelo atrito entre o grão abrasivo e a peça; fratura do grão; fratura do ligante. Essas formas de desgaste são decorrentes das solicitações mecânicas à que o rebolo é submetido e também da deterioração térmica do próprio ligante (LIAO *et al.* 2000).

A eficiência do rebolo em contraposição ao desgaste pode ser medida por meio da relação “G”. Esta relação é um parâmetro importante porque mantém certa ligação com os custos do rebolo em muitas operações. Por esse motivo, rebolos que apresentam relação “G” alta produzem mais e desgastam-se menos (KRUEGER *et al.* 2000).

Assim, de acordo com Marinescu *et al.* (2004), a relação “G” é uma medida de quanto volume de material é removido da peça por unidade de volume de rebolo gasto:

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (10)$$

Onde: V_w - volume de material removido e V_s - volume de rebolo gasto.

Segundo Choi *et al.* (2008), as mudanças nas arestas de corte da superfície de corte da ferramenta abrasiva afetam o desempenho da retificação. Com isso, Marinescu *et al.* (2004) relatam que o desgaste do rebolo durante a retificação influencia, entre outros, nos seguintes aspectos do processo:

- ✓ Erro na profundidade de corte;
- ✓ Erro na dimensão final da peça;

- ✓ Aumento das forças características do processo;
- ✓ Aumento ou decréscimo da rugosidade;
- ✓ Mudança no número de arestas de corte efetivas;
- ✓ Nova dressagem do rebolo, ocasionando perdas na superfície da ferramenta, desgaste da ferramenta de dressagem e também gasto de tempo.

Entretanto, alguns fatores que influenciam o desgaste da ferramenta abrasiva são citados em alguns trabalhos. Choi *et al.* (2008) redigiu em seu artigo que a relação G está primariamente relacionada com a espessura equivalente de corte, onde o aumento dessa espessura promove diminuição do parâmetro G. Além do mais, a maior eficiência do grão abrasivo é conseguida por meio de uma maior velocidade de corte e também pela aplicação de lubri-refrigeração.

2.11.4 Microdureza

Os danos térmicos são uns dos principais fatores que afetam a qualidade superficial e a produtividade. Assim, a maioria dos danos na retificação tem origem térmica e altas temperaturas causam transformações internas (MALKIN & GUO, 2007). Com isso, Aurich *et al.* (2008) diz que, para avaliar a integridade superficial, é importante a análise de microdureza e microestrutura.

Segundo Malkin (1989), os aços são retificados após o tratamento térmico. Com isso, a queima superficial pode ocasionar uma retêmpera, originando uma microestrutura frágil que prejudicará a resistência à fadiga do material. Entretanto, em função do aquecimento do material durante a retificação e também da taxa de resfriamento proporcionada pelo refrigerante, pode ocorrer o revenimento e perda de dureza superficial.

Portanto, a microdureza é uma variável que reforça os resultados da análise microscópica do material. Dessa forma, é importante para avaliar as possíveis transformações microestruturais que a peça possa apresentar durante sua produção e com isso consegue-se uma melhor análise da integridade da peça.

2.11.5 Análises metalográficas

A finalidade da microscopia é obter imagens ampliadas em uma determinada superfície, permitindo assim visualizar e distinguir detalhes e componentes microestruturais não visíveis a olho nu. Embora se imagine que o fator mais importante durante a análise microscópica seja a ampliação, esta é extremamente dependente da resolução do aparelho, e por sua vez depende de limitações físicas que determinam o tipo de radiação a ser utilizada para formação da imagem e também a menor distância em que é possível distinguir dois pontos separadamente (PADILHA, 2004).

As principais fontes de radiação utilizadas na microscopia são: a luz ou feixes de elétrons de alta energia, distinguindo-se assim duas grandes categorias de microscopia; a microscopia óptica e a microscopia eletrônica.

Ainda que a microscopia eletrônica seja muito mais poderosa comparando-se a ótica, o seu uso ainda é limitado pelas empresas, devido ao alto custo dos equipamentos, complexidade de preparação das amostras em algumas técnicas e necessidade de uma série de acessórios de acordo com a análise a ser realizada.

Adicionalmente Padilha (2004) cita que a análise dos componentes microestruturais com o auxílio de microscopia recebe o nome de metalografia. A fim de facilitar a realização das metalografias são utilizados elementos denominados reagentes, normalmente ácidos, que têm por objetivo criar micro-corrosões e assim distinguir mais facilmente os diferentes microconstituintes da amostra.

Outro ponto extremamente importante é a preparação da superfície a ser analisada; esta deve estar polida e isenta de qualquer contaminação. O excesso de rugosidade compromete a resolução da imagem e a presença de partículas estranhas à peça pode ocasionar conclusões errôneas.

Realizando-se a metalografia das peças retificadas é possível observar a ocorrência de danos térmicos, a retêmpera caracteriza-se como uma fase diferente do restante do material, e a região de perda de dureza normalmente é evidenciada por uma alteração da coloração.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os equipamentos e materiais empregados nos experimentos, assim como os procedimentos executados e parâmetros de entrada adotados no desenvolvimento do trabalho. Também são descritas as medições e análise das variáveis de saída e das demais variáveis, além dos definidos. As variáveis de saída analisadas foram: rugosidade, circularidade e desgaste diametral do rebolo além da verificação da integridade das superfícies retificadas através de medições de microdureza e análises metalográficas.

A retificação dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia - UNESP - *campus* Bauru. Os resultados de rugosidade, circularidade e desgaste diametral do rebolo, obtidos após a experimentação, foram analisados nos laboratórios da UNESP, *campus* de Bauru e as análises metalográficas e medições de microdureza no Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, na Escola de Engenharia de São Carlos (USP). Para os ensaios e caracterizações realizaram-se visitas técnicas à empresa INA do Schaeffler Group na planta localizada em Sorocaba, onde se verificaram as características da retificação dos rolamentos e as caracterizações utilizadas para verificar a presença de incorreções provenientes da retificação.

3.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Retificadora cilíndrica externa

Os experimentos foram realizados na retificadora cilíndrica CNC fabricada pela empresa SULMECÂNICA, modelo RUAP515H equipada com comando numérico computadorizado CNC da Fagor para o acionamento do eixo "X". Utilizaram-se dois programas CNC; um para a usinagem dos corpos de prova e outro para a impressão do rebolo desgastado.

A retificadora possuía vedação com cortinas plásticas e placas de policarbonato para minimizar a perda de fluido para o ambiente.

3.1.2 Corpo de prova

O corpo de prova utilizado para os ensaios é feito de aço ABNT4340. Após a confecção, os mesmos foram temperados e revenidos pela empresa Thermix- Tratamentos Térmicos, passando a apresentar uma dureza média de $54 \pm 2 H_{RC}$.

O aço ABNT 4340 é um aço para beneficiamento de alta resistência mecânica, boa resistência à fadiga, elevada temperabilidade, e alta tenacidade. É empregado na confecção de dispositivos e peças sujeitas a cargas altas e periódicas, como engrenagens, eixos, virabrequins, e elementos para diversas aplicações industriais (CAMARGO *et al.* 2009).

A composição química do aço ABNT 4340 é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço ABNT 4340 (CALLISTER, 2010)

SAE	C	Mn	P máx.	S máx.	Si	Ni	Cr	Mo
4340	0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	0,030	0,040	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30

O corpo de prova em formato de anel utilizado possuía as seguintes dimensões: diâmetro externo 54 mm, diâmetro interno 30 mm, espessura 4 mm.

3.1.3 Rebolo Utilizado

Utilizou-se um rebolo CBN de ligante vitrificado do tipo 14A1, com dimensões de 350 mm (diâmetro externo) x 15 mm (largura) x 5 mm (camada), diâmetro interno de 127mm, dureza da liga R, concentração 300 e granulometria entre 100 e 120 mesh classificado como granulometria fina (14A1350x 15 x 125B91R300V23A) da empresa Nikkon Ferramentas de Corte Ltda. As condições de dressagem foram mantidas constantes nos ensaios.

3.1.4 O sistema de refrigeração convencional

O sistema de refrigeração convencional utilizado é o mesmo utilizado em várias empresas atualmente. Consiste essencialmente no reservatório de fluido, bomba de sucção, mangueiras, bocais aplicadores e o fluido de corte. O reservatório da retificadora possui capacidade de 80 litros.

O fluido de corte utilizado foi uma emulsão de 2,5 % em água do óleo solúvel semi-sintético QUIMATICME-I concentrado. O fluido de corte usado possuía na sua composição, anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, tensocitivos não iônicos, alcanolomidas, entre outros.

As medições da concentração da emulsão foram verificadas periodicamente através do refratômetro portátil do fabricante ATAGO modelo N-1E, na concentração de 2,5%.

Foram utilizados dois bocais difusores do tipo fixoflex, também da empresa, QUIMATIC com furos de \varnothing 6,35 mm. O fluido de corte com foi aplicado a uma vazão de 17l/min. Esta vazão foi a máxima alcançada pela bomba empregada e foi mensurada através de um medidor tipo turbina e um display digital.

3.1.5 O sistema MQL

O sistema MQL é composto basicamente de: compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador (equipamento de MQL) e bocal projetado para a utilização de MQL na retificação. O equipamento de mínima quantidade de lubrificante permite a regulagem do volume de lubrificante/ar separadamente, por meio de um registro tipo agulha, atomizando-o em um fluxo de ar à pressão constante de 6,0 kgf/cm², aproximadamente.

O fluido de corte utilizado no sistema MQL foi o Accu-Lube LB 1000 do fabricante ITW Chemical Products Ltda; e foi aplicado sem diluição. Este fluido é adequado para aplicações em altas pressões devido aos seus aditivos.

A vazão de óleo empregada no sistema MQL foi de 100 ml/h. A medição da vazão do óleo foi realizada usando-se uma proveta graduada para coletar e medir o volume de óleo expelido em determinado intervalo de tempo. O controle das vazões do óleo e do ar foi realizado por registros de agulha existentes no interior do equipamento.

Para a medição das vazões de ar comprimido utilizadas nos experimentos, foi usado um medidor de vazão e um regulador de pressão com filtro, o qual é mostrado na figura 15. O medidor de vazão foi conectado a uma rede de ar comprimido, fornecendo a leitura direta da vazão em m³/h, cuja característica construtiva foi do tipo turbina, onde de acordo com a

rotação da turbina, o campo magnético era mais ou menos intenso, sendo tal campo captado por um sensor posicionado próximo a turbina do medidor.

A vazão do ar no sistema MQL era de aproximadamente $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ($480 \text{ l}/\text{min}$).

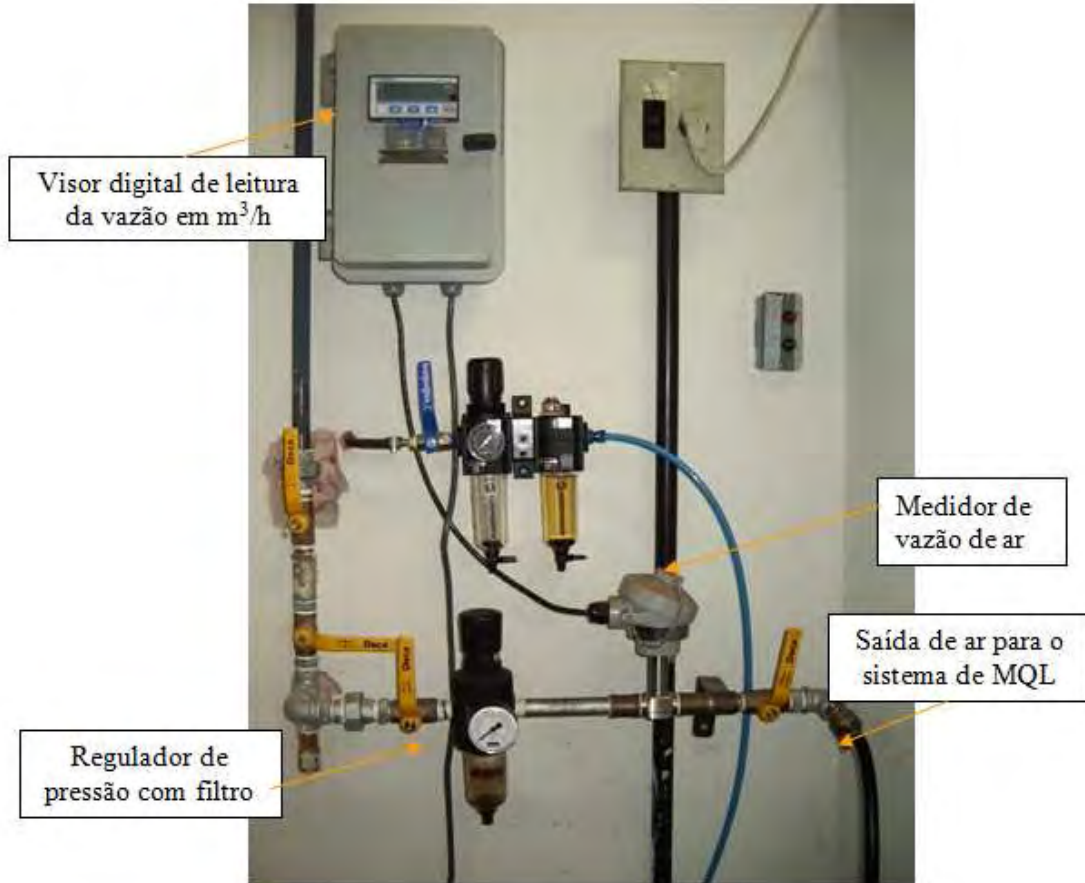


Figura 15 - Sistema de ar comprimido e medição de vazão para o MQL.

Na figura 16 é apresentado o bocal empregado para a lubri-refrigeração MQL. Este foi projetado com dimensões e formas próximas ao desenvolvido por SILVA *et al.* (2007). O bocal foi fabricado em latão e possui várias entradas de ar através de furos externos. Estes furos externos estão conectados a mangueiras independentes externas. Possui (duas) entradas de fluido de corte através de dois furos internos que recebem fluido de duas mangueiras independentes passadas internamente pela mangueira de ar comprimido. O bocal possui ainda uma câmara interna para uma correta mistura do ar comprimido com o fluido de corte através do princípio de Venturi. A saída da mistura fluido/ar comprimido ocorre em uma saída retangular.

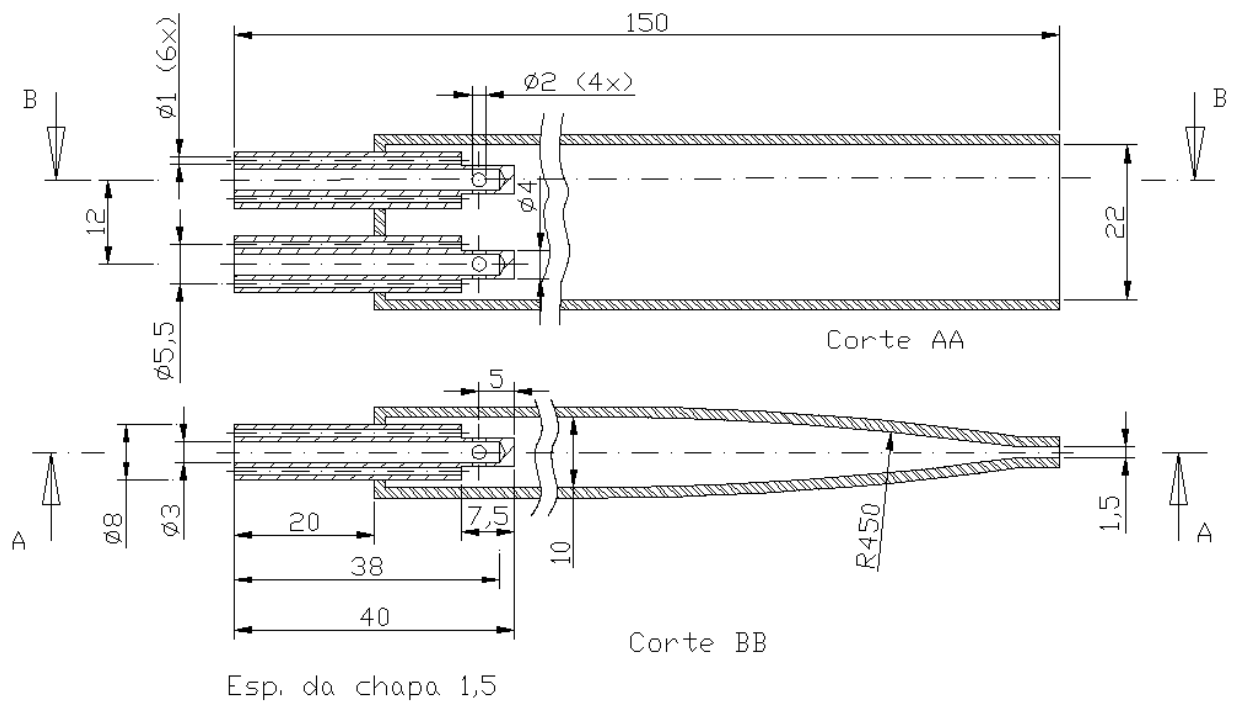


Figura 16–Projeto do bocal para experimentação com MQL.

3.1.6 O sistema de limpeza

Esse sistema é independente do sistema de MQL e constituído de um compressor, reguladores de vazão e pressão e o bocal de limpeza. Optou-se por construir um sistema de ar comprimido independente, para não sobrecarregar um único compressor e ter maior eficiência e precisão nos resultados a serem obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao sistema de limpeza também foi acoplado um sistema para medição da vazão de ar comprimido.

Para aplicação do ar comprimido usado na limpeza do rebolo foi projetado um bocal com um sistema de fixação que permitia o posicionamento do jato de ar em diferentes ângulos de incidência. A alteração do ângulo de incidência era feita através de uma escala graduada com resolução de 15°. A geometria do bocal e seu sistema de fixação e posicionamento são apresentados nas figuras 17 e 18 respectivamente.

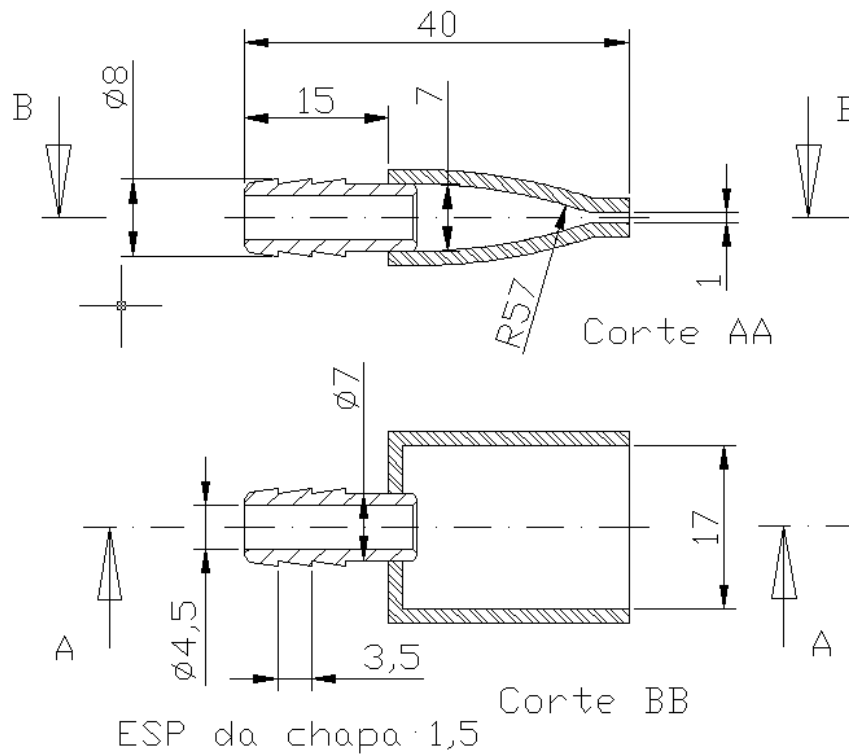


Figura 17 – Bocal de limpeza.



Figura 18 – Sistema de fixação e posicionamento do bocal de limpeza.

O bocal de limpeza foi montado a uma distância em torno de 0,5 mm da superfície de corte do rebolo e fixado na proteção de ferro fundido que existe na retificadora. O posicionamento do bocal de limpeza na proteção da retificadora é mostrado na figura 19.

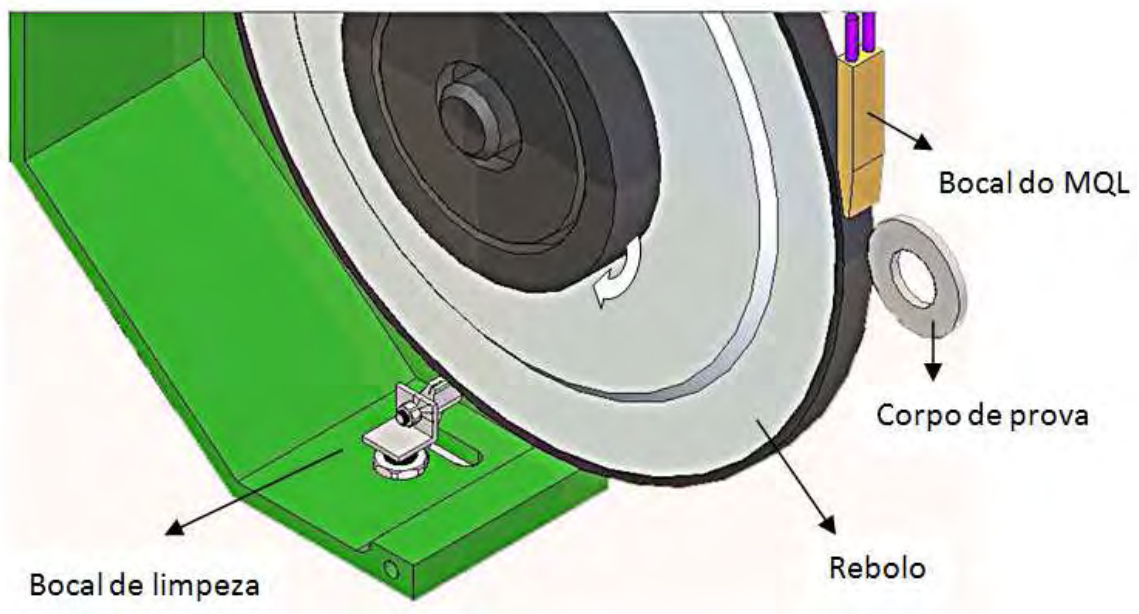


Figura 19 – Fixação do bocal de limpeza

Durante a realização dos ensaios com o sistema de limpeza o ar era expelido contra a superfície do rebolo a uma vazão de aproximadamente 30 m³/h (480 l/min) e pressão de 66,0 kgf/cm² todo o tempo.

3.2 CLASSIFICAÇÃO E PARÂMETROS DOS ENSAIOS

Considerando algumas limitações da retificadora empregada como, por exemplo, baixas rotações do rebolo, ensaios preliminares foram realizados com o intuito de se obter as melhores condições de usinagem para serem usadas nos ensaios definitivos. Salienta-se que para alguns parâmetros os valores utilizados não são os ideais, porém são os valores máximos alcançados na retificadora empregada.

O trabalho consistiu de 18 ensaios, considerando a aplicação de seis condições de lubri-refrigeração em três velocidades de avanço distintas.

As condições de lubri-refrigeração empregadas foram:

- ✓ Convencional (CO) – condição adotada como referência para análise das variáveis de saída por ser a mais amplamente empregada;
- ✓ MQL sem o sistema de limpeza (MQL);
- ✓ MQL + sistema de limpeza; (MQL +)

Quando foi usado o sistema MQL juntamente com o sistema de limpeza do rebolo foram fixados quatro ângulos de incidência do jato de limpeza conforme os ângulos de incidência usados por Cameron *et al.*(2010) em seu trabalho limpando a superfície do rebolo com jato secundário de fluido de corte. Os posicionamentos escolhidos foram:

- ✓ MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado a 30° em relação ao rebolo (MQL + 30°);
- ✓ MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado a 60° em relação ao rebolo (MQL + 60°);
- ✓ MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado a 90° em relação ao rebolo (MQL + 90°);
- ✓ MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado tangente ao rebolo (MQL + Tan).

Os ângulos de incidência do jato de ar comprimido usados nos ensaios são mostrados na figura 20.

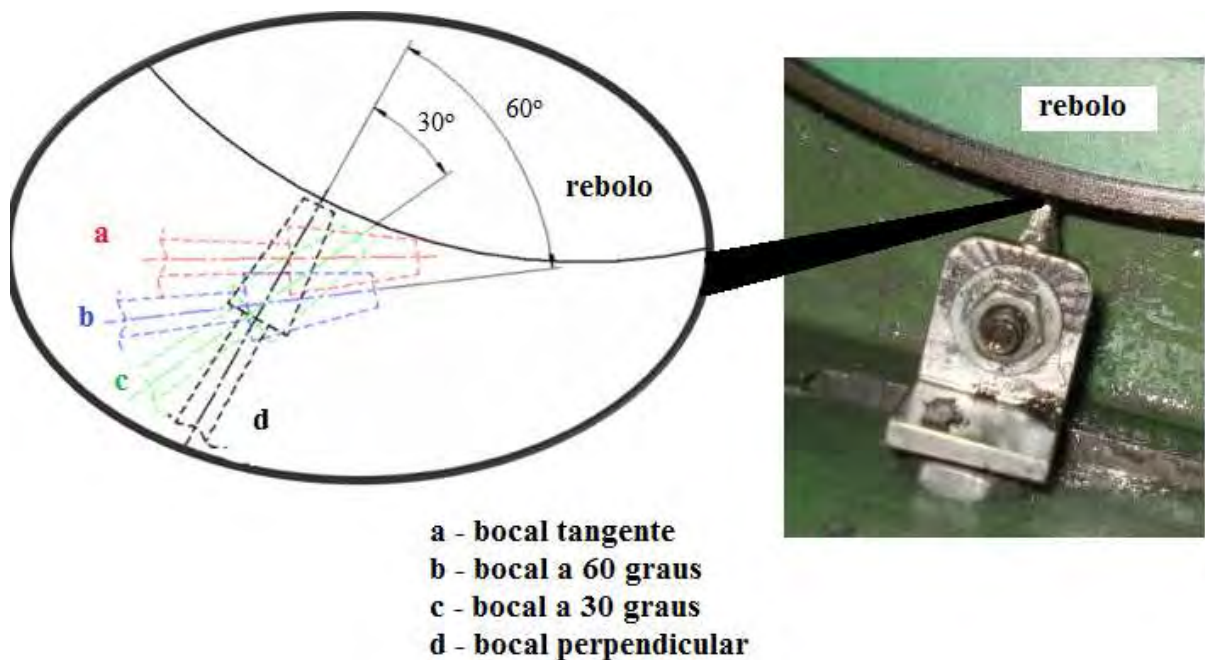


Figura 20 – Detalhe dos ângulos de incidência do jato de ar comprimido.

As velocidades de avanço utilizadas foram: 0,25 mm/min (v_{f1}), 0,5 mm/min (v_{f2}) e 0,75 mm/min (v_{f3}).

A matriz dos ensaios é mostrada na figura 21.

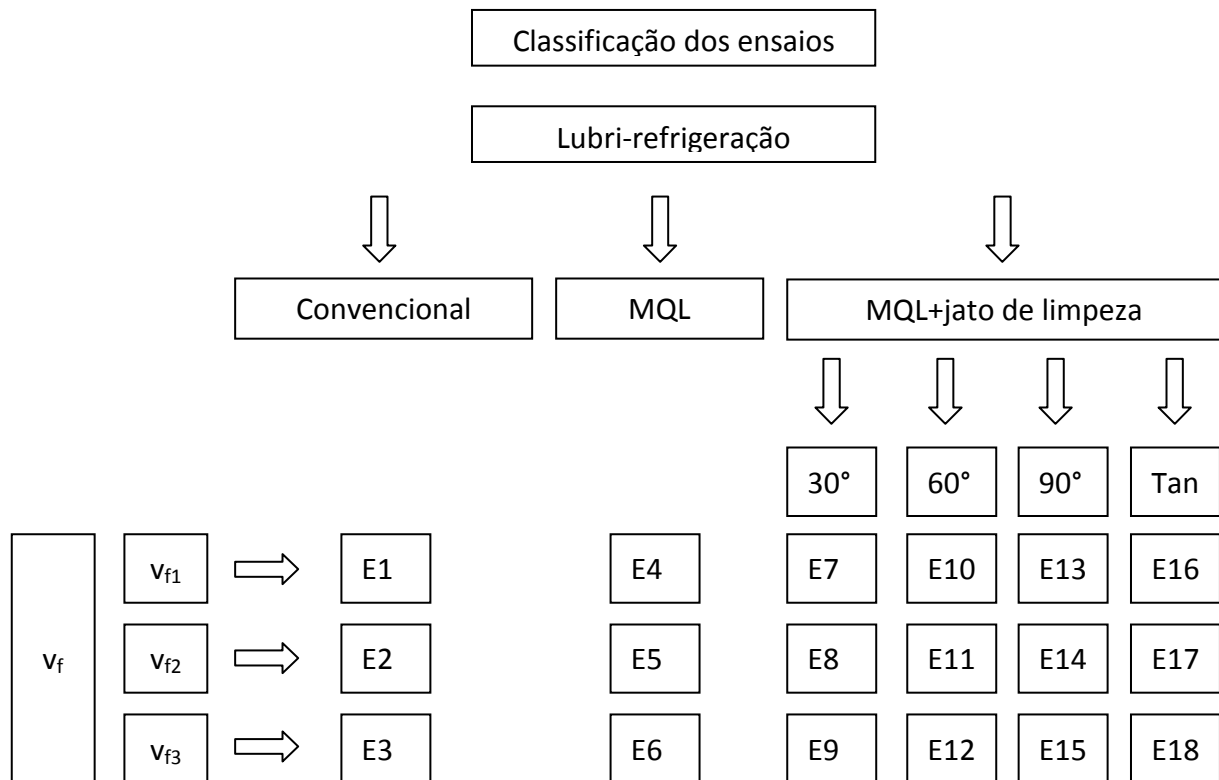


Figura 21 - Matriz de ensaios.

Foram retificadas três peças em cada ensaio totalizando um volume de material removido de 3900mm³. Para analisar as variáveis de saída foram realizadas duas repetições em cada ensaio. Antes de cada ensaio o rebolo era dressado.

Os parâmetros de entrada que foram mantidos constantes em todos os ensaios definitivos foram:

- ✓ Velocidade de corte (v_s) de 30 m/s (baixa para o rebolo de CBN, limitada pela retificadora);
- ✓ Rotação da peça (n_w) de 204 RPM ($v_w = 0,58$ m/s);
- ✓ Sobremetal removido a cada ciclo 0,1 mm;
- ✓ Tempo de centelhamento (t_{so}) igual a 8 segundos;
- ✓ Largura de retificação de 4 mm;
- ✓ Vazão do fluido de corte na refrigeração convencional de 17 l/min;
- ✓ Vazão do fluido de corte no MQL de 100 ml/h;
- ✓ Pressão do ar no MQL de 8 bar;
- ✓ Velocidade de saída do ar de 30 m/s no bocal;
- ✓ Pressão do sistema de limpeza: 6 bar;

- ✓ Vazão do ar no sistema de limpeza: 480 l/min;
- ✓ Profundidade de dressagem (a_d) de 0,04 mm;
- ✓ Velocidade de dressagem (v_d) de 600 mm/min (Feita manualmente, marcando-se o tempo para percorrer determinada distância).

Considerando-se que o diâmetro inicial da peça era 54 mm, o diâmetro final era 50 mm e a largura de retificação era de 4 mm, com os parâmetros acima listados atingiram-se os seguintes parâmetros de retificação que são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - parâmetros de retificação

d_e (mm)	v_f (mm/min)	a (μm)	l_c (mm)	Q_w min (mm^3/min)	Q_w max (mm^3/min)	Q'_w min ($\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$)	Q'_w max ($\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$)	h_{eq} min (μm)	h_{eq} max (μm)
357	0,25	1,23	0,66	157	170	39	42	0,022	0,024
357	0,5	2,45	0,93	314	339	79	85	0,044	0,047
357	0,75	3,68	1,14	471	509	118	127	0,065	0,071

3.3 SEQÜÊNCIA DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Antes da realização de cada ensaio realizaram-se operações de dressagem, a fim de reduzir a influência do desgaste do rebolo nas variáveis de saída. O dressador utilizado foi um do tipo conglomerado, de dimensões 15 x 8 x 10 mm, da empresa Master Diamond Ltda. As operações de dressagem foram realizadas com a lubri-refrigeração convencional. Esse tipo de dressador foi escolhido para uniformizar a superfície de corte do rebolo para o início de um novo ensaio, embora a dressagem rotativa fosse a mais indicada; entretanto, não foi utilizado devido a indisponibilidade do mesmo.

A retificadora empregada não possuía dispositivo de dressagem automática, então o deslocamento transversal para a realização da dressagem foi realizado de forma manual a uma velocidade (v_d) de 600mm/min, a profundidade de dressagem (a_d) foi de 0,04mm. Para as condições de dressagem adotadas houve a predominância do microefeito na afiação da ferramenta.

Na operação de dressagem do rebolo, removia-se material até que a ferramenta abrasiva não apresentasse nenhuma marca referente à usinagem anterior. A operação de dressagem é mostrada na figura 22.

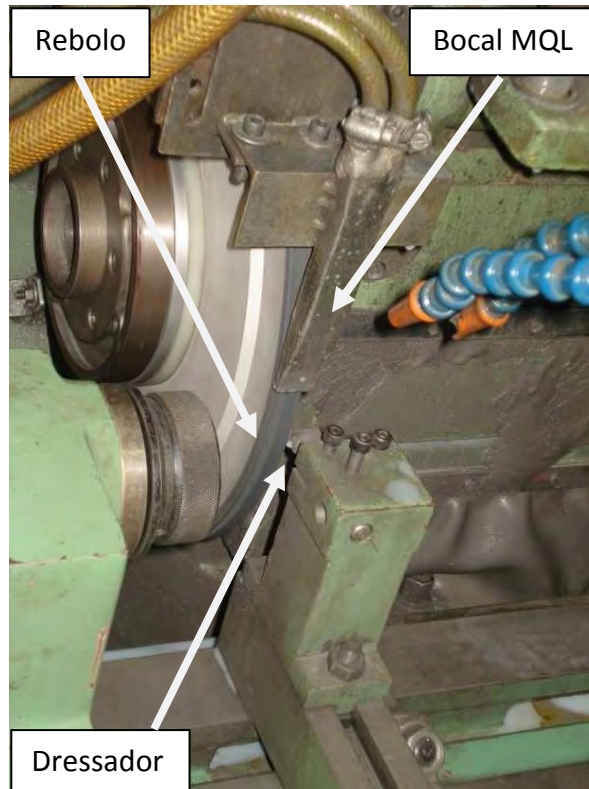


Figura 22 - Operação de dressagem do rebolo.

O corpo de prova em forma de anel foi fixado com interferência e com uma porca em um mandril e este, por sua vez, fixado entre pontas na máquina. Este tipo de sistema é um dos mais utilizados nas indústrias, pois garante rapidez, facilidade de fixação e precisão reduzindo os erros encontrados nas fixações com placas.

Como a largura do corpo de prova ($b_w = 4 \text{ mm}$) era menor que a largura do rebolo ($b_s=15 \text{ mm}$), realizavam-se dois ensaios em regiões distintas do rebolo antes das operações de dressagem. Considerando-se os mesmos parâmetros de dressagem em todos os ensaios, a ferramenta abrasiva apresentava as mesmas condições iniciais para todos os ensaios.

A figura 23 mostra a realização de um ensaio na lubri-refrigeração MQL.

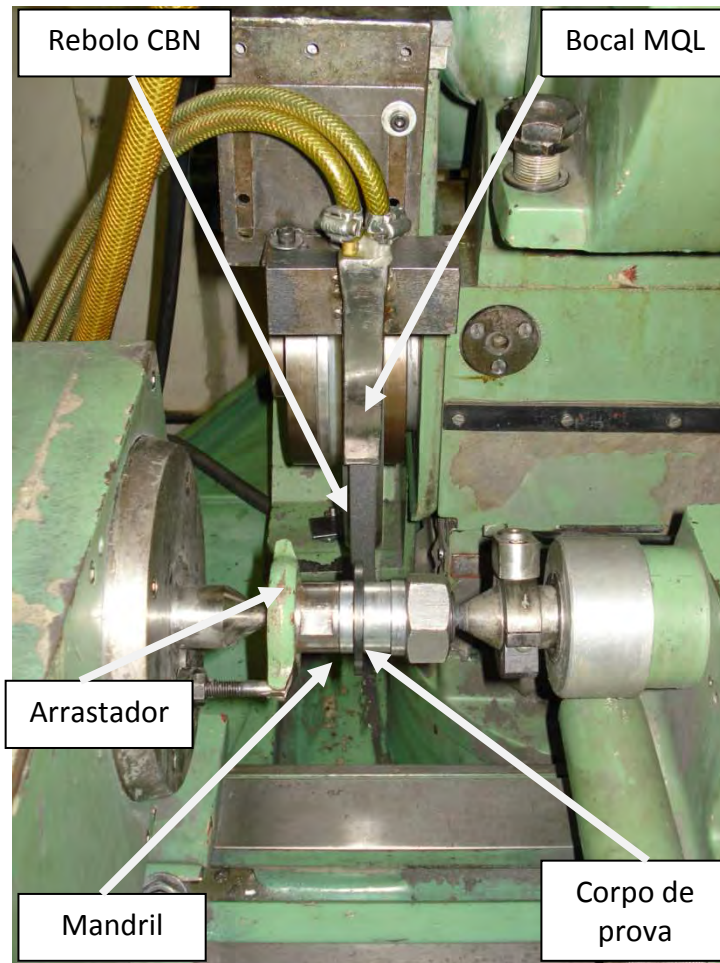


Figura 23 - Ensaio em operação.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA

Realizados os ensaios procederam-se as medições das variáveis de saída: circularidade; rugosidade; desgaste diametral do rebolo; microdureza e análises metalográficas. Escolheram-se tais parâmetros, pois são os mais utilizados pelas indústrias além de serem aqueles que mais indicam as interferências do processo de retificação na integridade do material.

3.4.1 Medição da Rugosidade

Para a medição da rugosidade média das peças (R_a), utilizou-se um aparelho da marca *Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+*.

A medição foi realizada na direção perpendicular à superfície de retificação. O rugosímetro foi ajustado para efetuar a medição com um comprimento de medição (*cut-off*) igual a 0,25 mm. Realizaram-se cinco medições em posições distintas na região retificada de cada uma das três peças retificadas em cada ensaio.

3.4.2 Medição da Circularidade

A circularidade foi obtida através da utilização de um circularímetro modelo *Tayround 31C* marca *Taylor Hobson*.

Na ponta do braço encontra-se o apalpador com uma ponta de diamante, elemento que efetuava o contato com a peça para a obtenção da circularidade. O detalhe da ponta de diamante pode ser vista na figura 24.

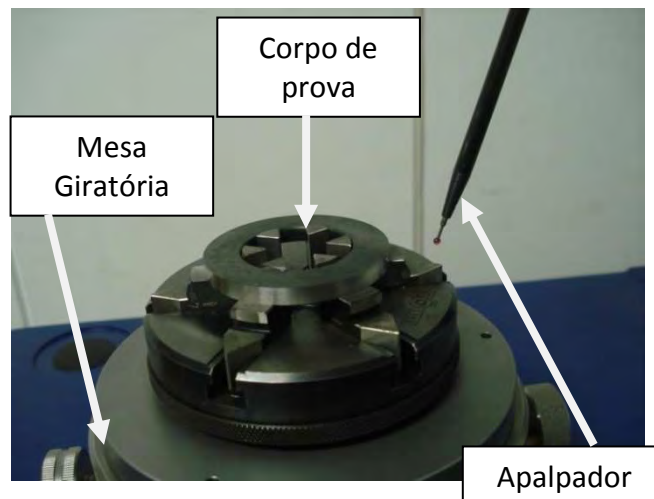


Figura 24 - Detalhe do apalpador.

O circularímetro é alimentado através de um sistema de ar comprimido, garantindo assim que seus movimentos sejam extremamente precisos.

Realizaram-se cinco medições em posições distintas na região retificada de cada uma das três peças retificadas em cada ensaio.

3.4.3 Medição do desgaste diametral do rebolo

O desgaste diametral do rebolo é um forte indicativo para a avaliação entre diferentes condições de retificação, considerando que em todas as condições de usinagem

removeu-se o mesmo volume de material. A marcação do desgaste do rebolo foi possível devido a não utilização da largura total do rebolo (b_s) de 15 mm, pois a largura utilizada foi de 8 mm (2 ensaios por rebolo). Criou-se assim um degrau no rebolo. Após a retificação do corpo de prova do ensaio (ABNT 4340) marcou-se o desgaste em outro corpo de prova (aço SAE 1020). O processo de marcação do rebolo é mostrado na figura 25.



Figura 25 - Processo de marcação do rebolo.

O desgaste foi medido com o auxílio do rugosímetro junto com um software para obtenção do perfil impresso do corpo de prova retificado no corpo de prova de impressão, conforme a figura 26.



Figura 26 – Medição do desgaste diametral do rebolo.

Assim, com o perfil obtido no programa de medição, pôde-se verificar o desgaste radial do rebolo e conseqüentemente o diametral, através da leitura da dimensão “a” na figura 27.

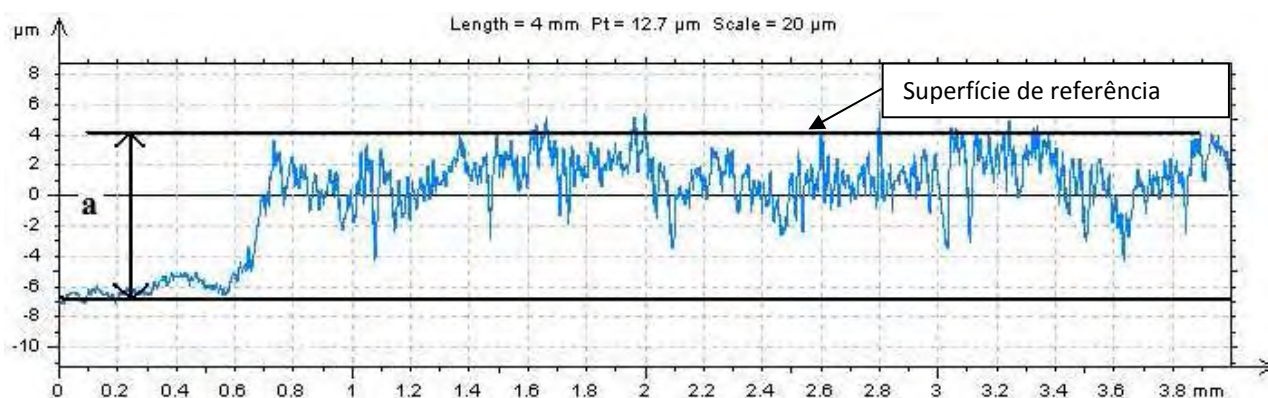


Figura 27 - Esquema da medição do desgaste do rebolo.

3.4.4 Preparação das amostras para análise de microdureza e metalografia

Após a realização de todos os ensaios, o último corpo de prova de cada ensaio foi usado para confeccionar as amostras para as análises metalográficas e microdureza. Para isto, o corpo de prova foi cortado numa máquina cut off. A figura 28 ilustra como foi cortado corpo de prova e a superfície que foi analisada.

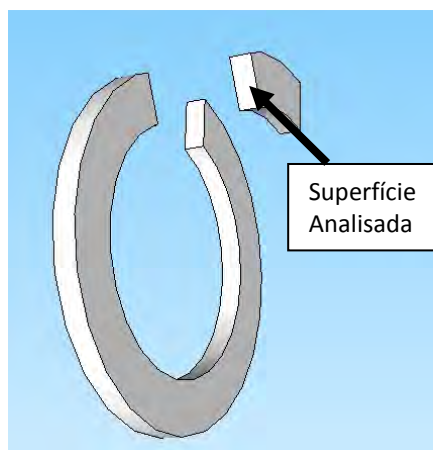


Figura 28 – Amostras para microdureza e metalografia.

O processo de corte destas peças foi efetuado vagarosamente e com fluido refrigerante para não causar danos térmicos ao corpo de prova. Após o corte, foi feito o embutimento das amostras cortadas em uma resina baquelite.

Posteriormente, foi feito o lixamento da amostra embutida na resina. Primeiramente, passou-se a lixa número 80, depois, na seqüência, a 120, 220, 320, 400, 500 e 600. Para isso, usou-se uma lixadeira manual.

Logo após o lixamento foi feito o polimento usando uma máquina politriz metalográfica com alumina de granulometria 1 μm .

3.4.5 Ensaios de microdureza e metalografia

Há dois tipos de microdureza, segundo o tipo de indentador (penetrador) utilizado: Vickers e Knoop. Neste trabalho escolheu-se a escala Knoop, pois segundo Ferreira (2004), a impressão Knoop é largamente utilizada em função de seu formato estreito. O indentador Knoop possibilita o trabalho em regiões finas ou no caso do presente trabalho mais próximas à superfície.

Para uma mesma carga, a profundidade da impressão Knoop é menor do que a metade da profundidade obtida com a impressão Vickers.

Para a obtenção da microdureza foi utilizado o microdurômetro da marca BUEHLER, modelo 1600-6300. O microdurômetro usado permitia além da leitura na escala Knoop (HK)

também os resultados em dureza Rockwell C (HR_C). A conversão feita pelo aparelho segue os critérios de conversão estabelecidos pela norma ASTM E140.

Realizaram-se aplicações de cargas de 100, 200 e 300g a fim de se definir a carga que melhor se adequaria aos ensaios. A carga de 100g proporcionou a melhor relação entre as medidas das diagonais, obedecendo-se à norma ASTM E384 que estabelece uma distância mínima entre as impressões.

As medições de microdureza foram realizadas a duas distâncias estabelecidas da superfície das amostras e também no centro da peça, provavelmente uma região não afetada pelas temperaturas relativas à retificação. Vale ressaltar que as medições em diferentes distâncias da superfície permitem identificar o comportamento da perda de dureza. As distâncias adotadas seguem os critérios da norma ASTM E384. Uma representação do esquema de medições de dureza é mostrada na figura 29.

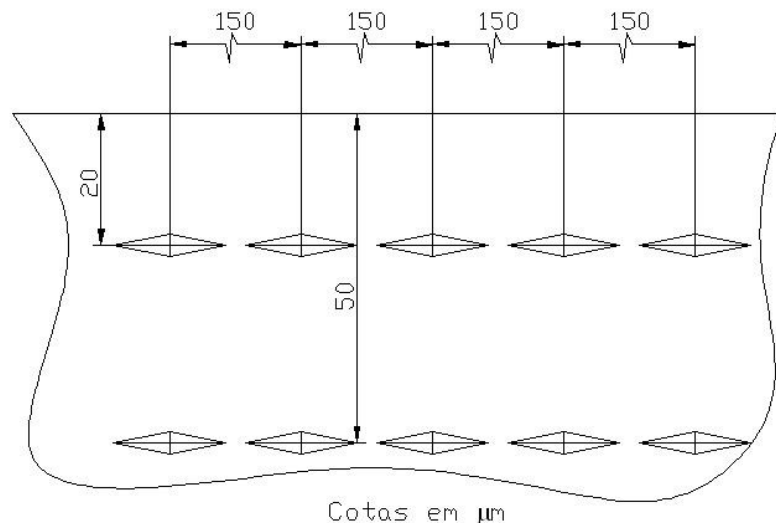


Figura 29 – Esquema de medição das microdurezas (espaçamentos recomendados segundo ASTM E384).

Para realizar as análises metalográficas foi utilizado o microscópio óptico, dotado de câmera e software para captura das imagens das amostras. Com o objetivo de melhorar o contraste para diferenciar os microconstituintes além das regiões afetadas termicamente pela retificação, as amostras foram atacadas quimicamente usando o reagente Nital 2% por 10 segundos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados, para cada condição de retificação realizada das variáveis de saída: rugosidade, circularidade, desgaste diametral além da microdureza e metalografia para verificação da integridade das superfícies retificadas.

Conforme descrito nos procedimentos experimentais, foram comparadas seis diferentes formas de lubri-refrigeração: Convencional (CO); MQL sem o sistema de limpeza (MQL); MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado a 30° em relação ao rebolo (MQL + 30°); MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado a 60° em relação ao rebolo (MQL + 60°); MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado a 90° em relação ao rebolo (MQL + 90°); e MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado tangente ao rebolo (MQL + tan).

O volume de cavaco removido em cada ensaio foi aproximadamente 3900 mm³ considerando três peças retificadas em cada ensaio. Para cada ensaio foram realizadas duas repetições.

A condição que usada como referência para as discussões foi convencional (CO) por ser a mais amplamente utilizada nas indústrias.

Os resultados para as variáveis analisadas estão dispostos em de gráficos de barra, contento a média das medições com seus respectivos intervalos de confiança calculados com 95% de confiabilidade segundo a distribuição Student. Adicionalmente são apresentados quadros usando a técnica estatística ANOVA.

4.1 RUGOSIDADE

A figura 30 apresenta os resultados obtidos para a rugosidade média R_a , referente à comparação entre as condições de lubri-refrigeração e as diferentes velocidades de avanço empregadas.

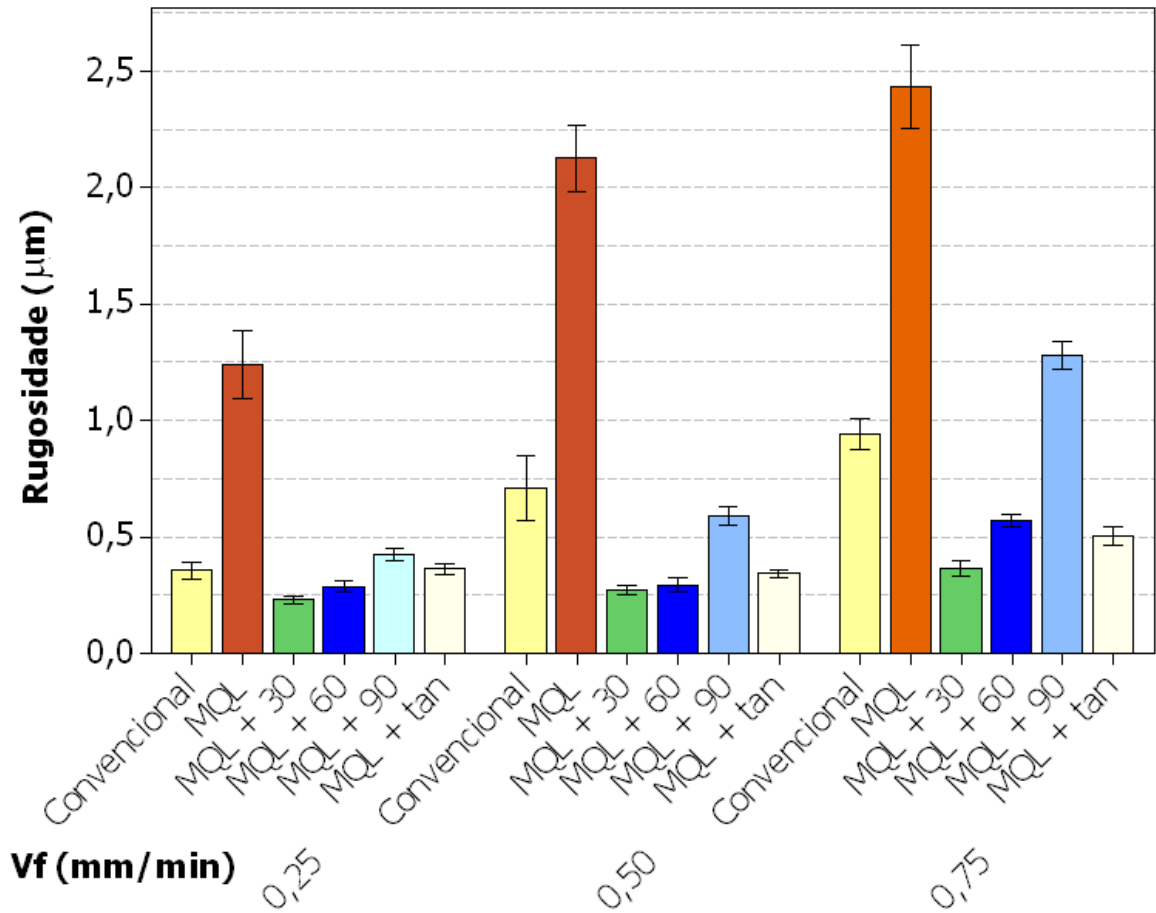


Figura 30 – Resultados de rugosidade.

O quadro ANOVA é apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Quadro ANOVA sobre os resultados de Rugosidade.

Fator de controle	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Teste F	Valor P
Vf	2	12,795	6,398	314,770	0,000
Lubri- refrigeração	5	84,335	16,867	829,870	0,000
Interação	10	8,660	0,866	42,610	0,000
Erro	252	5,122	0,020		
Total	269	110,913			

A interpretação do quadro ANOVA é realizada baseando-se no valor P (probabilidade). O intervalo de confiança adotado de 95% indica a probabilidade de 5% ($\alpha = 0,05$) de significância nas diferenças dos resultados, assim valores P menores que este

previamente estabelecido indica que a hipótese inicial de variâncias iguais para esses casos foi rejeitada, ou seja, os fatores utilizados (V_f e Condição de lubri-refrigeração) ocasionaram significativa variação na resposta dos resultados da rugosidade.

Assim, analisando os resultados, pode-se admitir que estes fatores influenciaram estatisticamente nas rugosidades obtidas.

Observando a figura 30, verifica-se que quando é utilizada a lubri-refrigeração com o sistema de limpeza do rebolo a rugosidade apresenta-se inferior ao MQL sem o sistema de limpeza.

Segundo Tawakoli *et al.* (2007), na lubri-refrigeração convencional a elevada quantidade de fluido também atua na retirada dos cavacos da zona de corte. Já quando é utilizada a técnica MQL a menor quantidade de fluido não é suficiente para remover os cavacos das porosidades do rebolo. Os cavacos alojados nas porosidades além de impedir a entrada do fluido de corte produzem um maior riscamento da superfície piorando assim a rugosidade da peça.

Contudo, quando se aplicou o jato de ar para limpeza do rebolo, os valores de rugosidade caíram substancialmente. Isto sugere que a piora da qualidade da peça quando se trocou do método de lubri-refrigeração convencional para MQL sem limpeza foi causado pelo entupimento dos poros do rebolo pelo cavaco.

Além do uso do jato se limpeza, o sistema projetado permitia o ajuste do ângulo de incidência, e os melhores resultados foram alcançados nos posicionamentos tangenciais; a 30° e a 60° nas três velocidades de mergulho empregadas: 0,25; 0,50 e 0,75 mm/min. A inclinação de 30° do bocal do jato de ar foi a condição que alcançou maior eficiência na limpeza do rebolo nas velocidades de 0,25 e 0,75 mm/min, gerando assim os menores valores de rugosidade. Já para a velocidade de mergulho de 0,50 mm/min as situações de limpeza MQL + 30° e MQL + 60° apresentam intervalos de confiança próximos, porém as duas situações apresentaram rugosidades inferiores aos outros métodos.

Para a velocidade de 0,25 mm/min, as condições de limpeza para um ângulo de incidência do jato de ar de 60° e também tangente, apresentaram bons resultados, pois tais resultados ficaram equivalentes aos da rugosidade obtida com o uso de fluido em abundância (convencional) e muito abaixo do resultado com o uso do MQL sem limpeza.

Ainda na velocidade de 0,25 mm/min a redução da rugosidade na melhor situação de limpeza MQL + 30° (0,23 R_a) foi de 36% se comparada ao método convencional (0,36 R_a), e 82% se comparado ao MQL (1,24 R_a).

Nota-se que para as velocidades maiores a redução da rugosidade cresce percentualmente: na velocidade de 0,50 mm/min a redução de rugosidade na melhor situação de limpeza, MQL + 30° (0,27 R_a), foi de 61% se comparada ao método convencional (0,71 R_a), e 87% se comparado ao MQL (2,13 R_a).

A redução de rugosidade na velocidade de 0,75 mm/min na situação de limpeza, MQL + 30° (0,36 R_a), foi de 63% se comparada ao método convencional (0,99 R_a), e 85% se comparado ao MQL (2,43 R_a). Salienta-se que a rugosidade obtida no sistema MQL + 30° é equivalente ao obtido na lubri-refrigeração convencional a velocidade de avanço $V_f = 0,25$ mm/min.

Com o aumento da velocidade de avanço, é natural que a situação de corte fique mais severa, agravando os processos de entupimento. Heinzl & Bleil (2007) equacionaram a espessura equivalente de corte em função da taxa de remoção específica e esta é aumentada junto com a ampliação da velocidade de avanço.

Uma maior espessura equivalente gerada cerca de 0,071 μ m na velocidade de 0,75mm/min ocasionou um cavaco maior comparado às outras velocidades de avanço (0,024 μ m na v_f 0,25mm/min e 0,047 μ m na v_f 0,50mm/min); assim quando é utilizado o sistema de limpeza o maior cavaco é removido mais facilmente, proporcionando um melhor desempenho do sistema de limpeza em maiores velocidades.

4.2 CIRCULARIDADE

A figura 31 apresenta os resultados obtidos para o desvio de circularidade em μ m, referente à comparação entre as condições de lubri-refrigeração e as diferentes velocidades de avanço empregadas.

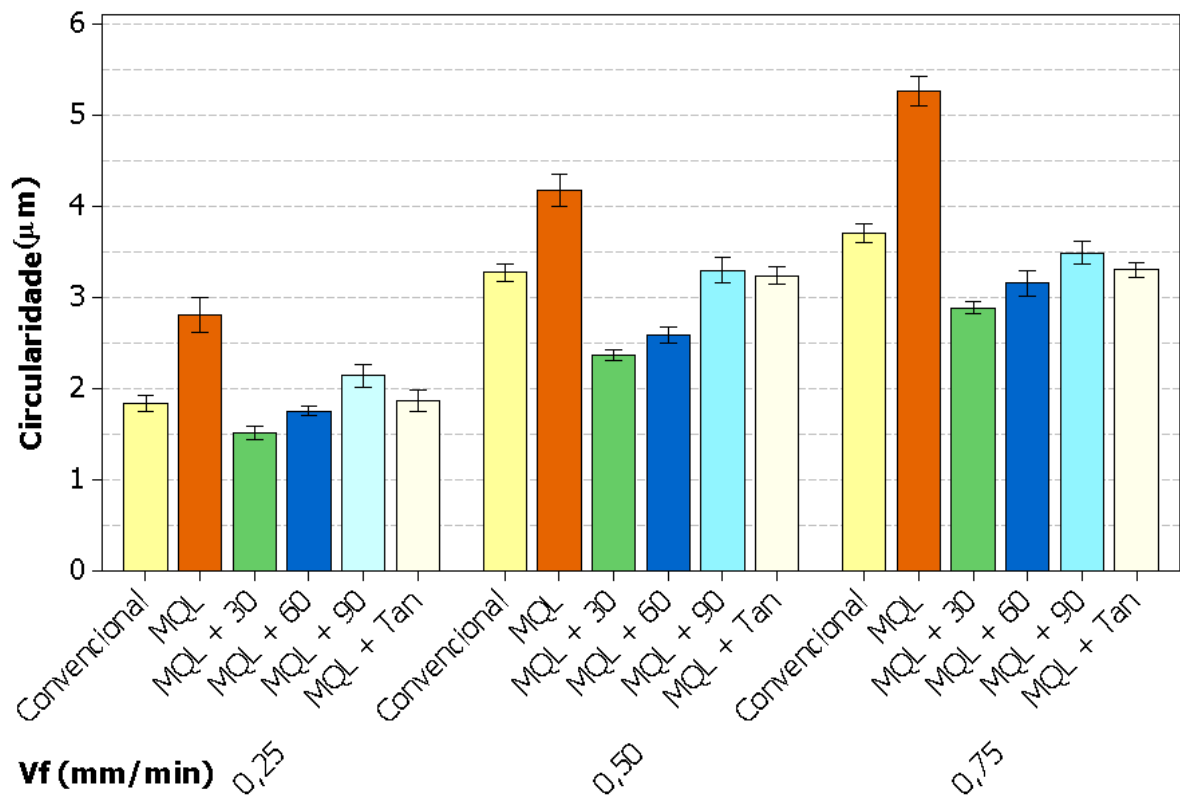


Figura 31 – Resultados de circularidade.

O quadro ANOVA é apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Quadro ANOVA sobre os resultados de Circularidade.

Fator de controle	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Teste F	Valor P
Vf	2	129,101	64,550	1436,750	0,000
Lubri- refrigeração	5	89,672	17,934	399,180	0,000
Interação	10	9,788	0,979	21,790	0,000
Erro	252	11,322	0,045		
Total	269	239,883			

De maneira semelhante aos resultados de rugosidade, considerando os fatores V_f e lubri-refrigeração, os valores P encontrados pela ANOVA indicam que existem diferenças estatísticas para os resultados encontrados.

Analisando a figura 31, a menor circularidade obtida para a velocidade de 0,25 mm/min foi o MQL mais limpeza para um ângulo de 30°. Para as velocidades de 0,5 e 0,75 mm/min, as menores circularidades também ocorreram nesta configuração de lubri-refrigeração.

Assim como nos resultados de rugosidade, ocorreram variações nos resultados de circularidade com a variação da velocidade de mergulho.

Embora o desempenho da lubri-refrigeração MQL+30°, também seja melhor que o convencional e MQL, a redução do erro de circularidade com esta técnica manteve-se praticamente constante para as diferentes velocidades: em torno de 20%, comparada ao convencional, e em torno de 40%, comparada ao MQL. Isso pelo fato que mesmo apresentado desempenho similar ao da rugosidade, a circularidade é uma grandeza mais sensível à rigidez do processo, ou seja, máquina, ferramenta, peça, entre outros.

Os valores de circularidades obtidos para a lubri-refrigeração MQL+30°, encontram-se inferiores a 3 μm e o máximo erro de circularidade ocorreu com a lubri-refrigeração MQL sem sistema de limpeza à velocidade de mergulho de 0,75mm/min.

Segundo Moerlein *et al.* (2009), a precisão de uma peça usinada na retificação depende de alguns fatores, tais como: a precisão do equipamento, a magnitude de desgaste do rebolo, rigidez do conjunto máquina/peça/ferramenta/sistema de fixação, a taxa de remoção do material e energia específica.

Assim maiores velocidades de avanço ocasionam maiores taxas de remoção de material e espessuras equivalentes de corte, fato que eleva os esforços de corte e conseqüentemente altera a rigidez do processo.

Os valores de desvio de circularidade encontrados em todas as situações de lubri-refrigeração propostas apresentam-se compatíveis com as qualidades de trabalho IT3 e IT4 recomendadas para montagem de rolamentos de precisão segundo um fabricante de rolamentos (NSK. 2011) (AGOSTINHO, *et al.*1997).

4.3 DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO

A figura 32 mostra os resultados obtidos para o desgaste diametral do rebolo. Para a medição do desgaste do rebolo não foram feitas repetições.

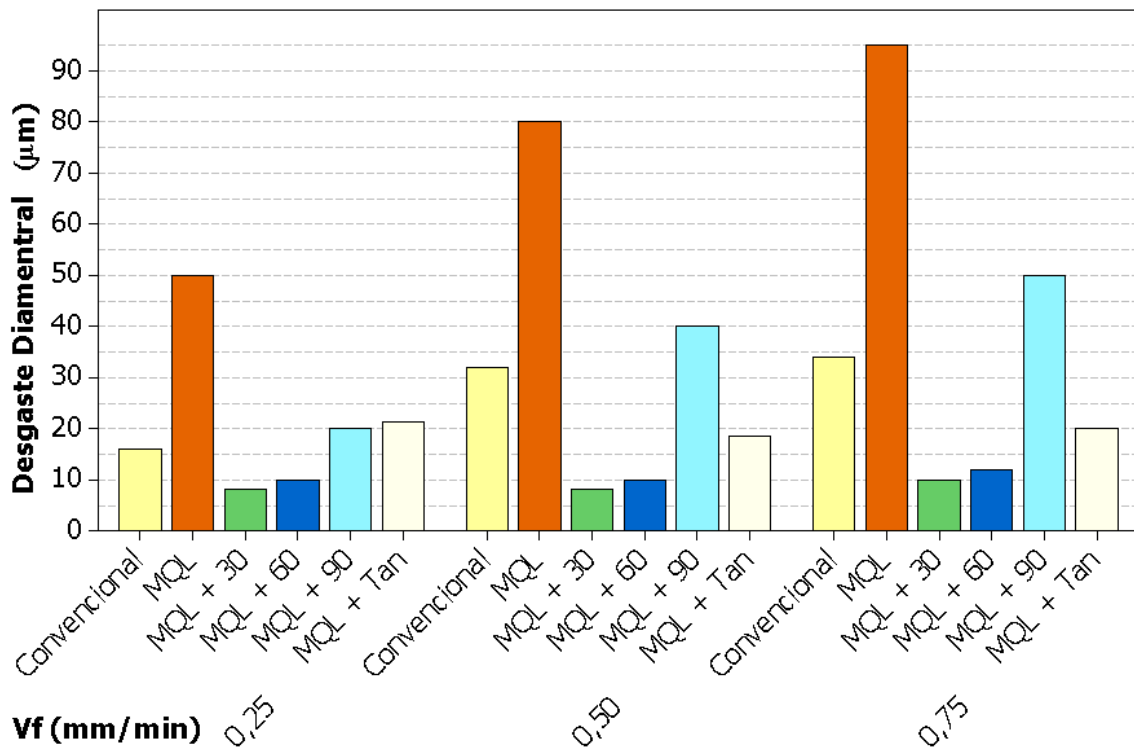


Figura 32 – Resultados de desgaste diametral do rebolo.

Inicialmente é importante salientar que a velocidade periférica empregada 30m/s, foi limitada pelas características construtivas da máquina disponível para os ensaios.

Segundo Oliveira *et al.*(2009), as velocidades de corte consideradas baixas para o rebolo de CBN encontram-se na faixa de 40–80 m/s. Porém a maior parte das aplicações dos rebolos de CBN ocorre em velocidades superiores à 100m/s chegando até a velocidade de 200 m/s.

Em baixas velocidades periféricas o desempenho do rebolo de CBN é inferior já que em maiores velocidades de corte sua dureza dinâmica é maior.

A limitação de velocidade de corte presente nos ensaios contribuiu para que o desgaste de tal ferramenta se apresente mais acentuado, contudo se comparadas as situações de lubri-refrigeração propostas, o novo método de lubri-refrigeração apresentado mostra resultados interessantes comparados aos outros métodos de lubri-refrigeração utilizados.

Na figura 32, para as três velocidades de mergulho, o MQL + 30° apresentou menores valores de desgaste diametral do rebolo.

Esta condição foi a que propiciou menores valores de rugosidade e circularidade da peça e, portanto, mais eficiência na limpeza do rebolo. É interessante notar que, no processo de limpeza, o jato de ar não remove partículas do rebolo consigo, pelo contrário, preserva o rebolo contra um desgaste mais acentuado. A presença de cavacos nos poros incentivou o desgaste do rebolo, já que as condições de maior desgaste diametral do rebolo foram as que apresentaram maiores valores de rugosidade e circularidade da peça (MQL sem limpeza e MQL com jato de ar perpendicular ao rebolo).

Silva *et al.* (2007), citam que o aumento da lubrificação proporcionado pelo fluido de corte, resulta na diminuição do desgaste do rebolo através da redução do atrito grão-peça e do atrito cavaco, permitindo que os grãos abrasivos permaneçam por mais tempo unidos ao ligante ocasionando menor desgaste do rebolo.

Também se verifica que, com o aumento da velocidade de mergulho, a espessura equivalente de corte cresce o que aumenta o desgaste diametral do rebolo (CHOI *et al.* 2008).

Nota-se que para a velocidade de 0,50 mm/min obteve-se o melhor desempenho da lubri-refrigeração MQL + 30°, a redução foi de 75% comparada ao método convencional e 90% se comparada ao MQL. Para as outras velocidades a redução do desgaste também superou 70%.

4.4 ANÁLISE DA INTEGRIDADE DAS SUPERFÍCIES RETIFICADAS

Análises metalográficas comparativas e medições de microdureza foram realizadas com o intuito de verificar a ocorrência de danos térmicos.

Nesta etapa das análises prepararam-se apenas amostras de três condições de lubri-refrigeração: Convencional (CO); MQL sem o sistema de limpeza (MQL); MQL mais sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado a 30° em relação ao rebolo (MQL + 30°). As outras condições foram descartadas já que o melhor ângulo de incidência do jato de ar foi de 30°.

4.4.1 ANÁLISES METALGRÁFICAS

A fim de comparar as microestruturas e verificar a ocorrência de danos térmicos, realizaram-se análises metalográficas com ampliação de 500x em secções transversais dos corpos de prova.

Quando a superfície da peça sendo retificada é exposta a altas temperaturas e tempo suficiente alterações microestruturais podem ocorrer. E nesse aspecto as condições de lubri-refrigeração junto com o material da ferramenta exercem papel de fundamental importância no controle das temperaturas e dissipação do calor.

Conforme exposto na revisão bibliográfica a não visualização de defeitos à olho nu, não isenta a peça de apresentar danos térmicos. Nesse aspecto a análise metalográfica permite visualizar as alterações microestruturais que ocorreram.

Conforme pôde ser visto na figura 14, a camada branca apresenta uma microestrutura diferente da matriz, formada através de uma austenitização e transformação durante a retificação; já a camada escura tem a mesma microestrutura, porém a alteração na tonalidade indica que ocorreu naquela região um novo revenimento durante a usinagem, ocasionando uma diminuição da dureza.

A figura 33 demonstra a metalografia da superfície da peça antes do processo de retificação.

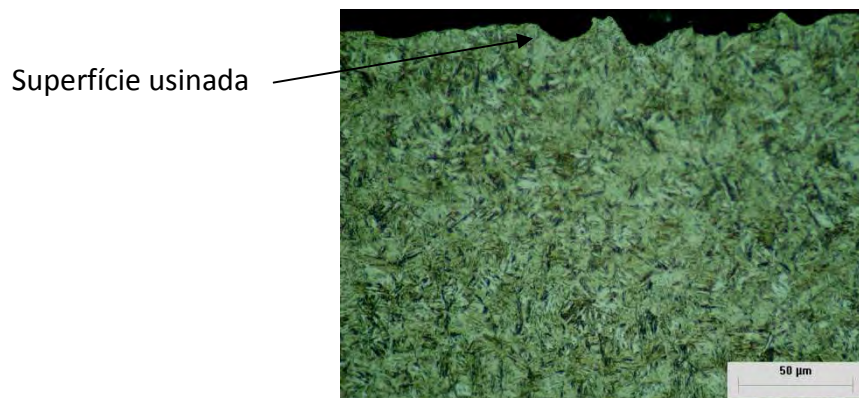


Figura 33 – Metalografia da peça temperada antes da retificação.

Analisando-se a figura 33, é possível verificar a microestrutura apresentada pelo aço ABNT 4340 temperado e revenido é homogênea considerando a superfície usinada e o núcleo.

As figuras 34, 35 e 36 apresentam as metalografias dos corpos de prova nas condições: convencional; MQL e MQL+ 30°, para as três velocidades de mergulho empregadas.

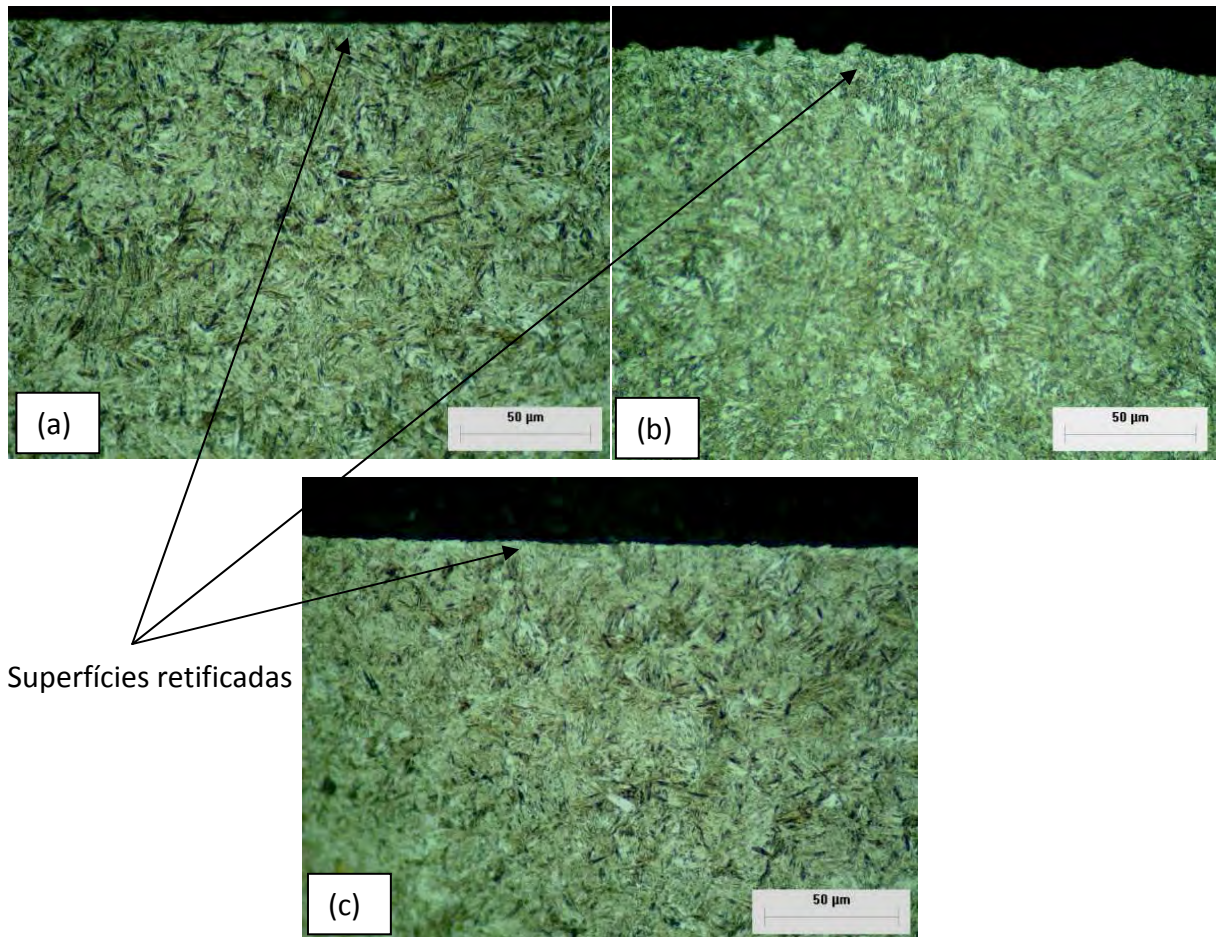


Figura 34 - Metalografias das peças retificadas com $v_f = 0,25 \text{ mm/min}$: (a) convencional; (b) MQL e (c) MQL+ 30°.

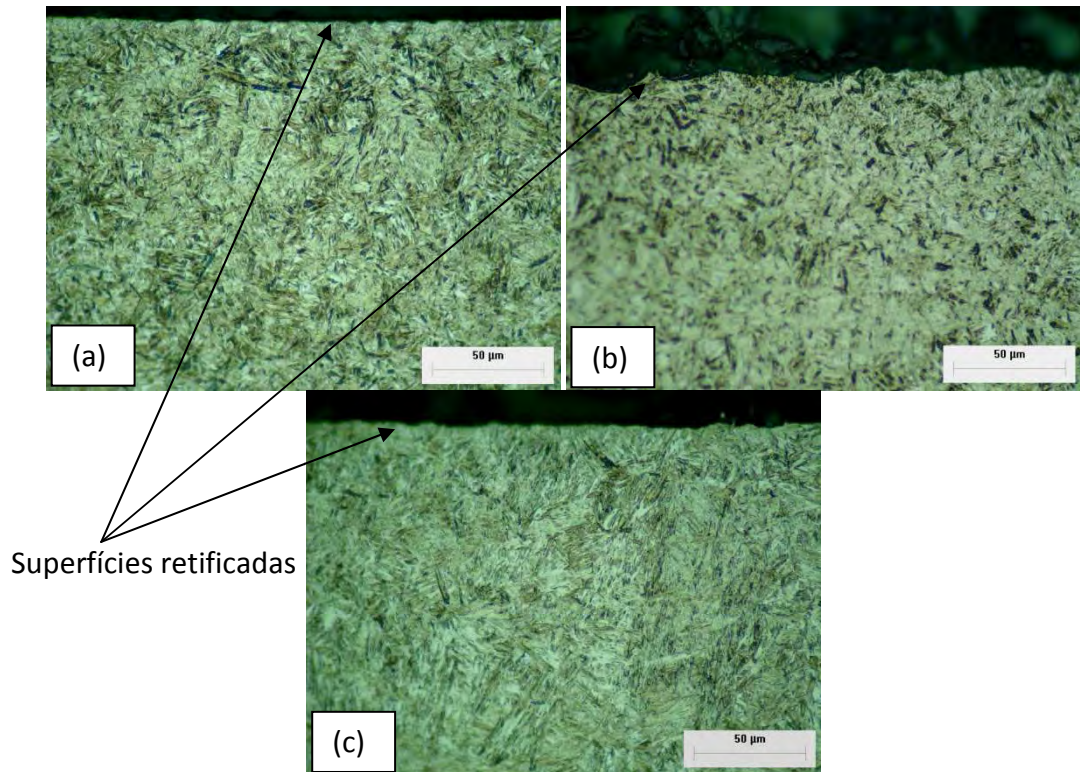


Figura 35 - Metalografias das peças retificadas com $v_f = 0,50$ mm/min: (a) convencional; (b) MQL e (c) MQL+ 30°.

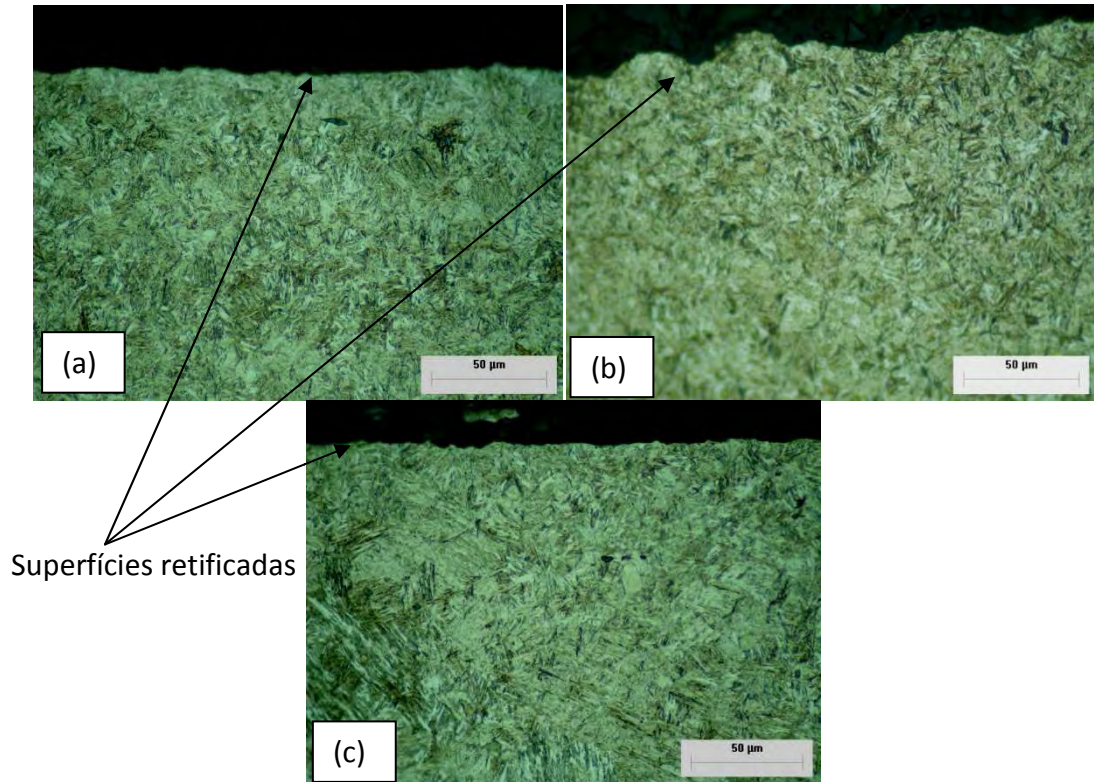


Figura 36 - Metalografias das peças retificadas com $v_f = 0,75$ mm/min: (a) convencional; (b) MQL e (c) MQL+ 30°.

Comparando-se as superfícies das peças retificadas (figuras 34, 35, 36) e a superfície da peça apenas temperada (figura 33) a microestrutura apresenta-se inalterada nas regiões mais próximas à superfície retificada.

Verifica-se que não ocorreram transformações microestruturais como as vistas na figura 14, isto é, não há formação de camada branca e camada escura em nenhuma das superfícies após a retificação.

Na análise das metalografias verifica-se que todas as condições de lubri-refrigeração propostas permitiram condições de temperatura que impediram os fenômenos de alterações microestruturais, e isso só foi possível graças ao uso do rebolo de CBN.

Segundo Marinescu *et al.*(2007) o rebolo de CBN possui alta condutividade térmica (até 1300° W/m.k) e esta propriedade contribui muito para a dissipação do calor da região de corte e conseqüentemente a redução da incidência de danos térmicos.

Como importante fator na preservação das microestruturas para as condições adotadas nos ensaios, a alta condutividade do rebolo de CBN removeu o calor em um intervalo de tempo inferior ao necessário para ocasionar as alterações microestruturais, garantindo assim a integridade da microestrutura superficial durante o processo de retificação.

4.4.2 MICRODUREZA

As medições de microdureza complementam os resultados das metalografia, comprovando através de uma variável quantitativa a isenção de danos térmicos.

As medições de microdureza foram convertidas para a escala Rockwell C por ser amplamente utilizada, e apresentar maior facilidade de compreensão dos resultados. Conforme foi descrito na seção 3.4.5 realizaram-se três linhas de medição: à 20µm da superfície; 50µm da superfície e no núcleo da peça 5 mm da superfície.

A figura 37 demonstra a microdureza da superfície da peça antes do processo de retificação.

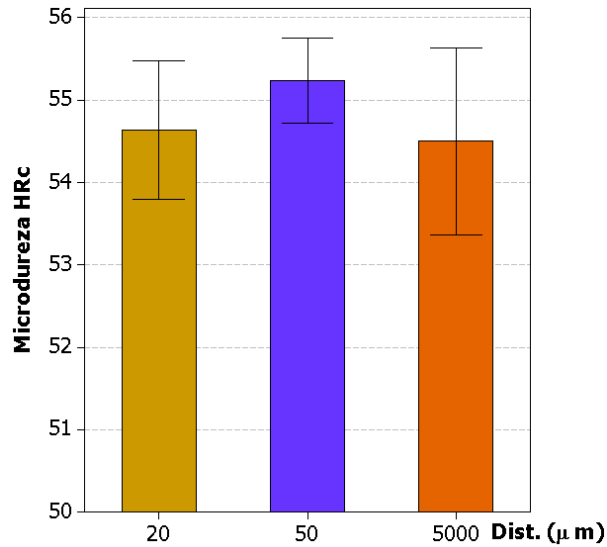


Figura 37 – Resultados de microdureza para a não retificada.

Nota-se pela análise da figura 37 que a microdureza média e os intervalos de confiança apresentados estão dentro da tolerância especificada pela empresa que realizou o tratamento térmico das peças $54 \pm 2HR_c$

As figuras 38, 39 e 40, demonstram os resultados de microdureza obtidos para as superfícies das peças retificadas nas condições de lubri-refrigeração: convencional; MQL e MQL + 30° respectivamente.

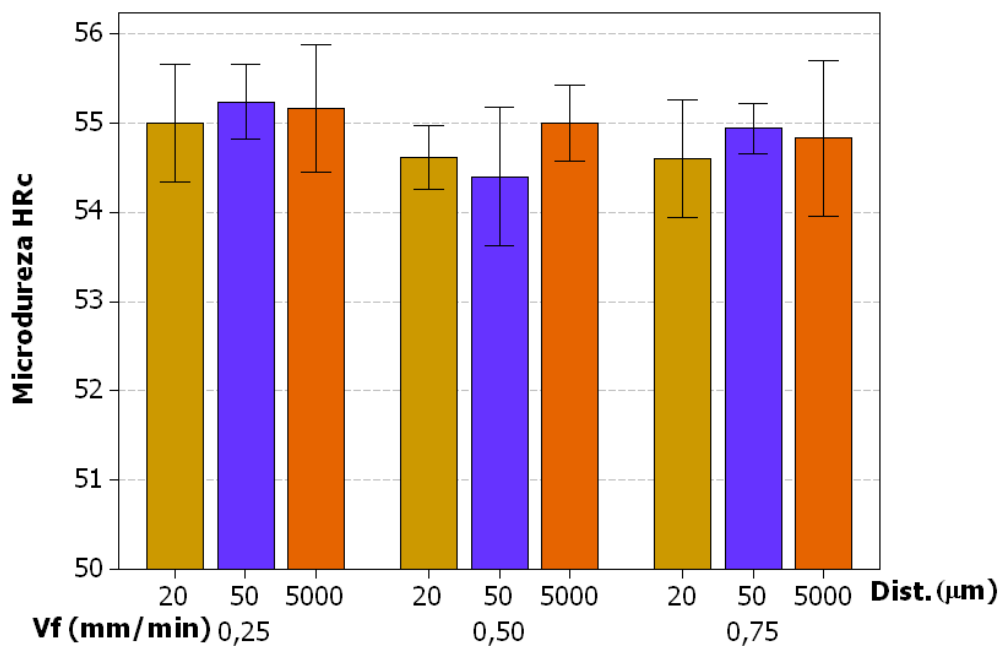


Figura 38 – Resultados de microdureza para a lubri-refrigeração convencional.

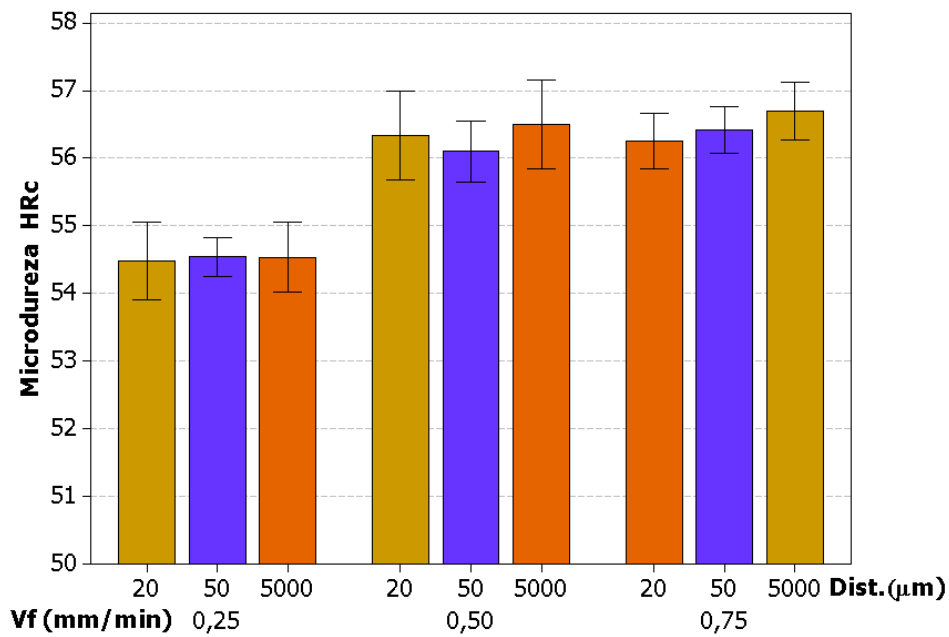


Figura 39 – Resultados de microdureza para a lubri-refrigeração MQL.

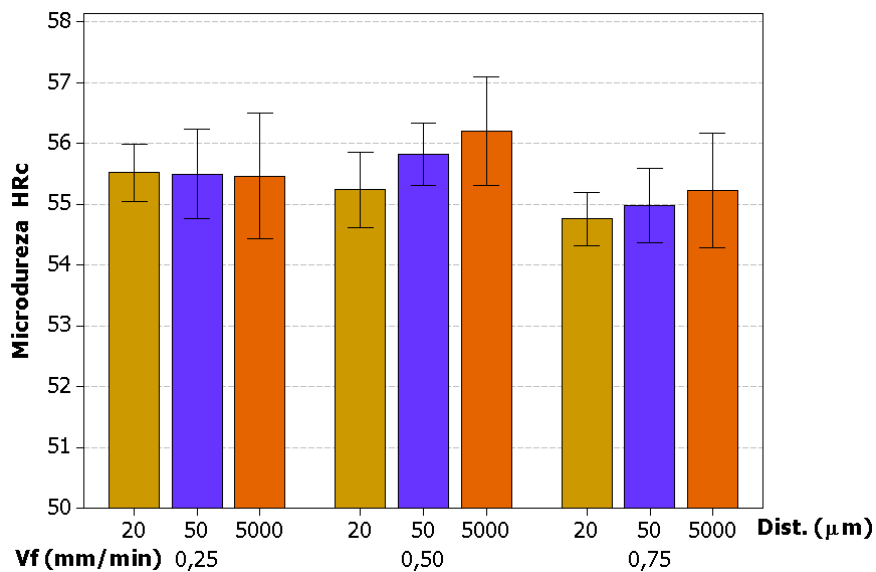


Figura 40 – Resultados de microdureza para a lubri-refrigeração MQL + 30°.

A análise das figuras 38, 39 e 40 permite concluir que nas condições de lubri-refrigeração utilizadas, não houve perda de dureza por causa das temperaturas de retificação. O rebolo de CBN empregado proporcionou uma maior dissipação do calor da região de corte reduzindo assim: as temperaturas do processo, e conseqüentemente a incidência dos danos térmicos (GUO *et al.* 2007).

Como o dano térmico é caracterizado por alguma alteração na microestrutura do material, diferentes microestruturas apresentam diferentes propriedades mecânicas.

Para medições realizadas não foram constatadas variações significativas nas leituras de microdureza, pode-se então, considerar que não ocorreram danos térmicos.

Nota-se que mesmo na lubri-refrigeração MQL onde a quantidade de lubrificante é menor a alta condutividade térmica do rebolo de CBN permitiu maior dissipação do calor.

As diferentes leituras encontradas nas diferentes velocidades de avanço se devem ao fato de se tratarem de peças diferentes e a dispersão encontrada em todos os resultados obtidos é típica de medições de microdureza e, portanto atende as tolerâncias especificadas nos projetos.

5. CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados, pode-se concluir que:

- ✓ O uso da técnica de lubri-refrigeração MQL associada a um jato de ar comprimido para limpeza da superfície de corte do rebolo com ângulo de incidência de 30 graus propiciou limpeza eficiente do rebolo e com isto, melhores resultados em todas as variáveis analisadas, quando comparados à lubri-refrigeração convencional e especialmente o MQL sem o uso de jato de ar.
- ✓ Com a variação da velocidade de mergulho o desempenho superior desta condição se manteve, evidenciando que o uso do MQL com o jato de limpeza na incidência adequada possibilita aumentar os parâmetros de corte, reduzindo os tempos de usinagem, mas mantendo os mesmos padrões de qualidade obtidos no método convencional.
- ✓ A drástica redução da quantidade de fluido alcançada, a melhoria da rugosidade e circularidade, e a diminuição do desgaste do rebolo, com o uso desta técnica, indicam que este aprimoramento das condições de lubri-refrigeração na retificação pode reduzir os insumos e os impactos ambientais e à saúde dos trabalhadores, tornando este processo de fabricação mais limpo, rápido e econômico.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de reforçar as evidências do aprimoramento da lubri-refrigeração MQL e permitir sua utilização dentro das indústrias algumas sugestões são apresentadas:

- ✓ Verificar o comportamento do MQL mais sistema de limpeza utilizando abrasivos convencionais usados para retificação de aços;
- ✓ Verificar o desempenho do método proposto na retificação em altas velocidades de corte;
- ✓ Investigar se a técnica proposta apresenta bons resultados em diferentes tipos de materiais como cerâmicas, compósitos e ligas de titânio;
- ✓ Verificar se o meio de lubri-refrigeração proposto apresenta também um bom desempenho em outras variações de processos de retificação como: a retificação interna, a retificação centerless e a retificação plana.
- ✓ Utilizar menores vazões de óleo no sistema MQL;
- ✓ Estimar o ganho financeiro com a redução do uso dos fluidos convencionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. 5ª. ed. Edgard Blücher Ltda, 1997.

ALFARES, M., ELSHARKAWY, A. **Effect of grinding forces on the vibration of grinding machine spindle system**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40p. 2003–2030, 2009.

ALVES, M. C. S. **Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN**. 2007. 175f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - UNESP, Bauru, 2007.

ANDERSON, D., WARKENTIN, A., BAUER, R. **Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding**. Journal of materials processing technology, 204, p. 269-278, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E140 **Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness**. 21 p. Disponível em <<http://www.astm.org/>>. Acesso em janeiro de 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM E384 **Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials** .42 p. Disponível em <<http://www.astm.org/>> Acesso em janeiro de 2011.

ATTANASIO, A., GELFI, M., GIARDINI, C., REMINO, C. **Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear**. Wear, 260, p.333–338, 2006.

AURICH, J. C.;HERZENSTIEL, P.; SUDERMANN, H.;MAGG, T.**High -performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern**.CIRPAnnals - Manufacturing Technology. Vol. 57, p.357-362, 2008.

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

BARTZ, W.J. **Lubricants and the environment,** Tribology International, 31, p. 35–47, 1998.

BERTALAN, C. **Retificação com Rebolos de Nitreto de Boro Cúbico em Máquinas-Ferramentas Convencionais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFSC, Florianópolis, 1997.

BIGERELLE, M.;HAGEGE, B.;EL MANSORI,M. **Mechanical modeling of micro-scale abrasion in superfinish belt grinding.** Tribology Internacional, Vol. 41, p. 992-1001, 2008.

BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. **Friction, Cooling and Lubrication in Grinding.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 48, p. 581-598, 1999.

BYRNE, G., SCHOLTA, E. **Environmentally clean machining processes—a strategic approach.** CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 42, p. 471–474, 1993.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction.** 8. ed. Nova York: Ed. John Wiley & Sons. Inc, 2010.

CAMARGO, J. A. A.; FERNANDES, U. B.; DINIZ, A. E.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; CANARIM, R. C. **Analysis of the Influence of Sparkout.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. XXXI, p. 47-51, 2009.

CAMERON, A.; BAUER, R.; WARKENTIN, A. **An investigation of the effects of wheel cleaning parameters in creep-feed grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, V. 50, p. 126-130, 2010.

CHOI, T.J.; SUBRAHMANYA, N.; LI, H.; SHIN Y.C. **Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.48, p. 61–72, 2008.

DEMETER, E.C.; HOCKENBERGER, M.J. **The application of tool path compensation for the reduction of clamping-induced geometric error.** International Journal of Production Research, v.12, p. 35, 1997.

DEMIRCI, I.; MEZGHANI, S.; MANSORI, N. E. **On Material Removal Regimes for the Shaping of Glass Edges: Force Analysis, Surface Topography and Damage Mechanisms.** Springer Science-Business Media, LLC 2008.

DHAR, N.; ISLAM, S.; KAMRUZZAMAN, M. **Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness in Turning AISI-4340 Steel.** Journal of Materials Processing Technology, 172, p. 299-304, 2006.

DINESHI, G., THAKUR, B., RAMAMOORTHY, L., VIJAYARAGHAVAN, **Investigation and optimization of lubrication parameters in high speed turning of superalloy Inconel 718,** Int Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 50, p. 471–478, 2010.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** Artiliber Editora Ltda., Campinas, SP, Brasil, 6ª Edição, 2008.

EBBRELL, S.; WOOLLEY, N.H.; TRIDIMAS, Y.D.; ALLANSON, D.R.; ROWE, W.B. **Effects of cutting fluid application methods on the grinding process.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v.40, p. 209–223, 2000.

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

- FRATILA, D.; CAIZAR, C. **Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3**. Journal of Cleaner Production, v.19, p.640–645, 2011.
- FUJITA, H. **Retificação da alumina com rebolo diamantado usando diferentes métodos de lubri-refrigeração**. Dissertação de Mestrado - UNESP, Bauru, 2007.
- FUSSE, R.Y.; FRANÇA, T.V.; CATAI, R.E.; SILVA, L.R.; AGUIAR, P.R.; BIANCHI, E.C. **Analysis of the cutting fluid influence on the deep grinding process with a CBN grinding wheel**. Materials Research, São Carlos - SP, v. 7, n. 3, p. 451-457, 2004.
- GONÇALVES, P.S.C. **Boas práticas ambientais na utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem**. Dissertação de Mestrado - UNESP, Bauru, 2008.
- GRAF, W. **Cylindrical Grinding**. WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 87p., 2004.
- GUO, C.; MALKIN, S. **Energy Partition and Cooling During Grinding**. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 2/No. 3, 2000.
- GUO, C.; SHI, Z.; ATTIA, H.; MCINTOSH, D. **Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated CBN Wheels**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 56, p.343-346, 2007.
- HAFENBRAEDL, D.; MALKIN, S. **Tecnologia ambientalmente correta para retificação cilíndrica interna**. Revista Máquinas & Metais, Vol. 37, nº 426, p. 40-55, julho 2001.
- HASSUI, A.; DINIZ, A.E.; OLIVEIRA, J.F.G.; FELIPE, J.; GOMES J.J.F. **Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission**. Wear, v. 217, p. 7-14, 1998.
- HEINZEL, C.; BLEIL, N. **The Use of the Size Effect in Grinding for Work-hardening**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, v. 56, p. 327-330, 2007.

HEISEL, U.; LUTZ, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. **The Minimum Quantity Lubricant technique and its application in the cutting process.** Machines and metals magazine, Brazil, No.386, Febr., 1998, p. 22-38.

HECKER, R.L., LIANG, S.Y., WU, X.J.; **Grinding force and power modeling based on chip thickness Analysis.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.33, p.449-459, 2007.

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

HOLESOVSKY, F.; HRALA, M. **Integrity of ground cylindrical surface.** Journal of Materials Processing Technology, v. 153-154, 10, p. 714-721, 2004.

HONG, S.Y.; BROOMER, M. **Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel.** Clean Products Process, 2, p. 157–166, 2000.

HOWELL, J.K.; LUCKE, W.E.; WHITE, E.M. **Health and Safety Aspects in the Use of Metalworking Fluids,** by Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

HOWES, T.; MINDEK R. **Creep-Feed Exam.** Cutting Tool Engineering, v. 48, p.73-80, 1996.

HWANG, T. W.; EVANS, C. J.; MALKIN, S. **An Investigation of High Speed Grinding with Electroplated Diamond Wheels.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 49, p. 245-248, 2000.

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

JACKSON, M.J.; DAVIS, C.J.; HITCHINER, M.P.; MILLS, B. **High-speed grinding with CBN grinding wheels applications and future technology.** Journal of Materials Processing Technology, 110, p. 78-88, 2001.

JACKSON, M.J.; KHANGAR, A.; CHENC, X.; ROBINSON, G.M.; VENKATESH, V.C.; DAHOTRE N.B. **Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels.** Journal of Materials Processing Technology, 185, p.17-23, 2007.

JEDRZEJEWSKI J.; MODRZYCKI W. **Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools.** Proc. 32nd Int. MATADOR Conf, Manchester, UK, 1997.

KING, R. I.; HAHN, R. S. **Handbook of modern technology.**3a Ed., 1992.

KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLÄTTER, G.; LUNG, D. **Minimal quantity lubrication (MQL): motivation, fundamentals.** In: 12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrication, Technische Akademie Esslingen, 14p. 2000.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping**1.ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

KRAMER, N. **In-Process Identification of Material-Properties by Acoustic Emission Signals.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.56, p. 331-334, 2007.

KRUEGER, M.K.; YOON, S.C.; GONG, D. **New Technology in Metalworking Fluids and Grinding Wheels Achieves Tenfold Improvement in Grinding Performance.** Presented at the Coolants/Lubricants for Metal Cutting and Grinding Conference, 2000.

LEE, S.W.; LEE, Y.C.; JEOND, H.D.; CHOI, H.Z. **The effect of high pressure air jet on form accuracy in slot grinding.** Journal of Materials Processing Technology, 128, p.67-72, 2002.

LIAO, Y. S.; LUO, S. Y.; YANG, T. H. **A thermal model of the wet grinding process.** Journal of Materials Processing Technology, v. 101, p. 137-145, 2000.

MACHADO, A. R., DINIZ, A. E., **Advantages and disadvantages of the use of the cutting fluids.** Machining Congress 2000, São Paulo, SP, Brazil, 2000.

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

MALKIN, S.; GUO, C. **Thermal Analysis of Grinding** - CIRP Annals – Manufacturing Technology, v.56, p. 760-782, 2007.

MAYER, J. E.; FANG G. P. **Diamond grinding of silicon nitride ceramic.** Machining of advanced ceramics Conf. NIST, p. 171-183, 1993.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels** 1.ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining processes.** 1.ed. Norwich, William Andrew Inc, 2004.

MARINESCU, I.; TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. **Handbook of Ceramic Grinding and Polishing,** New Jersey. Noyes Publications, Cap.2, 1998.

MIN. S.; INASAKI, I.; FUJIMURA, S.; WADA, T.; SUDA, S.; WAKABAYASHI, T. **A Study on Tribology in Minimal Quantity Lubrication Cutting.** CIRP Annals – Manufacturing Technology, v. 54, p. 105-108, 2005.

MOERLEIN, A. W.; MARSH, E. R.; DEAKYNE T. R. S.; VALLANCE, R.R. **In-process force measurement for diameter control in precision cylindrical grinding.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 42, p. 93-101, 2009.

NGUYEN, T.A.; BUTLER, D.L. **Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.45, p. 1321–1328, 2005.

NSK ROLAMENTOS. **CatologoGeral**, 2011.

OBIKAWA, T.; KAMATA, Y.; SHINOZUKA, J. **High-speed grooving with applying MQL,** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 46, p. 1854–1861, 2006.

OLIVEIRA, J.F.G.; SILVA, E.J.; GUO, C.; HASHIMOTO, F. **Industrial Challenges in Grinding.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.58, p. 663–680, 2009.

PADILHA, A.F.; FILHO, F.A. **Técnicas de Análise Microestrutural.** 1 ed. HEMUS 2004.

PAWLAK, Z.; KLAMECKI, E.B.; RAUCKYTE, T.; SHPENKPV, P.G.; KOKOWSKI, A. **The Tribochemical and Micellar Aspects of Cutting Fluids.** Tribology International, 38, 1, 2004.

RAMESH, K.; HUANG, H. **The Effects of Grinding Wheel Speed on Burr Creation and Surface Quality,** Machining Technology Group, Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapore, 2003.

RAMESH, K.; YEO, S.H.; ZHONG, Z.W.; SLIM, K.C. **Coolant shoe development for high efficient grinding.** Journal of material process technology, 114, p.240-245, 2001.

REN, Y.H.; ZHANG, B.; ZHOU, Z.X. **Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.58, p. 299–302, 2009.

SADEGHI, M.H.; HADDAD M.J.; TAWAKOLI T.; EMAMI M. **Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–6Al–4V titanium alloy.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.44, p. 487–500, 2009.

SANCHEZ, J.A.; POMBO, I.; ALBERDI, R.; IZQUIERDO, B.; ORTEGA, N.; PLAZA, S.; MARTINEZ-TOLEDANO, J. **Machining evaluation of a hybrid MQL-CO2 grinding technology.** Journal of Cleaner Production 18, p. 1840 – 1849, 2010.

SALMON, S. C. **Modern Grinding Process Technology.** McGraw-Hill, 1992.

SHAW, M.C. **Energy Conversion in Cutting and Grinding.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.45, p. 101-104, 1996.

SHILLOR, M., BABER, G.C, JEN, T., WI, M.; **Thermal Analysis of the Grinding.** Process, Mathematical and Computer Modeling, 39, p. 991-1003, 2004.

SILVA, L.R.; BIANCHI, E.C.; FUSSE, R.Y.; CATAI, R.E.; FRANC, T.V.; AGUIAR, P.R. **Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant –MQL in grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 47, p. 412–418, 2007.

SINOT, O.; CHEVRIER, P.; PADILLA, P. **Experimental simulation of the efficiency of high speed grinding wheel cleaning.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 46, p.170–175, 2006.

SKERLOS, S.; HAYES, K. **Vegetable-based Cutting Fluids: A New Dimension in Research.**2003.

SOARES, D.D.; OLIVEIRA, J.F.G. **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais.** Revista Máquinas e metais, Ano XXXVIII, nº 436, p. 140- 157maio, 2002.

SOKOVIC M.; MIJANOVIC K. **Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes,** Journal of Materials Processing Technology, 109, p. 181-189, 2001.

SREEJITH P.S.; NGOI, B.K.A. **Dry machining: Machining of the future.** Journal of Materials Processing Technology, 101, p. 287-291, 2000.

STÄBLER, D.; SCHÖNWALD, M.; SEFRIN, H.; WOLF, M. **Hazard Evaluation at the Dry Tooling of Metallic Materials**. Final Project Report of the Süddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft. 2003.

STANFORD, M.; LISTER, P. M.; KIBBLE, K. A., MORGAN, C. **Investigation into the use of gaseous and liquid nitrogen as a cutting fluid when turning BS 970-80A15 (En32b) plain carbon steel using WC-Co uncoated tooling**, Journal of Materials Processing Technology (Elsevier).2007.

SU, Y., HE, N., LI, L., IQBAL, A., XIAO, M.H., XU, S., QIU, B.G., **Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 47, p.927–933, 2007.

SUDA, S.; YOKOTA, H.; INASAKI, I.; WAKABAYASHI, T. **A Synthetic Ester as an Optimal Cutting Fluid for Minimal Quantity Lubrication Machining**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.51, p. 95-99, 2002.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.J.; SADEGHI, M.H.; DANESHI, A.; STÖCKERT, S.; RASIFARD, A. **An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding International**. Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 49, p. 924–932, 2009.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.J.; SADEGHI. **Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.50, p. 521–531, 2010.

TAWAKOLI, T.; WESTKAEMPER E.; RABIEY M. **Dry grinding by special conditioning**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 33, p. 419–424, 2007.

WANG, C.M.; CARGILL, G.S.; CHAN, H.M.; HARMER, M.P. **Structure of Y and Zr Segregated Grain Boundaries in Alumina**. INTERFACE SCIENCE 8, 243–255, 2000.

WEBSTER, J. A., **Coolant Calculus: Directing coolant into the right place at the right speed, in the right quantity.** Cutting Tool Technology, v.60-2, p. 58-66, 2008.

WEBSTER, J. A. **Selection coolant type and application technique in grinding Supergrind,** University of Connecticut, p. 205-220, USA, 1995.

WECK, M.; HENNES, N.; SCHULZ, A. **Dynamic Behavior of Cylindrical Traverse Grinding Processes.** CIRP Annals - Manufacturing Technology. V.50, p. 213-216, 2001.

WEINERT, K.; INASAKI, I.; SUTHERLAND, J.W.; WACABAYASHI, T., **Dry machining and minimum quantity lubrication,** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 53,p. 511–537, 2004.