



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
Câmpus Bauru



**APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE PELA TÉCNICA MQL COM  
LIMPEZA DO REBOLO DE ALUMINA NA RETIFICAÇÃO DO AÇO ABNT**

**4340**

**RODRIGO DE SOUZA RUZZI**

**Bauru, SP**  
**2017**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
Câmpus Bauru



**APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE PELA TÉCNICA MQL COM  
LIMPEZA DO REBOLO DE ALUMINA NA RETIFICAÇÃO DO AÇO ABNT**

**4340**

**RODRIGO DE SOUZA RUZZI**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP – Câmpus de Bauru, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi**

**Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura**

**Bauru – SP  
2017**

Ruzzi, Rodrigo de Souza.

Aplicação de fluido de corte pela técnica MQL com limpeza do rebolo de alumina na retificação do aço ABNT 4340. / Rodrigo de Souza Ruzzi, 2017. 93 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017.

1. Retificação cilíndrica. 2. Mínima quantidade de lubrificante (MQL). 3. Rebolo convencional. 4. Limpeza do rebolo I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RODRIGO DE SOUZA RUZZI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.**

Aos 16 dias do mês de fevereiro do ano de 2017, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática/FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RODRIGO DE SOUZA RUZZI, intitulada **APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE PELA TÉCNICA MQL COM LIMPEZA DO REBOLO DE ALUMINA NA RETIFICAÇÃO DO AÇO ABNT 4340**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI



Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ



Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA



Dedico esta conquista aos meus pais José Renato e Rosemary, à minha namorada Fernanda e aos meus irmãos Gabriel e Otávio.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos que me proporcionou ao longo de toda minha vida e por me guiar dando força, saúde e disposição para que eu pudesse concluir este trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pelo auxílio, ajuda e confiança desde o início deste trabalho. Expresso minha total gratidão a ele e apreço, não somente aos conhecimentos compartilhados, mas também pelo profissionalismo e exemplo de ser humano.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, por estar sempre presente, auxiliando e contribuindo com este trabalho. Agradeço-lhe ainda por compartilhar seus conhecimentos e pela amizade.

À Universidade Estadual Paulista, UNESP, campus de Bauru, pelos recursos disponibilizados, por acreditar e se preocupar com a educação dos alunos; e pela oportunidade que me foi dada.

Aos Professores da Faculdade Engenharia de Bauru, especialmente Prof. Gilberto Magalhães, Prof. Carlos Alberto Soufen e Prof. Cesar Renato Foschini. Obrigado pelo auxílio e pelo empenho na concretização deste trabalho.

Aos servidores da Faculdade Engenharia de Bauru, especialmente Hamilton José de Mello, Hélio Aparecido de Souza, Osmar Luiz Martinelli, Isabel Cristina Fontes Saggiaro e José Marcelo Felix da Silva. Obrigado por todo o suporte que me foi dado.

Aos alunos da Faculdade de Engenharia de Bauru, especialmente Felipe Pereira Coelho (aluno de iniciação científica) e Ricardo Bega de Andrade (aluno de pós-graduação) pelo grande apoio e empenho durante a realização dos experimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Às Empresas Saint Gobain (Norton) pela doação dos rebolos e apoio fornecido ao grupo de pesquisa, ITW pela doação dos fluidos de corte MQL e à Quimatic Tapmatic pela doação do fluido de corte ME-1.

Gostaria ainda de expressar meus agradecimentos aos meus amigos pelo apoio, à minha família, especialmente aos meus pais José Renato Ruzzi e Rosemary de Souza Ruzzi pelos ensinamentos e apoio em todas as fases da minha vida, aos meus

irmãos: Gabriel de Souza Ruzzi e Otávio de Souza Ruzzi, como também à minha namorada Fernanda Parpinelli pelo incondicional apoio e torcida.

A todos que de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

A mente que se abre à uma nova ideia, jamais voltará ao seu tamanho original (**Albert Einstein**).

## RESUMO

Em meio à atual busca por adequações dos processos produtivos em função da saúde humana e preservação do ambiente, sem abrir mão da preocupação com os custos e a qualidade dos produtos, é preciso pesquisar a tentar novas técnicas de lubri-refrigeração eficientes como alternativas às convencionais. Assim, busca-se técnicas modernas que possam substituí-las, nesse sentido, a técnica MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante) vem sendo uma alternativa pois utiliza baixo fluxo de óleo com ar em alta pressão, diminuindo a quantidade de resíduos gerados no processo. A técnica de MQL já se consolidou no mercado como solução para determinadas operações de usinagem como a de torneamento, porém encontra dificuldades no processo de retificação devido à formação de uma “borra” de óleo com cavacos que se forma na superfície do rebolo prejudicando os resultados do processo. A fim de superar este desafio, foi desenvolvido um sistema de ar comprimido para promover a limpeza da superfície do rebolo através da retirada da camada de borra ou resíduo que se impregna a ele durante o processo de retificação com MQL. Assim, o presente trabalho visou a análise do desempenho dos fluidos biodegradáveis LB 1100 (óleo puro) e BIO CUT 9000 (diluído em água na proporção de 1:5) aplicados a zona de corte via técnica de MQL com um sistema auxiliar de limpeza da superfície de corte do rebolo, em relação à técnica convencional. Os ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho foram realizados no aço endurecido ABNT 4340 utilizando um rebolo convencional de óxido de alumínio. Foram avaliados três avanços radiais distintos, 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min. O desempenho da técnica MQL com sistema de limpeza foi avaliado com base nos parâmetros de rugosidade, desvios de circularidade, potência de usinagem, desgaste diametral do rebolo, microdureza e micrografia. Os resultados mostraram que a usinagem com a técnica MQL com o sistema de limpeza da superfície do rebolo e fluido LB 1100, de modo geral, proporcionou um desempenho superior às demais técnicas nas mesmas condições analisadas, apresentando peças sem danos, com os melhores valores de Rugosidade ( $R_a$ ) e desvios de circularidade e com o menor consumo de potência e rebolo, ressaltando o potencial do uso desta técnica no processo de retificação.

**Palavras-chaves:** *Retificação cilíndrica; mínima quantidade de lubrificante (MQL); fluido de corte; aço ABNT 4340; rebolo convencional; limpeza do rebolo.*

## ABSTRACT

Currently seeking for suitability of the production processes due to the preservation of the environment and human health, without abandoning the concern with cost and quality of products, research is needed to try new efficient cooling-lubrication techniques as alternatives to conventional ones. Thus, modern techniques are sought to replace them, in this way, the MQL (Minimum Quantity of Lubricant) technique has been an alternative because it uses low oil flow with high pressure air, reducing the amount of waste generated in the process. The MQL technique has already consolidated itself in the market as a solution for certain machining operations such as turning, but it encounters difficulties in the grinding process due to the formation of an oil slurry with chips that forms on the surface of the grinding wheel, damaging the results of the process. To overcome this challenge, a compressed air system has been developed to promote the cleaning of the grinding wheel surface by removing the layer of sludge or residue which is impregnated thereto during the grinding process with MQL. Thus, the present research had as objective the performance analysis of the biodegradable fluids LB 1100 (pure oil) and BIO CUT 9000 (diluted in water in a ratio of 1:5) applied to the cutting zone through the MQL technique with an auxiliary cleaning system of the grinding wheel cutting surface, in relation to the conventional technique. External cylindrical plunge grinding trials were performed on AISI 4340 hardened steel using a conventional aluminum oxide grinding wheel. Three distinct feed rates were evaluated: 0.25, 0.50 and 0.75 mm/min, respectively. The performance of the MQL technique with the cleaning system was evaluated based on the parameters of roughness, roundness error, grinding power, diametric wheel wear, microhardness and micrograph. The results showed that the machining with the MQL technique with the grinding wheel cleaning system and the fluid LB 1100, in general, provided the best performance in relation to the other techniques in the same analyzed conditions, presenting parts without damages, with the best values of roughness (Ra) and roundness error and with the lowest expenditure of power and wheel wear, highlighting the potential of the use of this technique in the grinding process.

**Keywords:** *cylindrical grinding; minimum quantity of lubricant (MQL); cutting fluid; AISI 4340 steel; conventional grinding wheel; grinding wheel cleaning.*

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>xv</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>xvi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. O processo de retificação .....</b>	<b>21</b>
2.1.1. Mecanismo de formação do cavaco .....	21
2.1.2. Retificação cilíndrica externa de mergulho .....	23
2.1.3. Parâmetros calculados para o processo de retificação cilíndrica .....	25
2.1.3.1. Velocidade de corte ( $v_s$ ) .....	25
2.1.3.2. Velocidade da Peça ( $v_w$ ) .....	26
2.1.3.3. Relação de velocidade rebolo e peça ( $q_s$ ) .....	26
2.1.3.4. Taxa de remoção de material ( $Q_w$ ) .....	27
2.1.3.5. Taxa de remoção de material específica ( $Q_w'$ ) .....	27
2.1.3.6. Espessura de corte equivalente ( $h_{eq}$ ) .....	28
2.1.3.7. Profundidade de corte ( $a_e$ ) .....	28
<b>2.2. Rebolos convencionais de óxido de alumínio (<math>Al_2O_3</math>) .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3. Processo de dressagem dos rebolos convencionais .....</b>	<b>30</b>
<b>2.4. Fluidos de corte empregados no processo de retificação .....</b>	<b>33</b>
2.4.1. Custos dos fluidos .....	34
2.4.2. Problemas causados pelo uso de fluidos de corte .....	36
2.4.3. Alternativas à técnica convencional de lubri-refrigeração .....	37
2.4.3.1. A técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) .....	39
<b>2.5. Limpeza da superfície de corte do rebolo .....</b>	<b>42</b>
2.5.1. Fenômeno do empastamento .....	42
2.5.2. Sistemas que promovem a limpeza do rebolo .....	44
2.5.2.1. Limpeza do rebolo por ar comprimido .....	46
<b>2.6. Parâmetros para avaliar eficiência do processo de retificação .....</b>	<b>49</b>
2.6.1. Rugosidade .....	49
2.6.2. Desvios de circularidade .....	50
2.6.3. Desgaste diametral do rebolo .....	51
2.6.4. Potência de retificação .....	52
2.6.5. Microdureza da peça .....	52
2.6.6. Análise microestrutural por microscopia óptica .....	53
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>54</b>
<b>3.1. Materiais e equipamentos utilizados .....</b>	<b>54</b>
3.1.1. Material da peça .....	54

3.1.2.	Retificadora cilíndrica externa.....	54
<b>3.2.</b>	<b>Parâmetros de corte e planejamento dos ensaios.....</b>	<b>55</b>
<b>3.3.</b>	<b>Fluidos de corte e técnicas de aplicação de fluidos de corte.....</b>	<b>57</b>
3.3.1.	Sistema de limpeza por ar comprimido .....	60
<b>3.4.</b>	<b>Dressagem.....</b>	<b>61</b>
<b>3.5.</b>	<b>Variáveis de saída analisadas na pesquisa e instrumentos de medição ...</b>	<b>62</b>
3.5.1.	Rugosidade.....	62
3.5.2.	Desvios de circularidade .....	62
3.5.3.	Desgaste diametral do rebolo.....	63
3.5.4.	Potência de retificação .....	63
3.5.5.	Microdureza .....	64
3.5.6.	Microscopia óptica.....	66
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>67</b>
4.1.	Rugosidade.....	67
4.2.	Desvios de circularidade .....	70
4.3.	Desgaste diametral do rebolo.....	71
4.4.	Potência de retificação .....	72
4.5.	Análise da integridade microestrutural (microdureza e metalografia) .....	74
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>83</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>84</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formação do cavaco em materiais dúcteis por um grão abrasivo. Em que: $v_s$ é a velocidade de corte, $F_t$ é a força tangencial de corte e $F_n$ é a força normal de corte (KLOCKE, 2009).....	22
Figura 2 – Ilustração esquemática da retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN, 1989, modificada).....	23
Figura 3 – Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (SOARES; OLIVEIRA, 2002, adaptado por OLIVEIRA, 2011).....	24
Figura 4 – Relação entre a energia específica e o desgaste radial do rebolo (AZIZI; REZAEI; RAHIMI, 2010).....	31
Figura 5 – Procedimento e parâmetros de dressagem (JACKSON; DAVIM, 2011, adaptado).....	32
Figura 6 – Custos de produção (WALKER, 2013, adaptado).....	35
Figura 7 – Porcentagem dos custos com fluido de corte (WALKER, 2013, adaptado).....	35
Figura 8 – Problemas e cuidados decorrentes do uso de fluido de corte. Sendo: (a) manuseio do fluido e (b) dermatite causada pelo contato da pele com o fluido de corte. ....	36
Figura 9 – Valores de rugosidade e tensão residual do trabalho de SILVA et al. (2007).....	40
Figura 10 – Valores de rugosidade do trabalho de SANCHEZ et al. (2010).....	40
Figura 11 – Valores de rugosidade, desgaste diametral do rebolo e potência de retificação do trabalho de BELENTANI et al. (2014).....	41
Figura 12 – Fenômeno do empastamento do rebolo (OLIVEIRA, 2011).....	43
Figura 13 – Superfície de corte do rebolo com cavacos alojados entre os poros (BARROS et al., 2014).....	44
Figura 14 – Limpeza a laser da superfície de corte do rebolo (JACKSON et al., 2007, adaptado).....	45
Figura 15 – Resultados de energia específica em função da velocidade e da vazão do jato (CAMERON et al., 2010).....	45
Figura 16 – Efeito do jato de ar comprimido na limpeza do rebolo (OLIVEIRA et al., 2012, adaptado).....	47
Figura 17 – Valores de rugosidade e desvios de circularidade do trabalho de OLIVEIRA et al. (2012).....	47
Figura 18 – Valores de rugosidade, desgaste diametral do rebolo e potência de retificação obtidos e apresentados por BARROS et al. (2014).....	48
Figura 19 – Valores de rugosidade, desvios de circularidade e desgaste diametral do rebolo do trabalho de RUZZI et al. (2016).....	49
Figura 20 – Desvio de circularidade de acordo com a norma ISO 1101:2012, onde “a” é qualquer seção transversal e t é o desvio de circularidade.....	51
Figura 21 – Matriz de experimentos.....	55
Figura 22 – Planejamento dos ensaios.....	56

Figura 23 – Sistema de ar comprimido para a técnica MQL (OLIVEIRA, 2011)....	58
Figura 24 – Projeto do bocal (BELENTANI et al., 2014).....	59
Figura 25 – Posicionamento dos bocais.....	60
Figura 26 – Regiões do rebolo utilizadas para os ensaios.....	61
Figura 27 – Medição do desgaste diametral do rebolo.....	63
Figura 28 – Esquema do procedimento utilizado para a medição da potência.....	64
Figura 29 – Esquema de medição das microdurezas.....	65
Figura 30 – Rugosidade média (Ra) em função do avanço para as diferentes técnicas lubri-refrigerantes.....	68
Figura 31 – Desvios de circularidade em função do avanço para as diferentes técnicas lubri-refrigerantes.....	70
Figura 32 – Desgaste diametral do rebolo de $Al_2O_3$ em função do avanço para as diferentes técnicas lubri-refrigerantes.....	72
Figura 33 – Potência de retificação em função do avanço para as diferentes técnicas lubri-refrigerantes.....	73
Figura 34 – Microdureza após retificação com a técnica convencional: (a) $v_f = 0,25$ mm/min; (b) $v_f = 0,5$ mm/min; (c) $v_f = 0,75$ mm/min.....	74
Figura 35 – Microestrutura das peças retificadas com a técnica convencional e diferentes velocidades de avanço: (A) $v_f = 0,25$ mm/min (ampliação de 500x); (B) $v_f = 0,25$ mm/min (ampliação de 1000x); (C) $v_f = 0,5$ mm/min (ampliação de 500x); (D) $v_f = 0,5$ mm/min (ampliação de 1000x); (E) $v_f = 0,75$ mm/min (ampliação de 500x); (F) $v_f = 0,75$ mm/min (ampliação de 1000x).....	75
Figura 36 – Microdureza após retificação com a técnica MQL (óleo puro): (d) $v_f = 0,25$ mm/min; (e) $v_f = 0,5$ mm/min; (f) $v_f = 0,75$ mm/min.....	76
Figura 37 – Microestrutura das peças retificadas com a técnica de MQL e diferentes velocidades de avanço: (A) $v_f = 0,25$ mm/min (ampliação de 500x); (B) $v_f = 0,25$ mm/min (ampliação de 1000x); (C) $v_f = 0,5$ mm/min (ampliação de 500x); (D) $v_f = 0,5$ mm/min (ampliação de 1000x); (E) $v_f = 0,75$ mm/min (ampliação de 500x); (F) $v_f = 0,75$ mm/min (ampliação de 1000x).....	77
Figura 38 – Microdureza após retificação com a técnica MQL + $H_2O$ (1:5): (g) $v_f = 0,25$ mm/min; (h) $v_f = 0,5$ mm/min; (i) $v_f = 0,75$ mm/min.....	78
Figura 39 – Microestrutura das peças retificadas com a técnica de MQL + $H_2O$ (1:5) e diferentes velocidades de avanço: (A) $v_f = 0,25$ mm/min (ampliação de 500x); (B) $v_f = 0,25$ mm/min (ampliação de 1000x); (C) $v_f = 0,5$ mm/min (ampliação de 500x); (D) $v_f = 0,5$ mm/min (ampliação de 1000x); (E) $v_f = 0,75$ mm/min (ampliação de 500x); (F) $v_f = 0,75$ mm/min (ampliação de 1000x).....	79

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Composição química do aço ABNT 4340 (CALLISTER; RETHWISCH, 2012) .....	54
Tabela 2 – Variáveis de entrada no processo de usinagem.....	57
Tabela 3 – Condições de lubri-refrigeração.....	59

**LISTA DE ABREVIATURAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – American Iron and Steel Institute

SAE – Society of Automotive Engineers

ASTM – American Society for Testing and Materials

CBN – Nitreto de Boro Cúbico

CNC – Comando Numérico Computadorizado

ISO – International Organization for Standardization

MQL – Mínima quantidade de lubrificante

NBR – Norma Brasileira

**LISTA DE SÍMBOLOS**

- $a_e$  – Penetração de trabalho ( $\mu\text{m}$ )
- $a_d$  – Profundidade de dressagem (mm)
- $a_p$  – Largura do contato (mm)
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Óxido de alumínio
- $b_d$  – Largura de atuação do dressador (mm)
- C – Carbono
- Cr – Cromo
- $\text{CO}_2$  – Dióxido de carbono
- $d_s$  – Diâmetro do rebolo (mm)
- $d_w$  – Diâmetro da peça (mm)
- $F_n$  – Componente normal da força de corte (N)
- $F_t$  – Componente tangencial da força de corte (N)
- $\text{H}_2\text{O}$  – Água
- HV – Dureza Vickers
- $h_{eq}$  – Espessura de corte equivalente ( $\mu\text{m}$ )
- $l_e$  – Comprimento de amostragem ou cut-off (mm)
- $l_m$  – Comprimento do percurso de medição (mm)
- Mn – Manganês
- Mo – Molibdênio
- Ni – Níquel
- $n_s$  – Rotação do rebolo (rpm)
- $n_w$  – Rotação da peça (rpm)
- P – Fósforo
- Pot – Potência de retificação (W)
- $q_s$  – Relação entre de velocidade rebolo e da peça

$Q_w$  – Taxa de remoção de material ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )

$Q_w'$  – Taxa de remoção de material específica ( $\text{mm}^2/\text{min}$ )

$R_a$  – Rugosidade média aritmética ( $\mu\text{m}$ )

S – Enxofre

$S_d$  – Passo de dressagem ou avanço axial do dressador por volta ( $\text{mm}/\text{rev}$ )

Si – Silício

$t_s$  – Tempo de faiscamento ou sparkout (s)

$v_f$  – Velocidade de mergulho ou avanço radial ( $\text{mm}/\text{min}$ )

$v_{fd}$  – Velocidade de dressagem ou avanço longitudinal do dressador ( $\text{mm}/\text{min}$ )

$v_s$  – Velocidade de corte (m/s)

$v_w$  – Velocidade da peça (m/s)

$W_t$  – Ondulação teórica ( $\mu\text{m}$ )

$z_w$  – Volume de material removido ( $\text{mm}^3$ )

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação tem a função de conferir à peça um bom acabamento e tolerâncias dimensionais estreitas, sendo melhor compreendido como grãos abrasivos (partículas duras com arestas vivas) ligados a um rebolo que gira a alta velocidade de corte ( $\geq 30$  m/s). A orientação dos grãos individuais é aleatória; por consequência um grão pode encontrar a superfície da peça com um ângulo positivo, zero, ou, como é mais provável, com um ângulo de inclinação negativa. As consequências desse processo dependem da profundidade de corte (MARINESCU et al., 2015)

O rebolo por sua vez é um sistema trifásico, composto pelos grãos abrasivos, poros e ligante, que trabalha em altas velocidades e baixas profundidades de corte, variando dependendo da operação.

A retificação, em geral, é um processo realizado na presença de fluido de corte, sendo que a seco não é muito conveniente em função da geração excessiva de calor (DUDZINSKI et al., 2004). Esse calor é gerado devido ao atrito e às deformações geradas pelas inúmeras arestas de corte que giram a altas velocidades, o que acarreta em uma grande quantidade de energia, que devido à baixa condutividade térmica do rebolo e tamanho do cavaco, é dissipada para a peça em forma de calor. Segundo BADGER & TORRANCE (2000), este calor pode resultar em queima na superfície da peça, modificações microestruturais e surgimento de tensão residual. Entretanto, esse problema pode ser amenizado com a aplicação de fluido de corte com as funções de lubrificação e refrigeração da região usinada, minimizando assim a geração de calor pela redução do atrito e dissipação de parte do calor gerado para o fluido.

Além das funções de refrigeração e lubrificação, no processo de retificação, o fluido de corte retira os cavacos da região de corte promovendo a limpeza dos poros do rebolo.

Apesar de todos os benefícios, os fluidos de corte exigem sérios cuidados no seu manuseio no processo de trabalho, pois podem causar danos à saúde humana e ao meio-ambiente, sendo necessário um cuidado especial na armazenagem, uso e descarte a fim de não agredir o ecossistema. Tais cuidados fazem com que o custo agregado pelo processo aumente (WALKER, 2013).

Partindo dessa ideia, segundo NOVASKI & DÖRR (1999), a utilização de uma quantidade cada vez menor de fluido na região de corte representa grande importância no cotidiano, desde que não ocorra o comprometimento do resultado da

usinagem. Dessa forma, SOKOVIĆ & MIJANOVIĆ (2001) dizem que a fim de buscar alternativas e melhorias para os processos atuais de produção, faz-se necessário substituir os métodos convencionais para que seja possível obter condições de fabricação associadas ao menor impacto ambiental e que estejam tecnológica e economicamente coerentes. Sendo assim, surgiram alternativas de lubri-refrigeração, dentre elas a mínima quantidade de lubrificante (MQL).

A técnica MQL usa uma baixa quantidade de óleo (inferior a 240 ml/h) com comprimido que são misturados e expelidos a alta pressão. No entanto, essa alternativa, já muito usada em outras operações de usinagem (com ferramenta de geometria definida), tem mostrado de modo geral, dificuldades em obter bons resultados superficiais (rugosidade) na operação de retificação. Tais dificuldades, segundo o trabalho de SAHM & SCHNEIDER (1996), estão associadas ao fato de que com o uso do MQL, torna-se mais difícil a remoção dos cavacos na zona de corte do rebolo, causando um entupimento nos poros do mesmo por uma “borra” de óleo com cavacos, verificado em experimentos.

A partir desse problema, foram realizados experimentos no laboratório, nos quais se desenvolveu um sistema de limpeza da ferramenta durante o processo através do uso de um bocal de ar comprimido (OLIVEIRA et al., 2012), o que torna promissor estudo do uso da técnica MQL na operação de retificação, e abre portas para o estudo de aplicações de fluidos biodegradáveis através desta técnica em conjunto com o sistema de limpeza do rebolo. Com isso, o volume de fluido utilizado pela técnica convencional, que emprega vazões entre 5000 e 360000 ml/min é drasticamente reduzido para 4 ml/min. Assim, seu uso é uma opção bem vista em termos ambientais e qualitativos em relação à técnica convencional.

Assim, este trabalho teve por objetivo analisar de forma comparativa o desempenho dos fluidos LB 1100 (óleo puro) e BIOCUT 9000 (diluído em água na proporção de 1:5) aplicados através da técnica de MQL, em conjunto com o uso de um sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo, frente à técnica convencional de lubri-refrigeração (refrigeração abundante), durante a retificação externa de mergulho do aço ABNT 4340 (temperado e revenido) com rebolo convencional de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ). As seguintes variáveis de saída foram analisadas: a rugosidade, o desvio de circularidade, o desgaste diametral do rebolo, a potência de usinagem, a microdureza e a microestrutura das peças após a usinagem.

Esta dissertação de mestrado está estruturada da seguinte forma: no



Capítulo 1 é apresenta a Introdução do trabalho e o objetivo proposto. O Capítulo 2 contempla uma breve Revisão Bibliográfica para embasar esta pesquisa e fundamentar as análises críticas defendidas, abordando os seguintes tópicos: a definição de retificação; as técnicas de lubri-refrigeração; os sistemas utilizados para promover a limpeza da superfície de corte do rebolo; as principais variáveis de saída e a caracterização do aço ABNT 4340. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e equipamentos utilizados, bem como a metodologia empregada. No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões, enquanto que no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais observadas neste trabalho. Finalmente, no Capítulo 6 são propostas as Sugestões para Trabalhos Futuros. As Bibliografias utilizadas finalizam o trabalho.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Objetivando o estudo avançado da tecnologia e da ciência da retificação, foi realizada uma revisão da literatura que engloba o processo de retificação, os rebolos convencionais de óxido de alumínio, o processo de dressagem, bem como as técnicas de lubri-refrigeração, os sistemas de limpeza superficial do rebolo e os parâmetros utilizados para avaliar a eficiência do processo.

### **2.1. O processo de retificação**

Usinagem por abrasão é um nome genérico dado ao processo de remoção de material, tanto metal quanto não metal, de pequenas partículas produzidas pelas arestas de cortes de materiais abrasivos, sendo assim, retificação é um processo de usinagem por abrasão (SALMON, 1992).

A retificação é um processo de usinagem que utiliza um rebolo formado por grãos abrasivos rotacionando numa alta velocidade (que confere  $v_s \geq 30$  m/s) para a remoção de material com uma dureza inferior à do rebolo (MARINESCU et al., 2007).

Tradicionalmente, o processo de retificação se trata de um dos processos finais em uma produção, sendo este usado para melhorar o acabamento e as tolerâncias das superfícies (MALKIN; GUO, 2008).

No processo de retificação as operações podem ser agrupadas de acordo com a superfície a ser usinada e com o movimento relativo entre peça e rebolo, existindo assim, quatro operações básicas de retificação, a plana periférica, a cilíndrica periférica ou externa, a plana facial e a cilíndrica facial (MARINESCU et al., 2007). Nesta pesquisa será dada a ênfase ao processo de retificação cilíndrica de mergulho por ser aquele empregado para gerar resultados de  $R_a \leq 1,6$   $\mu\text{m}$  e tolerâncias dimensionais IT06 e IT03, além de permitir avaliar o desempenho da técnica MQL com sistema de limpeza.

#### **2.1.1. Mecanismo de formação do cavaco**

Como a retificação é essencialmente um processo de remoção de material, há dois fatores cruciais que exercem fortes influências no desempenho do processo, a ferramenta de corte e o processo de formação do cavaco (NGUYEN; BUTLER, 2005).

Na retificação de materiais, há três fases distintas de interação entre o abrasivo e a peça: a região elástica, a plástica e a de corte (NGUYEN; BUTLER, 2005).

Na Figura 1 estão ilustradas as três fases do mecanismo de remoção de material e formação do cavaco durante a retificação. Na primeira fase, enquanto a profundidade de corte é muito pequena o grão irá deslizar na superfície, causando deformações elásticas com nenhum material removido (fase elástica). Já na fase plástica os grãos abrasivos continuam penetrando na peça, proporcionando deformações plásticas, escoamento lateral e recuperação das deformações elásticas ocorridas no estágio anterior. A maior penetração dos grãos implica em maiores forças de atrito entre peça e rebolo, onde grande parte da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor. Enquanto na terceira e ultima fase, a aresta de corte atinge um valor de penetração crítico, iniciando a formação de cavaco, onde grande parte da energia passa a ser consumida no cisalhamento do material (KLOCKE, 2009).

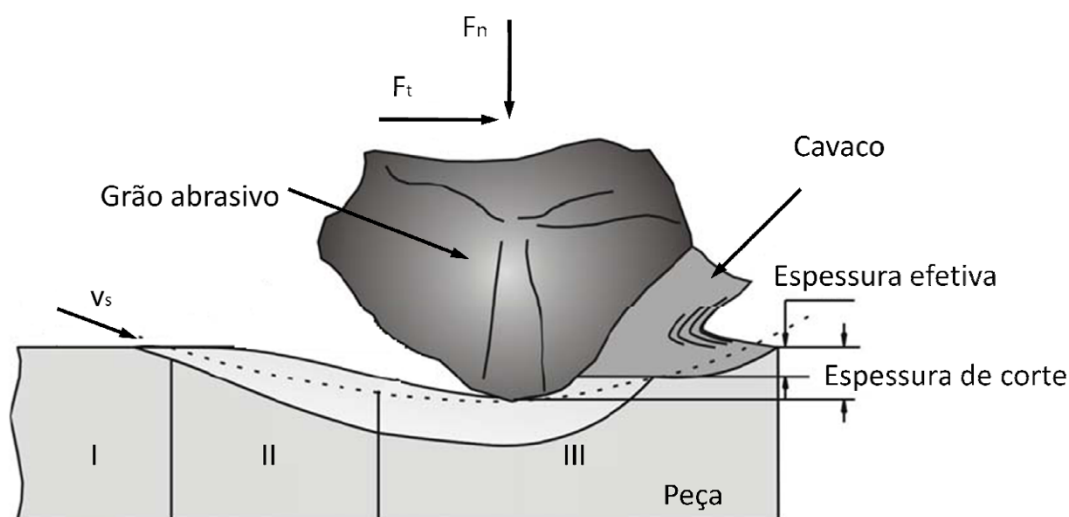


Figura 1 – Formação do cavaco em materiais dúcteis por um grão abrasivo. Em que:  $v_s$  é a velocidade de corte,  $F_t$  é a força tangencial de corte e  $F_n$  é a força normal de corte (KLOCKE, 2009)

Segundo NGUYEN & BUTLER (2005), um entendimento dos mecanismos de remoção de material e da natureza dos problemas associados a ele são pré-requisitos que podem ajudar no desenvolvimento do processo de retificação. Sendo assim, torna-se fundamental a seleção e o estudo de parâmetros de saída que ajudem nesse entendimento.

### 2.1.2. Retificação cilíndrica externa de mergulho

A retificação cilíndrica externa refere-se à retificação de uma superfície externa de uma peça de trabalho rotacionando em torno de um eixo de rotação com o contato mantido entre centros (MARINESCU et al., 2007). A operação de retificação cilíndrica externa de mergulho está representada na Figura 2.

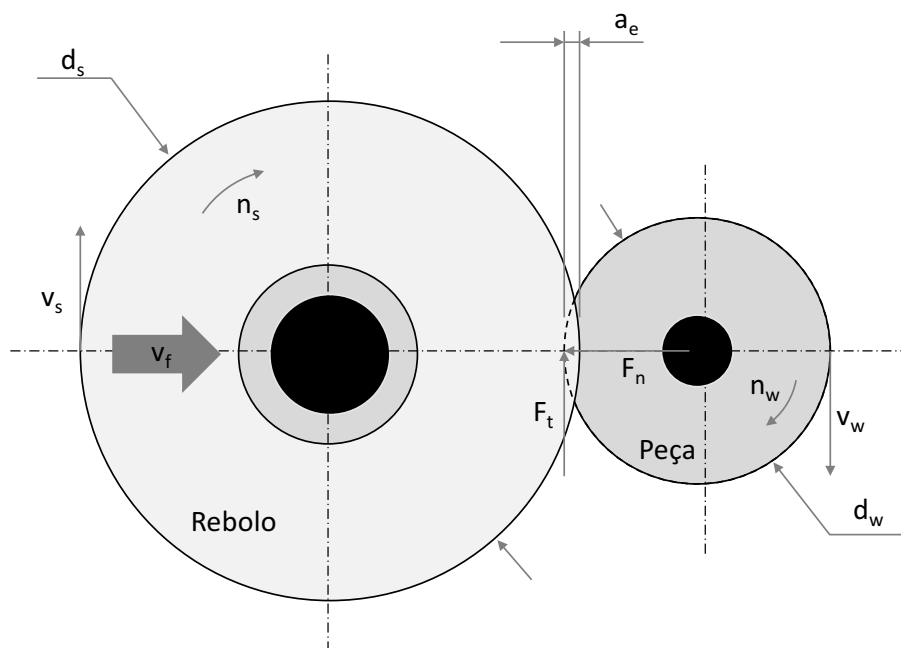


Figura 2 – Ilustração esquemática da retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN, 1989, modificada)

Onde:

$v_s$  é a velocidade tangencial do rebole ou de corte;

$v_w$  é a velocidade da peça;

$d_s$  é o diâmetro do rebole;

$d_w$  é o diâmetro da peça;

$a_e$  é a profundidade de corte;

$n_w$  é rotação da peça;

$n_s$  é rotação do rebole;

$v_f$  é a velocidade de avanço do rebole;

$F_t$  é a força tangencial de corte;

$F_n$  é a força normal de corte.

Quando o rebolo toca a peça e inicia seu avanço radial, o conjunto peça mais rebolo se deforma elasticamente, fazendo com que o avanço por volta não seja o real. Com isso, a posição real do rebolo fica atrasada em relação à teórica. Depois de algumas voltas, o avanço real se iguala ao avanço comandado, mas a diferença entre a profundidade de corte real e teórica continua (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

A fim de garantir a dimensão desejada da peça é necessário que, ao fim do corte, o rebolo pare seu movimento de avanço radial por alguns instantes até que o eixo porta-rebolo e a peça se recuperem da deformação sofrida, esses instantes são denominados de *spark-out*.

Na Figura 3, SOARES & OLIVEIRA (2002) demonstram o ciclo de retificação e as etapas.

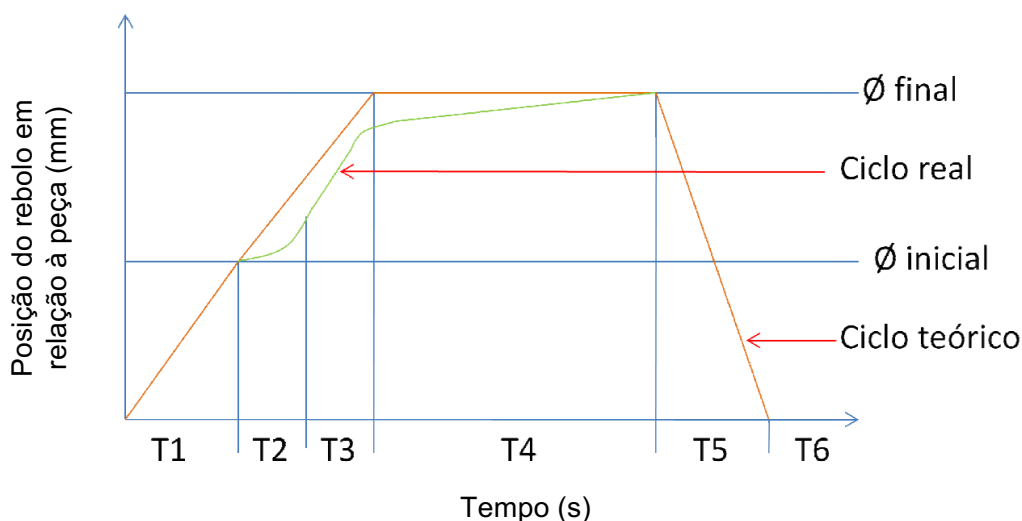


Figura 3 – Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (SOARES; OLIVEIRA, 2002, adaptado por OLIVEIRA, 2011)

Os intervalos de tempo indicados na Figura 3 são descritos 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;
- ✓ 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 as tolerâncias dimensionais e geométricas são alcançadas com reduzidos valores de rugosidade superficial, característicos do processo de retificação;
- ✓ T5: recuo do rebolo, permitindo a retirada da peça usinada;
- ✓ T6: troca de peça e uma possível operação de dressagem.

### 2.1.3. Parâmetros calculados para o processo de retificação cilíndrica

São os parâmetros calculados que representam os eventos ocorridos durante o processo de retificação e descrevem como as coisas acontecem durante o processo de retificação. A correta seleção dos parâmetros calculados depende da qualidade das medições. Nesse tópico são apresentados e descritos os principais parâmetros do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.

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

Um aumento na velocidade do rebolo em geral melhora a qualidade final da peça, diminuindo também o desgaste da ferramenta abrasiva, devido à uma diminuição na espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ ). Porém, em altas velocidades, costuma-se usar rebolos superabrasivos de ligante metálico ou eletro-depositado (JACKSON et al., 2001).

De acordo com GRAF (2004), a velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo pode ser calculada pela equação (1).

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (1)$$

Onde:

$v_s$  = velocidade de corte (m/s);

$d_s$  = diâmetro do rebolo (mm);

$n_s$  = rotação do rebolo (rpm).

### 2.1.3.2. Velocidade da Peça ( $v_w$ )

Um aumento da velocidade da peça acarreta em uma elevação na taxa de remoção de material ( $Q_w$ ), o que gera uma maior espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ ), ou seja, cavacos mais grossos e uma carga maior atuando em cada abrasivo do rebolo (GRAF, 2004).

De acordo com GRAF (2004), a velocidade da peça  $v_w$  pode ser determinada em função do diâmetro e rotação da mesma, conforme na equação (2).

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (2)$$

Onde:

$v_w$  = velocidade da peça (m/s);

$d_w$  = diâmetro da peça (mm);

$n_w$  = rotação da peça (rpm).

### 2.1.3.3. Relação de velocidade rebolo e peça ( $q_s$ )

Existem índices ideais para “ $q_s$ ”, sendo que para operações de desbaste e retificação cilíndrica interna adota-se de 60 a 90, para operações de semi acabamento 90 e para acabamento de 90 a 120 (MACEDO, 2012).

De acordo com MACEDO (2012), essa relação pode ser calculada pela equação (3).

$$q_s = \frac{v_s}{v_w} = \frac{n_s \cdot d_s}{n_w \cdot d_w} \quad (3)$$

Onde:

$q_s$  = relação de velocidade rebolo e peça (adimensional);

$v_c$  = velocidade do rebolo (m/s);

$v_w$  = velocidade da peça (m/s);

$n_s$  = rotação do rebolo (rpm);

$n_w$  = rotação da peça (rpm);

$d_s$  = diâmetro do rebolo (mm);

$d_w$  = diâmetro da peça (mm).

#### 2.1.3.4. Taxa de remoção de material ( $Q_w$ )

De acordo com MALKIN & GUO (2008), a taxa de remoção de material ( $Q_w$ ) é o volume de material removido por unidade de tempo, um aumento dela acarreta no aumento da espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ ), ou seja em um pior acabamento. A taxa de remoção de material pode ser determinada conforme a equação (4).

$$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot a_p \cdot v_f \quad (4)$$

Onde:

$Q_w$  = taxa de remoção de material ( $\text{mm}^3/\text{min}$ );

$d_w$  = diâmetro da peça (mm);

$a_p$  = largura de contato (mm);

$v_f$  = velocidade de avanço (mm/min).

A largura de contato ( $a_p$ ) é, no processo de retificação cilíndrica de mergulho definida pela largura da peça, enquanto a velocidade de avanço ( $v_f$ ) 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).

#### 2.1.3.5. Taxa de remoção de material específica ( $Q_w'$ )

De acordo com MALKIN & GUO (2008), a taxa de remoção de material específica ( $Q_w'$ ) pode ser obtida através da divisão da taxa de remoção de material ( $Q_w$ ) pela largura de contato ( $a_p$ ), conforme mostra a equação (5).

$$Q_w' = \frac{Q_w}{a_p} = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (5)$$

Onde:

$Q_w'$  = taxa de remoção de material específica ( $\text{mm}^2/\text{min}$ );

$Q_w$  = taxa de remoção de material ( $\text{mm}^3/\text{min}$ );

$d_w$  = diâmetro da peça (mm);

$a_p$  = largura de contato (mm);

$v_f$  = velocidade de avanço (mm/min).



Sendo assim a  $Q_w'$  é a taxa volumétrica de remoção de material por unidade de largura da peça, sendo usada para comparar diferentes processos de retificação (CAMERON; BAUER; WARKENTIN, 2010).

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

A espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ ) é a espessura da camada de material removida pelo rebolo numa volta completa. É um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho, sendo ainda definido como a relação entre a taxa de remoção específica do material  $Q_w'$  e  $v_s$  (HEINZEL; BLEIL, 2007).

De acordo com MARINESCU et al. (2007), a espessura equivalente de corte pode ser representada pela equação (6).

$$h_{eq} = \frac{Q_w'}{v_s \cdot 60} \quad (6)$$

Onde:

$h_{eq}$  = espessura equivalente de corte ( $\mu\text{m}$ );

$Q_w'$  = taxa de remoção de material específica ( $\text{mm}^2/\text{min}$ );

$v_s$  = velocidade do rebolo (m/s).

Apesar da espessura equivalente de corte não levar em consideração o espaçamento dos grãos do rebolo, pode ser considerado um dos melhores parâmetros de caracterização de um processo de retificação, uma vez que engloba importantes características do processo como  $Q_w'$  e  $v_s$  (MARINESCU et al., 2004)

### 2.1.3.7. Profundidade de corte ( $a_e$ )

Segundo MARINESCU et al. (2007),  $a_e$  é a profundidade que o rebolo penetra na peça com uma velocidade  $v_f$  durante uma revolução completa da mesma e pode ser definida pela equação (7). Um aumento na profundidade de corte acarreta no aumento da espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ ), o que prejudica o acabamento superficial.

$$a_e = \frac{Q_w'}{v_w \cdot 60} \quad (7)$$

Onde:

$a_e$  = profundidade de corte ( $\mu\text{m}$ );

$Q_w'$  = taxa de remoção de material específica ( $\text{mm}^2/\text{min}$ );

$v_w$  = velocidade da peça (m/s).

A profundidade de corte está amplamente relacionada com o parâmetro espessura equivalente de corte, onde aumentando  $a_e$ , ocorre aumento dessa espessura e, com isso, maiores esforços de corte, desgaste do rebolo e elevada rugosidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

## 2.2. Rebolos convencionais de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Na retificação, a ferramenta abrasiva utilizada é o rebolo, que é basicamente composto por grão abrasivos, ligante e poros (BIANCHI et al., 2011).

Dentre os abrasivos convencionais desenvolvidos para atender às variadas exigências das operações de retificação, pode-se destacar o rebolo de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) por sua grande utilização e importância nas indústrias, pois, apesar de apresentar a menor dureza dentre todos os abrasivos, possui a vantagem de ser relativamente resistente ao impacto, podendo ser empregado na retificação de materiais ferrosos (HASSUI, 2002).

O rebolo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é largamente utilizado na usinagem de ligas de baixa usinabilidade e nas altas ligas de aço. Para se conseguir melhor dureza ou friabilidade, é necessário que se façam tratamentos térmicos ou modificação do tipo de ligante no rebolo (SALMON, 1992).

O óxido de alumínio possui uma estrutura cristalina muito grande e um grão abrasivo contém até três cristais, somente. Dessa forma, quando ocorre a fratura do grão, o resultado pode ser a sua perda total, gerando, assim, baixa eficiência no processo (MARINESCU et al., 2007).

Segundo JACKSON & MILLS (2000), os grãos de óxido de alumínio podem ser classificados em categorias de acordo com sua composição química, sendo elas: alumina, alumina semi friável, alumina branca, alumina rosa e sol-gel.

### 2.3. Processo de dressagem dos rebolos convencionais

Dressagem é o processo conjunto de perfilar e afiar o rebolo. Afiar é um processo onde ocorre a remoção do ligante entre os grãos abrasivos. Já perfilar é o processo que tem como objetivo dar forma ao rebolo, podendo gerar também um perfil específico sobre o rebolo. Usado também para limpar cavacos e sujeiras que estejam no rebolo (MARINESCU et al., 2007).

A topografia e forma macroscópica do rebolo são geradas pela preparação, antes ou durante o processo de retificação, do rebolo por meio da dressagem (MALKIN; GUO, 2008).

Entender os mecanismos de dressagem de rebolos é crítico para a obtenção de um ótimo processo de retificação (MARINESCU et al., 2007).

Para manter as características e funcionalidades do rebolo, é necessário que ocorra uma dressagem periódica. A dressagem produz uma superfície particular – dependendo do tipo e material do dressador – na superfície de corte do rebolo, onde cerca de 10% do rebolo é gasto no processo de usinagem e os demais 90% com a dressagem (JACKSON et al., 2007).

Segundo CAI & ROWE (2004), as alterações na topografia podem ajudar a explicar os efeitos do parâmetro de retificação no desempenho do processo e como controlá-lo.

Segundo HARIMKAR et al. (2006), o desempenho da retificação é julgado em termos do desgaste do rebolo e da energia específica. O desgaste por atrito causa menor desgaste radial, mas a quebra do ligante ou desprendimento do grão estraga mais rapidamente o rebolo. A fratura do grão, por sua vez, gera arestas de corte mais afiadas, fenômeno conhecido como a ação de auto afiação do rebolo, como no caso de rebolos com ligante vitrificado. Na Figura 4 pode ser observada a relação entre a energia específica de retificação e o desgaste do rebolo.

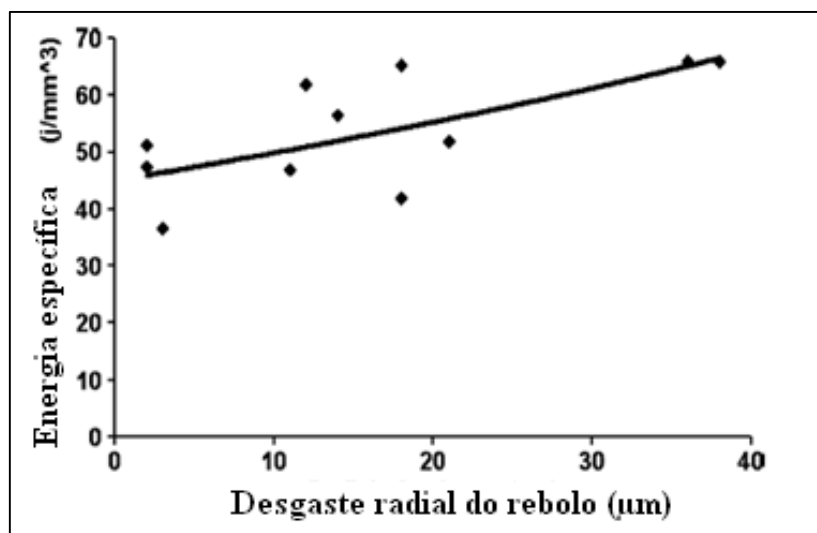


Figura 4 – Relação entre a energia específica e o desgaste radial do rebolo (AZIZI; REZAEI; RAHIMI, 2010)

Segundo MALKIN (1989), as operações de dressagem mecânica geram superfícies compostas de macro e micro-efeito, sendo que o macro-efeito determina a posição em que as arestas dos grãos abrasivos estão localizadas na superfície do rebolo e é formado devido ao formato do dressador, da profundidade de penetração deste e do passo da dressagem. Já o micro-efeito, é formado pelo arrancamento dos grãos desgastados (com baixa ancoragem na liga) e fratura dos grãos que não se desgastaram por completo, em que novas arestas de corte são geradas pelo dressador.

O mecanismo de dressagem e as variáveis envolvidas estão ilustrados na Figura 5.

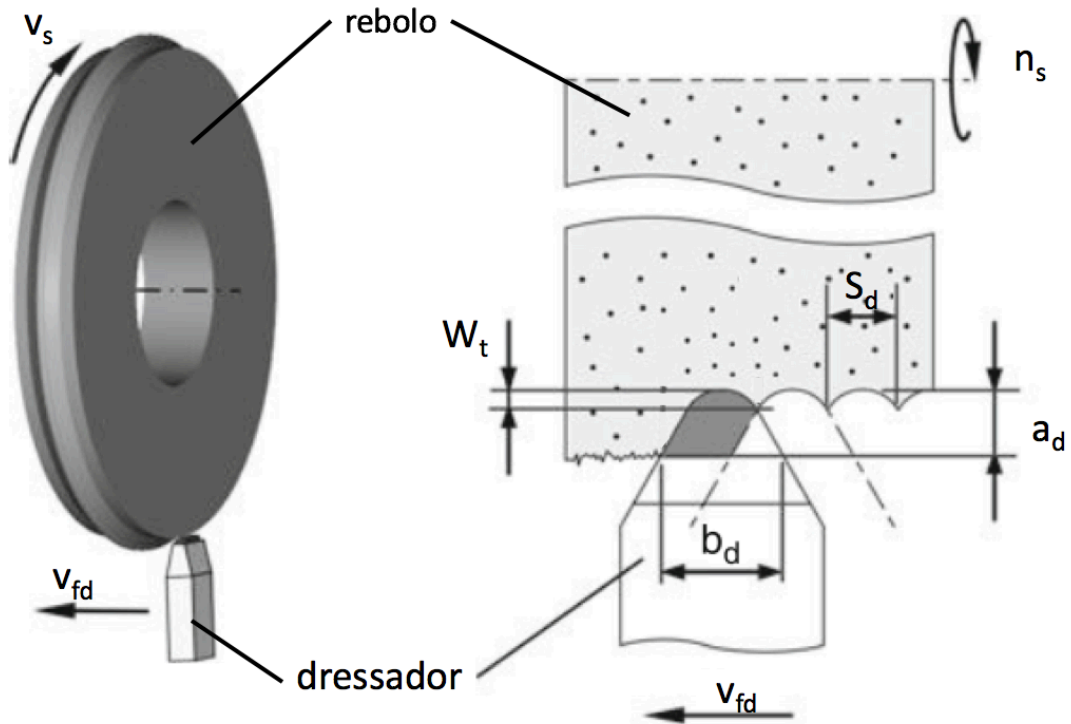


Figura 5 – Procedimento e parâmetros de dressagem (JACKSON; DAVIM, 2011, adaptado)

Onde:

$v_s$  é a velocidade do rebolo;

$n_s$  é a rotação do rebolo;

$v_{fd}$  é a velocidade de dressagem;

$W_t$  é ondulação teórica;

$S_d$  é passo de dressagem;

$a_d$  é a profundidade de dressagem;

$b_d$  é a largura do diamante.

O passo de dressagem  $S_d$  pode ser calculado através da sua relação com a velocidade de dressagem e a rotação do rebolo segundo a equação (8).

$$S_d = \frac{v_{fd}}{n_s} \quad (8)$$

De acordo com JACKSON & DAVIM (2011), os parâmetros mais importantes são a profundidade de dressagem ( $a_d$ ) e o grau de recobrimento do rebo

( $U_d$ ). O grau de recobrimento  $U_d$ , foi definido por KÖNIG & MESSER (1980) como sendo um parâmetro para o controle da operação mecânica de dressagem e é o quociente da largura do diamante  $b_d$  e o avanço por volta  $S_d$ , conforme mostra a equação (9).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (9)$$

Sendo assim, o grau de recobrimento mostra quantas vezes um ponto na face periférica do rebolo é tocado pelo dressador. O limite inferior permitido para o  $U_d$  é 1,0, com o qual cada ponto periférico da roda é tocado apenas uma vez pelo dressador. O grau de recobrimento tem um efeito decisivo na geração da topografia do rebolo. Um  $U_d$  mais alto resulta numa topografia do rebolo mais fina. Por conseguinte, à medida que o  $U_d$  aumenta, as forças de retificação aumentam e a rugosidade da peça de trabalho diminui (JACKSON; DAVIM, 2011).

De acordo com MARINESCU et al. (2007), os valores de grau de recobrimento ( $U_d$ ) utilizados para aplicações gerais são de 2 – 3 para retificação de desbaste, 3 – 4 para retificação mediana e 6 – 8 para retificação de acabamento.

Existem vários tipos de dressagem, entre eles, tem-se a dressagem com corpo rotativo, a laser, eletrolítica, por dressador de ponta única e por um aglomerado de diamantes (MARINESCU et al., 2007).

Os dressadores de aglomerado de diamantes podem apresentar diferentes formas, dimensões e especificações, porém em relação ao dressador de ponta única de diamante, esse tipo de dressador apresenta uma largura ( $b_d$ ) maior, o que permite maiores avanços na dressagem para um mesmo grau de recobrimento.

#### **2.4. Fluidos de corte empregados no processo de retificação**

Os fluidos de corte são aplicados na usinagem dos materiais com o propósito de reduzir o calor na região de corte através da refrigeração, e também de reduzir pela função de lubrificação que o óleo proporciona, os danos dos processos tribológicos que estão sempre presentes na superfície de contato entre a peça e a ferramenta (PAWLAK et al., 2005).

No processo de retificação, o fluido de corte tem três funções principais: a refrigeração da peça, a lubrificação do contato peça/ferramenta e a retirada dos cavacos

gerados no processo, promovendo a limpeza do rebolo. Esses benefícios gerados pelo fluido de corte são reconhecidos em todo setor industrial há alguns anos (EBBRELL et al., 2000).

Além das funções principais, os fluidos de corte também promovem ações anticorrosivas à peça e à máquina ferramenta e consequentemente garantindo maior vida útil das máquinas (STANFORD; LISTER, 2002).

Quando se aplica fluido de corte no processo de retificação, o tipo de refrigerante, sua composição, a posição do bocal e seu projeto, como também a vazão de aplicação são parâmetros que influenciam na qualidade da peça, desgaste do rebolo e consequentemente na produtividade do processo (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999).

BIENKOWSKI (1993 apud IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005), define quatro categorias de fluidos de corte, baseadas em suas composições: sintéticos, semi-sintéticos, óleos emulsionáveis (sintéticos ou minerais) e óleos minerais.

MINKE (1999) em seu trabalho comparou os óleos solúveis, integrais e a base de água para diferentes situações de usinagem. Ele sugeriu que os fluidos a base de água conferem maior efeito refrigerante, porém causam aumento das forças.

Embora o uso de fluido de corte ofereça muitas vantagens à usinagem em geral, há uma série de problemas com sua utilização, problemas esses relacionados ao impacto causado ao meio ambiente, ao impacto econômico e à saúde do operador (TAWAKOLI; HADAD; SADEGHI, 2010). Muitas leis e regulamentos vêm sendo impostos para as indústrias, de forma análoga, a pressão a níveis políticos apoiando o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis faz com que as empresas e os usuários levem em consideração a produção sustentável (JEGATHEESAN et al., 2009).

É visto em estudos de caso que a lubrificação é responsável por uma grande parcela do custo do processo de retificação. Isto ocorre porque o custo envolvido com fluido de corte não é apenas o custo de compra deste, além do custo de compra há também os custos relacionados ao armazenamento, filtragem, custo energético devido ao bombeamento e custo de descarte (SANCHEZ et al., 2010).

#### **2.4.1. Custos dos fluidos**

O custo com fluidos de corte é cerca de 16% do custo total de produção, 4 vezes maior que o custo com ferramentas, conforme ilustra a Figura 6, o que torna o

estudo e a utilização de forma adequada dos mesmos de extrema importância (WALKER, 2013).

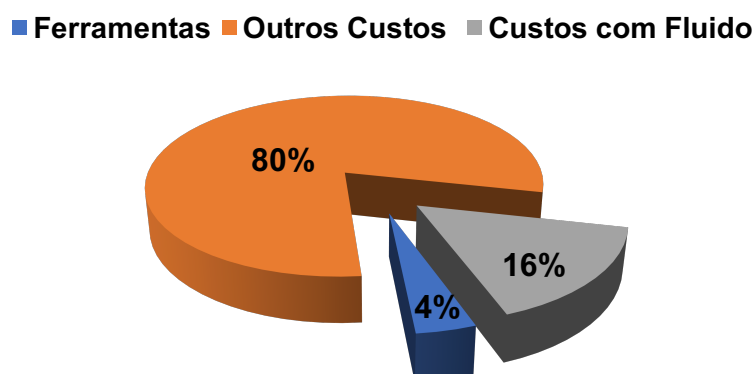


Figura 6 – Custos de produção (WALKER, 2013, adaptado)

Segundo BYRNE & SCHOLTA (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, consumir energia com sistemas que o faça circular na máquina evitando ficar parado, controlar o pH entre outros.

A distribuição dos custos envolvendo os fluidos, aplicados através da técnica convencional, esta disposta na Figura 7.

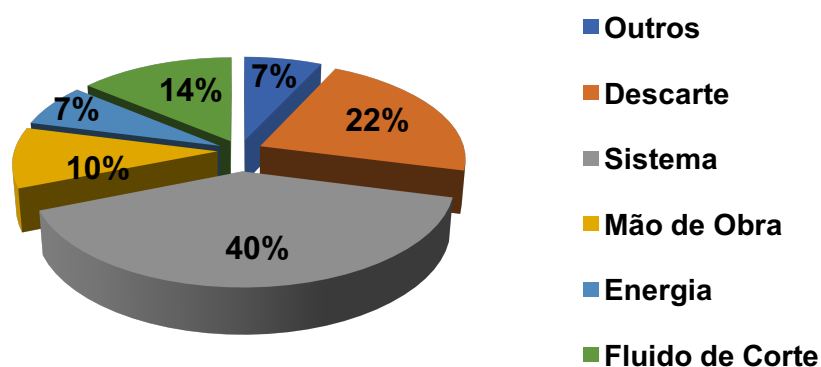


Figura 7 – Porcentagem dos custos com fluido de corte (WALKER, 2013, adaptado)



Como pode-se observar na Figura 7, 40% de todo o custo que envolve fluido de corte convencional é destinado ao sistema de fluido, esse sistema é a filtragem e a refrigeração do fluido de corte, para que ele possa ser reutilizado, 22% é o descarte deste fluido, que é realizado por empresas especializadas no descarte de fluido de corte e apenas 14% do total é o custo envolvido na compra deste fluido.

#### 2.4.2. Problemas causados pelo uso de fluidos de corte

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

Sendo assim, apesar das vantagens tecnológicas que os fluidos de corte promovem, ultimamente vêm sendo questionados os efeitos negativos que eles causam (DHAR; KAMRUZZAMAN; AHMED, 2006).

Os fluidos de corte são formados por substâncias tóxicas que têm a função de garantir maior vida útil de operação aos mesmos. Entre elas, estão dispersantes, anticorrosivos, biocidas e corantes (EVERSHEIM et al., 1994). As pessoas podem entrar em contato com tais substâncias por meio do contato pela pele, pela inalação da névoa de fluidos ou por engolir pequenas partículas, o que pode acarretar em irritação da pele, alergias e distúrbios respiratórios e digestivos (ANON, 2003; BYERS, 2006). A Figura 8a mostra os cuidados que devem ser tomados ao manusear os fluidos de corte, enquanto a Figura 8b mostra uma dermatite de contato alérgico de fluido de corte.



Figura 8 – Problemas e cuidados decorrentes do uso de fluido de corte. Sendo: (a) manuseio do fluido e (b) dermatite causada pelo contato da pele com o fluido de corte.

Os fluidos de corte em operação sempre produzem névoa, fumaça e outras partículas que prejudicam a qualidade do ar (SADEGHI et al., 2009), afetando de forma prejudicial o meio ambiente. Além disso, uma vez usado, o fluido de corte contém pequenas partículas de materiais, como pedaços do rebolo, cavacos e outras impurezas que fazem com que, depois de certo tempo, todo fluido deva ser trocado e descartado, e se esse descarte for feito de forma indevida também é prejudicial ao meio ambiente (IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005).

Além dos vários problemas ocasionados pelos fluidos de corte, já citados, os mesmos são utilizados, em várias ocasiões, de forma errônea, e com alto índice 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. Nem sempre grandes quantidades de fluido implica que ele chegue onde é necessário. Portanto o uso dos fluidos deve ser racional sem agredir o meio ambiente e o operador (EBBRELL et al., 2000).

TAWAKOLI et al. (2007) mostram que uma das estratégias para promover diminuição do uso de fluidos de corte é otimizar a vazão de fluido, situação que ocorre com o uso de algumas alternativas à técnica convencional de lubri-refrigeração, entre elas a da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL).

### **2.4.3. Alternativas à técnica convencional de lubri-refrigeração**

Além de atender os requisitos tribológicos, devido à uma crescente atenção com a preservação ambiental, 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 (SOKOVIĆ; MIJANOVIĆ, 2001).

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 a vazão de fluido, empregar a técnica MQL, aumentar a vida do fluido, usar grafite, resfriamento criogênico, bio-fluidos, usinagem a seco, utilização de nano fluidos e partículas sólidas dispersas em fluidos (TAWAKOLI et al., 2007).

A fim de otimizar a lubri-refrigeração, 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.

De acordo com DINIZ et al. (2008), nos processos convencionais de usinagem, como torneamento, fresamento e furação, já existem tecnologias disponíveis para reduzir o consumo de fluido de corte envolvendo a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) ou até mesmo a usinagem a seco devido aos novos materiais das ferramentas e as condições de usinagem.

No processo de retificação, alta quantidade de calor é gerada devido ao atrito na região de contato, e como os grãos abrasivos convencionais são pobres condutores de calor e os cavacos possuem seções pequenas, grande parte desse calor é transferido para a peça. Isso faz com que altas temperaturas sejam alcançadas e grandes quantidades de calor devam ser retiradas para que não ocorram danos térmicos na peça ou desgaste excessivo do rebolo. Desta forma, grandes quantidades de fluido são usadas para remover grande parte do calor gerado (GU et al., 2004).

Assim, técnicas de retificação que busquem a eliminação ou ao menos a minimização do uso dos fluidos, mantendo a eficiência do processo, estão sendo desenvolvidas e pesquisadas (SANCHEZ et al., 2010).

O processo de retificação a seco 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).

Por outro lado, segundo SREEJITH & NGOI (2000), os rebolos de CBN e de diamante, devido à elevada dureza e boa condutividade térmica deles, favorecem a aplicação na usinagem a seco abrindo caminhos para pesquisas na área.

Pesquisas envolvendo retificação a seco, utilizando rebolos de CBN com redução na camada de abrasivo foram realizadas por TAWAKOLI et al. (2007), e aprofundadas por TAWAKOLI et al. (2012). Destes estudos os autores observaram que com a redução da camada de CBN os danos térmicos surgem somente para uma taxa de remoção de material mais alta, porém os valores de rugosidade aumentam.

As limitações da usinagem a seco podem, segundo SADEGHI et al. (2009), serem superadas pela introdução da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL), técnica bem aceita em usinagem com aresta de corte definida devido à melhor penetração do lubrificante na zona de corte.

#### 2.4.3.1. A técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL)

A mínima quantidade de lubrificante (MQL) é definida como um sistema que emprega pequena quantidade de óleo ( $\leq 200$  ml/h) misturada com ar comprimido e direcionada à região de corte, evitando as inundações de óleo observadas na refrigeração convencional (OBIKAWA; KAMATA; SHINOZUKA, 2006).

Um grande desafio da técnica de MQL está em garantir a eficiência em termos da refrigeração, sendo problemática sua aplicação em situações em que se necessita alta refrigeração (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999). Por outro lado, a técnica promove uma 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 (HAFENBRAEDL; MALKIN, 2001).

KLOCKE et al. (2000) listaram em seu trabalho algumas das vantagens do MQL, sendo elas: a redução do uso de biocidas e fungicidas, a redução no volume de fluido impregnado no cavaco, as peças mais limpas no final da operação, menor manutenção do fluido, além de não necessitar de sistemas para circulação e filtragem do fluido.

CHOI et al. (2002) realizaram um estudo empregando ar frio na técnica MQL e concluíram que a rugosidade das peças retificadas utilizando o ar frio alcançariam níveis melhores do que aquelas peças que foram usinadas com fluido abundante. Além disso, as tensões residuais diminuíram com o aumento da velocidade do ar e que os danos térmicos diminuíram conforme a temperatura do ar diminuiu.

SILVA et al. (2007) compararam desempenho da técnica de MQL com a retificação a seco e também com a técnica convencional, utilizando rebolo convencional de óxido de alumínio. Alguns dos resultados obtidos estão dispostos na Figura 9. As conclusões do trabalho foram que a rugosidade, desgaste diametral do rebolo, as forças e tensão residual foram melhoradas com o uso de MQL devido à melhor lubricidade apresentada por este.

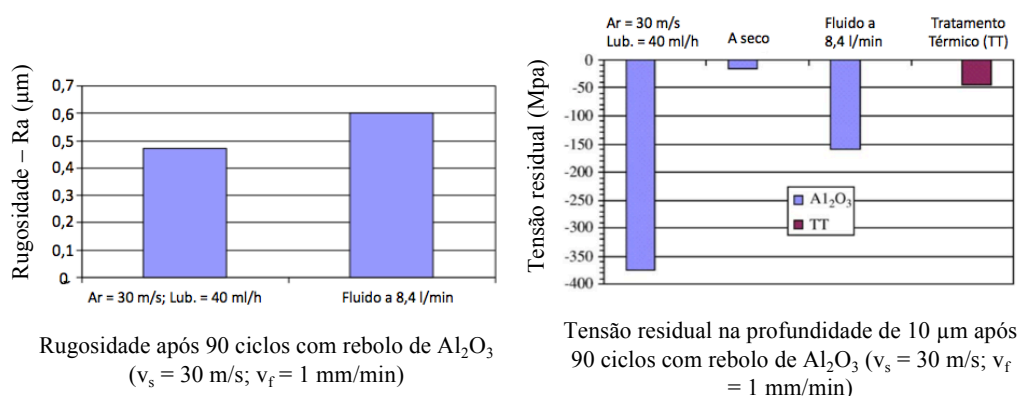


Figura 9 – Valores de rugosidade e tensão residual do trabalho de SILVA et al. (2007)

SANCHEZ et al. (2010) realizaram uma pesquisa na retificação do AISI D2, utilizando um sistema híbrido de técnica de MQL combinada com  $CO_2$  através de dois bocais com o objetivo de congelar o óleo, aplicado por MQL, na superfície de corte do rebolo de alumina. Os resultados de rugosidade superficial encontrados estão dispostos na Figura 10. Os autores concluíram que, mesmo em condições severas, o desgaste do rebolo após a retificação com a técnica híbrida foi menor do que aquele observado com a técnica convencional, as temperaturas da peça com o sistema MQL –  $CO_2$  foram apenas ligeiramente superiores aquelas obtidas via sistema convencional sendo que ambos não apresentaram danos e a rugosidade, conforme ilustrado na Figura 10.

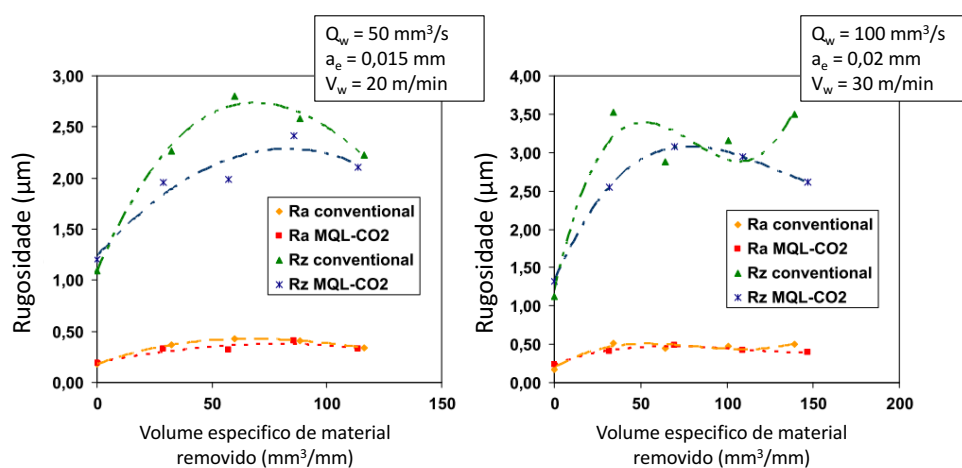


Figura 10 – Valores de rugosidade do trabalho de SANCHEZ et al. (2010)

SILVA et al. (2013) realizaram um trabalho de retificação com aço AISI 4340 e rebolo de  $Al_2O_3$ , e empregaram a técnica de MQL variando as vazões de ar e óleo e concluíram que o uso da técnica de MQL não acarretou em danos térmicos às peças e

apresentou, em algumas condições, resultados de rugosidade ( $R_a$ ) e desgaste do rebolo melhores que os da técnica convencional e da retificação a seco.

Em outro trabalho, BELENTANI et al. (2014) realizaram um estudo utilizando emulsão de água e óleo em várias proporções aplicadas na técnica de MQL durante a retificação cilíndrica externa do aço AISI 4340 com rebolo de CBN. Alguns dos resultados obtidos por estes autores estão dispostos na Figura 11. Notou-se desta figura que com o aumento na quantidade de água os resultados de rugosidade e desgaste diametral do rebolo melhoraram, situando-se em níveis inferiores aos apresentados após o uso da técnica convencional, já os resultados de potência aumentaram com o aumento na quantidade de água, porém eles se mantiveram em níveis inferiores aos apresentados pela técnica convencional.

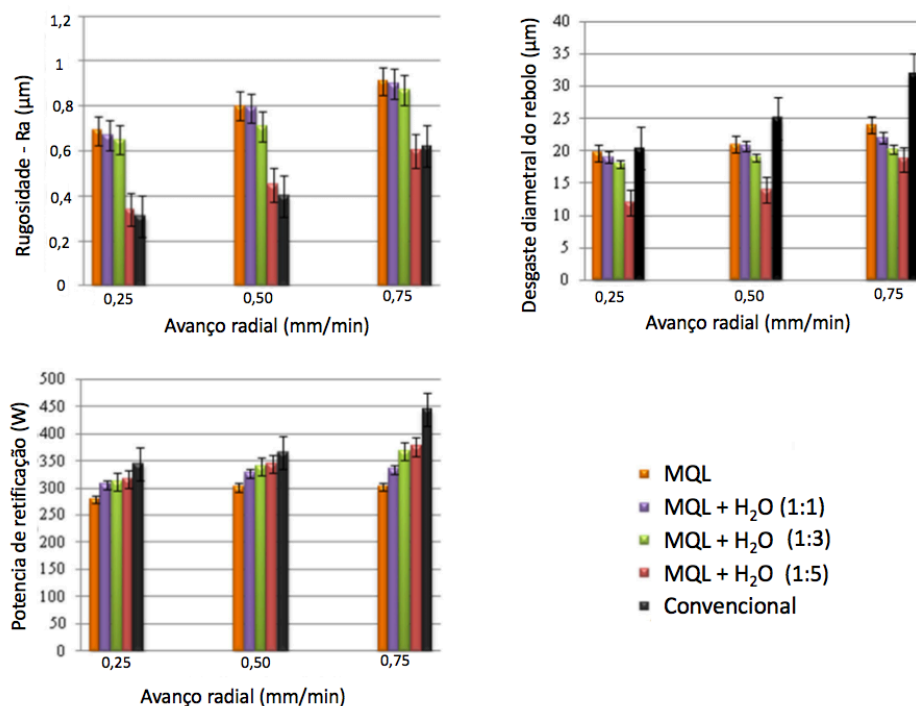


Figura 11 – Valores de rugosidade, desgaste diametral do rebolo e potência de retificação do trabalho de BELENTANI et al. (2014)

Segundo MACHADO & DINIZ (2000), para utilizar o sistema de MQL deve-se ter sistemas adicionais para o transporte dos cavacos e um sistema de exaustão eficiente, além de proteções e sistema de vedação para evitar que a névoa saia da região da máquina. O ruído do sistema de ar comprimido também excede o normalizado e implica na necessidade de utilização de abafadores ou protetores auriculares.

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. A eficiência na lubrificação da técnica MQL faz com que o cavaco deslize mais facilmente na superfície da ferramenta e promova melhor acabamento superficial. Contudo, em determinadas situações podem ocasionar o entupimento dos poros do rebolo, resultando em maior frequência de dressagem.

## **2.5. Limpeza da superfície de corte do rebolo**

A técnica de lubri-refrigeração MQL é baseada no princípio da entrega de fluido (óleo) que é atomizado por um jato de ar comprimido. O óleo é responsável pela lubrificação enquanto o ar pelo resfriamento. No entanto, esta configuração de MQL convencional não tem apresentado resultados satisfatórios no que diz respeito à limpeza da superfície de corte do rebolo, uma vez que alojam-se nos poros do rebolo uma mistura de óleo e cavacos provenientes da usinagem, causando o entupimento dos poros do rebolo e aumentando a rugosidade superficial e o desgaste do rebolo (BARROS et al., 2014).

### **2.5.1. Fenômeno do empastamento**

Quando a energia na interface rebolo/peça gera um aumento na temperatura, há 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 (WANG et al., 2000).

De acordo com CAMERON et al. (2010), o fenômeno do empastamento do rebolo ocorre 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.

Este fenômeno foi detalhado e ilustrado por OLIVEIRA (2011) conforme segue na Figura 12.

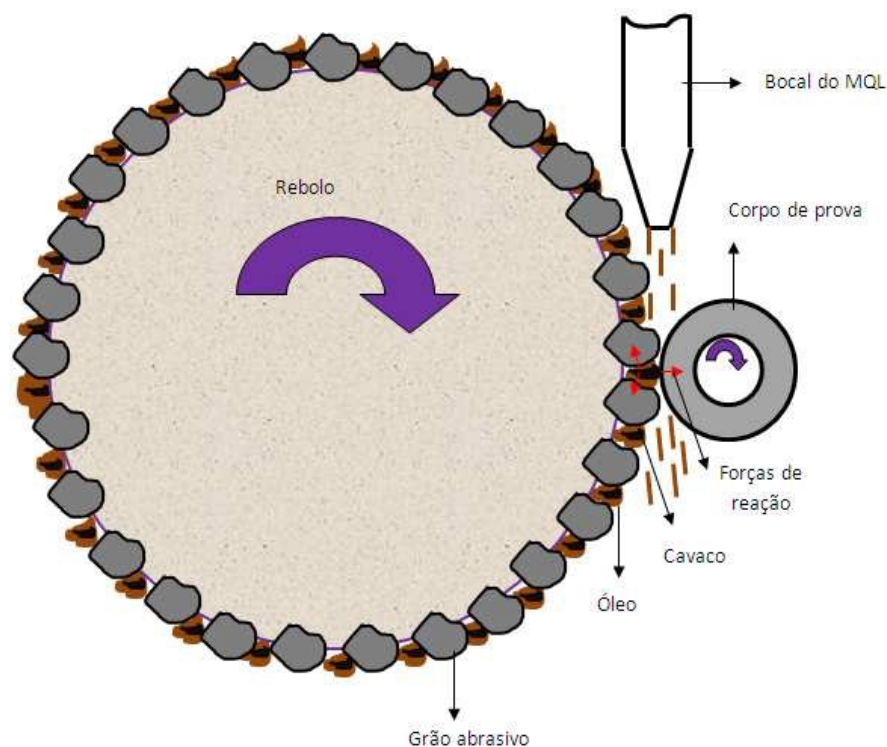


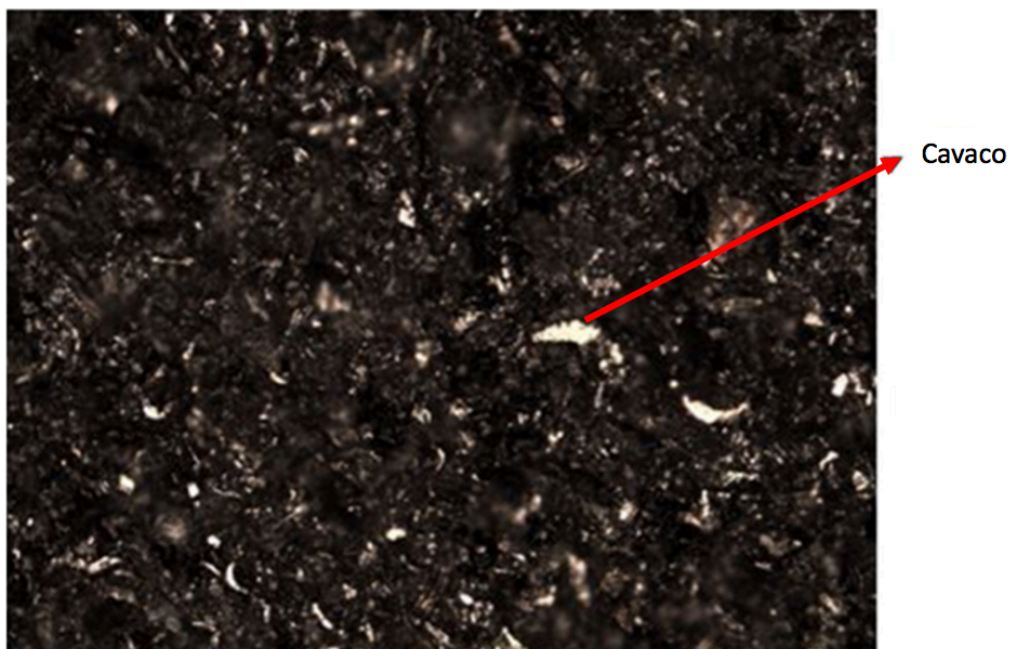
Figura 12 – Fenômeno do empastamento do rebolo (OLIVEIRA, 2011)

SINOT et al. (2006) relatam em seu trabalho que certas ligas, caracterizadas de difícil usinabilidade, como ligas de titânio, 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 acentuado e alguns rebolos estão sujeitos a entupir mais e outros menos.

Ainda de acordo com SINOT et al. (2006), existem 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 com maior frequência, o que aumenta o custo do processo.

BARROS et al. (2014) em seu trabalho apresentam uma imagem da superfície do rebolo de CBN obtida via microscópio óptico com aumento de 100x (Figura 13). Nesta figura é possível observar que os cavacos se alojaram nos poros.





*Figura 13 – Superfície de corte do rebolo com cavacos alojados entre os poros  
(BARROS et al., 2014)*

### **2.5.2. Sistemas que promovem a limpeza do rebolo**

JACKSON et al. (2007) utilizaram um feixe a base de laser de dióxido de carbono para efetuar a limpeza da superfície de corte do rebolo, cujo o esquema é ilustrado na Figura 14. O laser passa por uma lente convexa e irradia na superfície do rebolo com grande quantidade de energia capaz de cortar o rebolo, removendo grãos abrasivos e cavacos aderidos. Segundo os autores, 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. Ao ajustar 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.

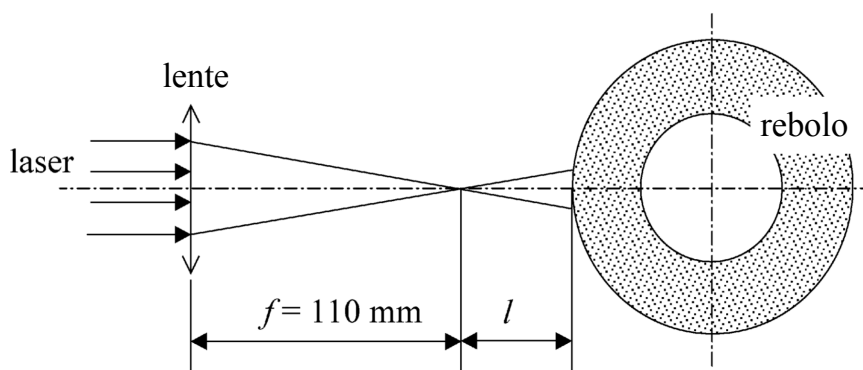


Figura 14 – Limpeza a laser da superfície de corte do rebolo (JACKSON et al., 2007, adaptado)

WEBSTER (2008) descreve uma avaliação em uma fábrica de eixos cames, onde um jato separado de alta pressão foi adicionado ao processo de retificação para limpar o rebolo. Com a utilização desse sistema, o fabricante reduziu as inspeções de defeitos, economizando US\$ 300.000,00 (dolares americanos) por ano com mão-de-obra e consumo de materiais.

CAMERON et al. (2010) estudaram a limpeza da superfície de corte do rebolo utilizando um sistema secundário de fluido de corte (composto por bomba e bocal de aplicação) durante a retificação de aço com rebolo de alumina utilizando a técnica convencional de lubri-refrigeração. Os resultados obtidos para a energia específica em função da velocidade e da vazão do sistema de limpeza estão dispostos na Figura 15, onde pode-se observar 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, e a vazão de 14,9 l/min foi apontada como melhor opção. A conclusão obtida foi que o cavaco aderido à superfície de corte do rebolo causava aumento das forças e queima da peça.

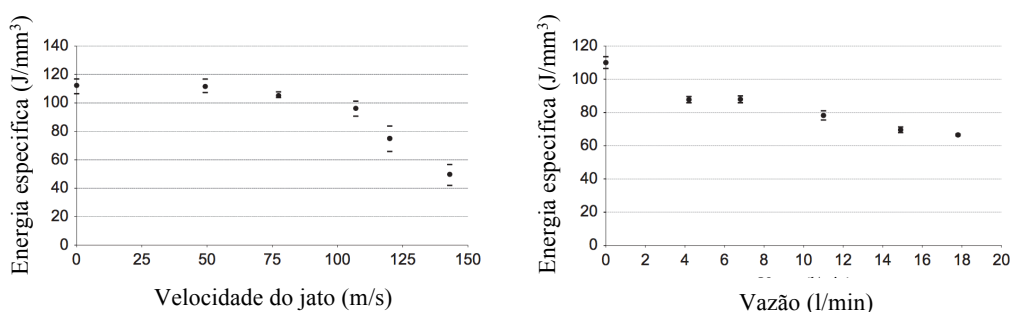


Figura 15 – Resultados de energia específica em função da velocidade e da vazão do jato (CAMERON et al., 2010)

Outro tipo de sistema utilizado para efetuar a limpeza da superfície de corte do rebolo, é o sistema de limpeza por ar comprimido, já utilizado em conjunto com a técnica de lubri-refrigeração por MQL (OLIVEIRA et al., 2012).

### **2.5.2.1. Limpeza do rebolo por ar comprimido**

LEE et al. (2002), em seu trabalho com retificação de canais em peças de carboneto de tungstênio (M50), utilizaram um jato de ar comprimido como alternativa para impedir o fenômeno do empastamento do rebolo, pois, segundo os autores, o ar incide no rebolo e retira boa parte das impurezas que aderiram à ferramenta, sendo que quanto menor a pressão do ar, menor seu efeito de limpeza. Eles concluíram que é possível diminuir o desgaste do rebolo e 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.

OLIVEIRA et al. (2012) utilizaram um sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo por ar comprimido em conjunto com a técnica de lubri-refrigeração por MQL durante a retificação cilíndrica externa do aço AISI 4340 com rebolo de CBN, e estudaram o efeito do ângulo de incidência do jato de ar comprimido na limpeza. O efeito do sistema de limpeza proposto pelos autores está disposto na Figura 16, onde pode-se observar o jato de limpeza removendo os aglomerados de cavacos da superfície do rebolo. Os resultados obtidos por eles para a rugosidade superficial ( $R_a$ ) e os desvios de circularidade estão dispostos na Figura 17, através da qual é possível observar que os melhores resultados para ambas variáveis foram encontrados após a retificação com o jato de limpeza disposto a  $30^\circ$ . Eles concluíram desse trabalho que a técnica de MQL combinada com o jato de limpeza por ar comprimido, com o bocal a um ângulo de incidência de  $30^\circ$ , promoveu uma limpeza eficiente e melhores resultados para quase todas as variáveis analisadas comparadas com a técnica convencional e especialmente com o MQL convencional.

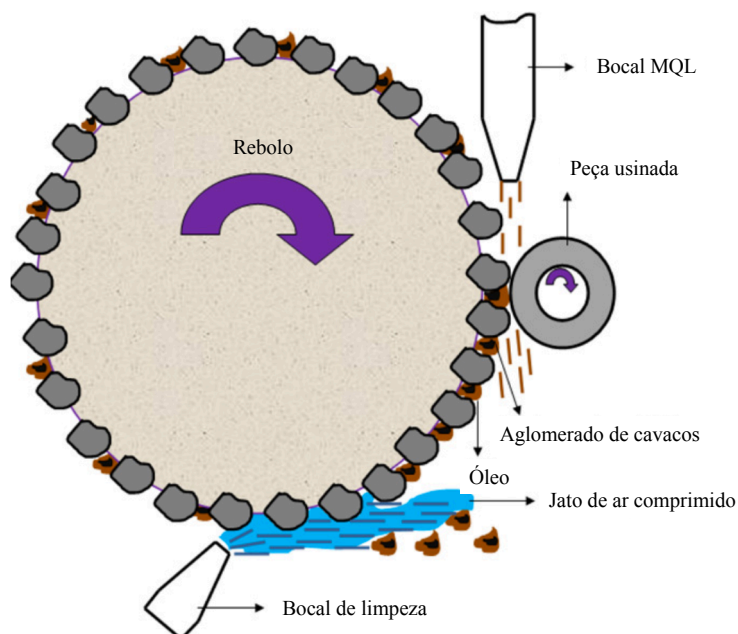


Figura 16 – Efeito do jato de ar comprimido na limpeza do rebolo (OLIVEIRA et al., 2012, adaptado)

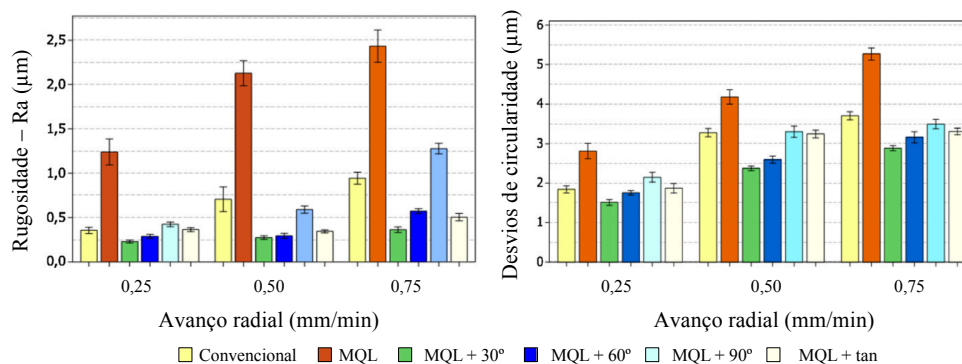


Figura 17 – Valores de rugosidade e desvios de circularidade do trabalho de OLIVEIRA et al. (2012)

BARROS et al. (2014) realizaram um estudo comparando três técnicas de limpeza da superfície de corte do rebolo, utilizando jato de ar comprimido (ângulo de incidência de 30°), bloco de teflon e uma haste abrasiva de alumina, durante a usinagem de aço AISI 4340 com rebolo de CBN. Os resultados obtidos por eles para rugosidade, desgaste diametral do rebolo e potência de retificação estão dispostos na Figura 18, onde é possível observar que dentre as técnicas de limpeza utilizadas a que apresentou os

melhores resultados foi o jato de ar comprimido com o bocal a um ângulo de incidência de 30°.

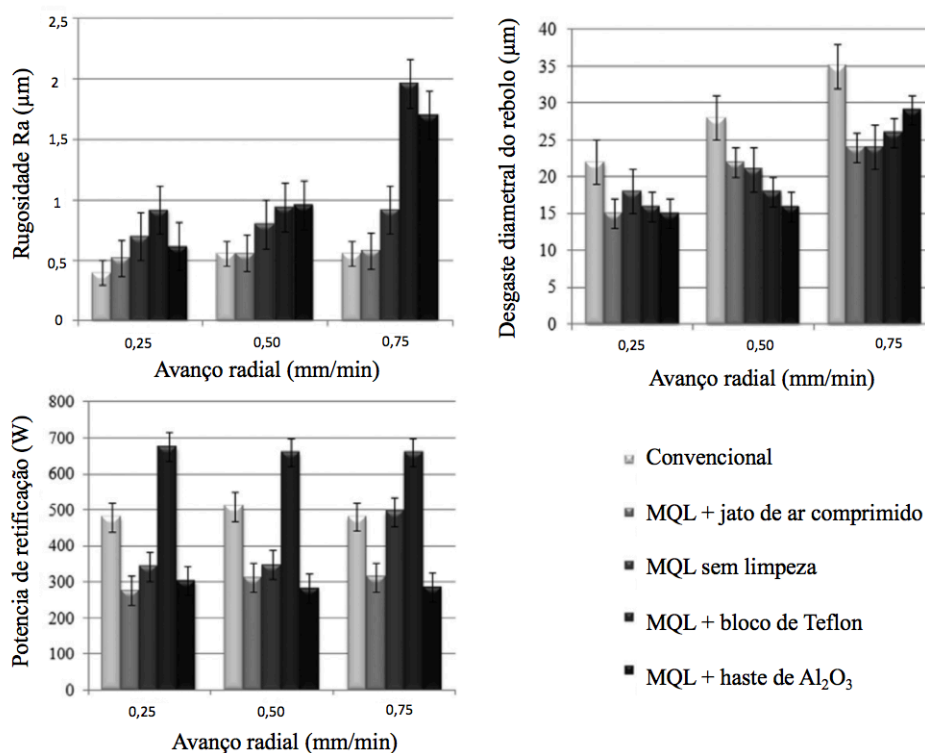


Figura 18 – Valores de rugosidade, desgaste diametral do rebolo e potência de retificação obtidos e apresentados por BARROS et al. (2014)

RUZZI et al. (2016) aplicaram a técnica de limpeza apresentada por OLIVEIRA et al. (2012), com ângulo de incidência de 30°, junto com a técnica MQL, utilizando emulsões de água e óleo em várias proporções, apresentada por BELENTANI et al. (2014), durante a retificação externa do aço AISI 4340 com rebolo de CBN. Os resultados obtidos por eles para a rugosidade, desvio de circularidade e desgaste diametral do rebolo, estão dispostos na Figura 19. É possível observar que, como esperado, o uso do sistema de limpeza melhorou significativamente os resultados e que a proporção de água de 1:5 proporcionou resultados superior às demais proporções ou até mesmo ao MQL puro, alcançando resultados próximos aos da técnica convencional.

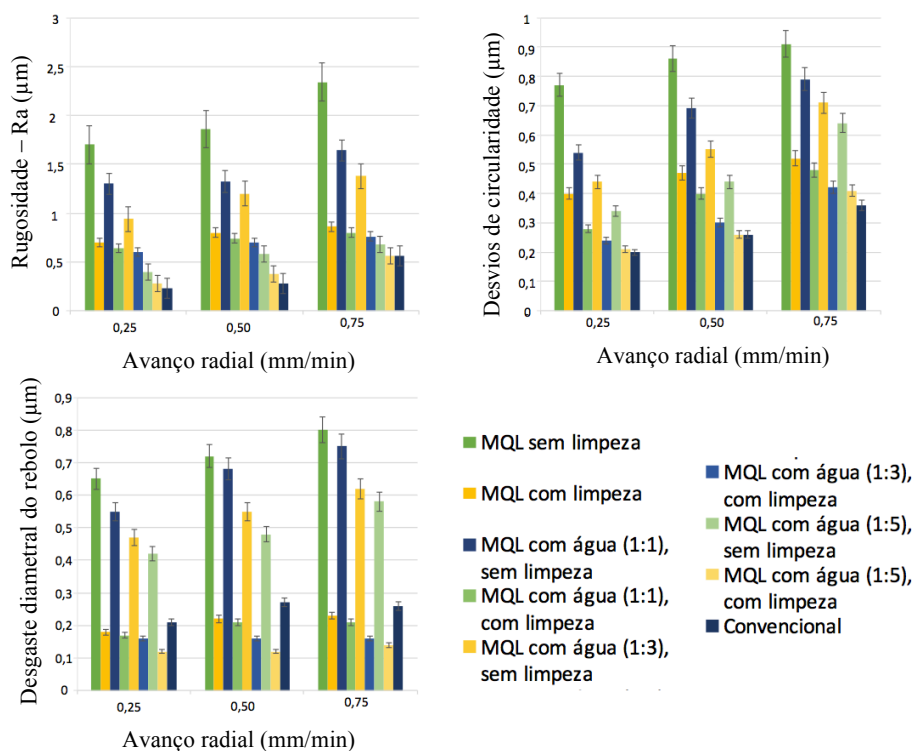


Figura 19 – Valores de rugosidade, desvios de circularidade e desgaste diametral do rebolo do trabalho de RUZZI et al. (2016)

## 2.6. Parâmetros para avaliar eficiência do processo de retificação

A análise dos resultados, bem como o entendimento e a comparação das técnicas de lubri-refrigeração estudadas tem como base as variáveis de saída do processo, pois a interação singular entre o grão abrasivo e a peça possui uma influência direta na modelagem de tais variáveis, tais como o consumo de energia e rugosidade (HECKER et al., 2007). Os parâmetros que utilizados na pesquisa e apresentados na sequência são: a rugosidade, os desvios de circularidade, o desgaste diametral do rebolo, a potência de retificação, a microdureza e as análises de micrografia.

### 2.6.1. Rugosidade

A qualidade superficial pode ser dividida em dois aspectos: a integridade superficial, que é influenciada pelas solicitações mecânicas e térmicas que a peça é submetida e a textura da superfície que é caracterizada pela topografia da peça, e esta está associada à rugosidade da mesma (MALKIN; GUO, 2008).

A rugosidade é definida como o desvio da forma geométrica ideal da superfície, ou seja, um conjunto de irregularidades (erros microgeométricos) encontradas na peça, e não surpreendentemente, está intimamente relacionada com a espessura de cavacos não cortados (MARINESCU et al., 2007).

Um dos parâmetros de rugosidade mais utilizado é a rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) que é definida como a média aritmética do desvio do perfil de rugosidade em relação à linha média (MAYER; FANG, 1993).

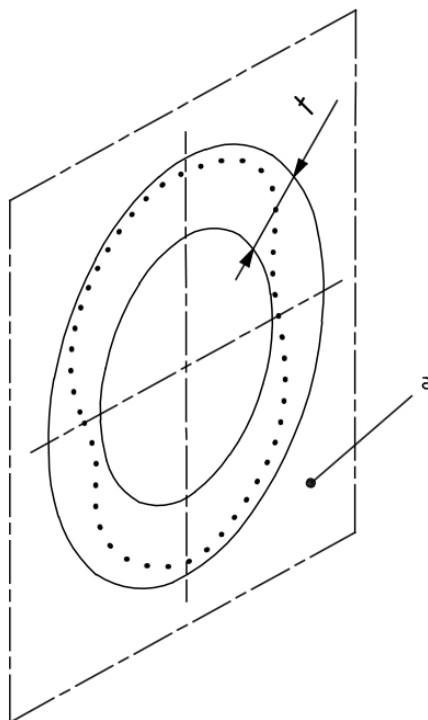
De acordo com PUERTO et al. (2013), o processo de retificação é indicado especialmente para operações de acabamento em materiais endurecidos a fim de se obter baixas rugosidades superficiais ( $R_a$  0,1  $\mu\text{m}$  a 1,6  $\mu\text{m}$ ) e estreitas tolerâncias.

Em geral, a rugosidade gerada da peça de trabalho depende da combinação de três fatores: o rebolo, o processo de dressagem e o processo de retificação (PUERTO et al., 2013). Sendo assim, essa variável é influenciada pelo tipo de grão do rebolo, o tamanho da malha do rebolo e o diâmetro da ferramenta, tipo de dressador e grau de recobrimento ( $U_d$ ), características estruturais e dinâmicas da máquina, profundidade de corte, velocidade do rebolo e da peça e tipo de lubri-refrigeração (SHAJI; RADHAKRISHNAN, 2003).

### **2.6.2. Desvios de circularidade**

O desvio de circularidade é definido como qualquer diferença entre a peça usinada e a projetada com tolerâncias especificadas (JEDRZEJEWSKI; MODRZYCKI, 1997). De acordo com CHO & TU (2001), o desvio de circularidade é baseado na distância entre dois limites circulares concêntricos extremos para abranger o pico mais alto e o vale mais baixo do perfil.

De acordo com a norma ISO 1101:2012, o desvio de circularidade é uma característica tolerada, e é considerada correta quando o perfil está confinado entre dois círculos concêntricos de modo que a diferença de raios seja igual ou menor que o valor da tolerância especificada. A localização dos centros destes círculos e o valor dos seus raios devem ser escolhidos de modo a que a diferença de raios entre os dois círculos concêntricos seja o menor valor possível (Figura 20).



*Figura 20 – Desvio de circularidade de acordo com a norma ISO 1101:2012, onde “a” é qualquer seção transversal e t é o desvio de circularidade.*

A geometria produzida em uma superfície retificada depende das características do rebolo, do material usinado e dos parâmetros utilizados no processo (SHAJI; RADHAKRISHNAN, 2003).

Distorções térmicas do material durante a usinagem são fontes de erro de circularidade, com base nisso, quanto maior o calor na zona de corte maior dilatação e deformações térmicas ocorreram na peça, gerando um aumento nos erros geométricos, especialmente no erro de circularidade. Para que isso seja evitado, uma alternativa é o uso de uma técnica de lubri-refrigeração eficiente (DE METER; HOCKENBERGER, 1997).

### **2.6.3. Desgaste diametral do rebolo**

Para a retificação de precisão utilizando abrasivos convencionais, a vida útil do rebolo ou a necessidade de dressagem são determinadas por forças excessivas e pelo desgaste do rebolo, quer seja pelo desgaste das pontas dos abrasivos pelo atrito com



a peça, por perda de forma devido à fratura dos abrasivos ou devido ao desprendimento dos abrasivos que estão aglomerados no ligante (MALKIN; GUO, 2008).

De acordo com MARINESCU et al. (2007) o desgaste do rebolo durante a retificação influencia no erro de profundidade de corte, ou seja, no tamanho final da peça, no aumento das forças características do processo, na rugosidade, no número de arestas de corte efetivas, entre outros.

De acordo com o trabalho de CHOI et al. (2008) o desgaste do rebolo está primariamente relacionado com a espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ ), onde o aumento dessa espessura promove um aumento no desgaste. Além da maior eficiência do grão abrasivo ser conseguida por meio de uma maior velocidade de corte e pela aplicação de lubri-refrigeração.

#### 2.6.4. Potência de retificação

Segundo MALKIN & GUO (2008), a potência de retificação ( $Pot$ ) é associada à velocidade de corte ( $v_s$ ) e, à velocidade da peça ( $v_w$ ) e à força tangencial de corte ( $F_t$ ) segundo a equação (10).

$$Pot = F_t \cdot (v_s \pm v_w) \quad (10)$$

O sinal positivo indica que  $v_s$  e  $v_w$  têm direções opostas e o sinal negativo indica mesma direção. Entretanto, se  $v_s$  é muito maior que  $v_w$ , a equação da potência pode ser escrita como equação (11).

$$Pot = F_t \cdot v_s \quad (11)$$

A força tangencial ( $F_t$ ) é a componente da força de retificação responsável pela dissipação de potência em situações de alta velocidade do rebolo. Geralmente, a potência associada ao avanço e à velocidade transversal é desprezada (MARINESCU et al., 2004).

#### 2.6.5. Microdureza da peça

O dano térmico é um dos principais fatores que afeta a qualidade superficial e a produtividade no processo de retificação. Assim a maioria dos danos na

retificação tem origem térmica devido às altas temperaturas que causam transformações internas. Como os aços, de modo geral, são retificados após tratamento térmico de endurecimento (tempera e revenimento), a microdureza tende a diminuir próximo à superfície após a retificação devido a um revenimento excessivo que ocorre. Se esse super revenimento ocorrer de maneira intensa, ocorre a formação da chamada queima escura, com dureza inferior à inicial da peça. Por outro lado, se o calor gerado fizer com que a peça atinja sua temperatura de austenitização, pode ocorrer a formação de uma camada branca proveniente de um processo de retempera que ocorre graças ao rápido resfriamento devido ao fluido de corte, formando assim, uma queima caracterizada por valor de dureza superior à inicial (MALKIN; GUO, 2008).

A microdureza é, portanto, uma variável que reforça os resultados da análise microscópica do material. Sendo assim, importante para avaliar as possíveis transformações microestruturais que a peça possa ter sofrido durante o processo, melhorando a análise da integridade da peça.

#### **2.6.6. Análise microestrutural por microscopia óptica**

A integridade de superfícies usinadas vem apresentando crescente importância nos dias atuais. Isso decorre do fato do grande desempenho que é requerido das partes mecânicas de muitas máquinas produzidas (OBIKAWA et al., 2009).

De acordo com MARINESCU et al. (2015), a microscopia óptica pode ser utilizada para investigar a estrutura superficial e também detectar falhas e poros. Esta análise do material é feita após este ter passado pelo processo de usinagem. Assim, é possível analisar as solicitações mecânicas e térmicas que a peça sofreu durante o processo e, então, averiguar sua integridade superficial.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos todos os equipamentos, materiais utilizados nos ensaios, instrumentos de medição, assim como a descrição dos procedimentos durante a experimentação.

#### 3.1. Materiais e equipamentos utilizados

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados para a realização dos ensaios de retificação, sendo estes o material de trabalho, o rebolo e equipamentos.

##### 3.1.1. Material da peça

O material da peça utilizada para a realização dos ensaios foi o aço ABNT 4340. Ele foi devidamente preparado na forma de anel com as seguintes dimensões: diâmetro externo ( $d_w$ ) 54 mm, diâmetro interno 30 mm, espessura 4 mm. Após a confecção, os mesmos foram temperados e revenidos, o que lhes conferiu uma dureza média de  $58 \pm 2$  HRc.

O aço ABNT 4340 é um aço martensítico com alta temperabilidade de baixa liga. Ele é amplamente utilizado na indústria aeronáutica para a fabricação de componentes estruturais, nos quais a resistência é um dos requisitos fundamentais de projeto (TORRES & VOORWALD, 2002). Ele ainda é bastante empregado na fabricação de componentes de máquinas (LEE; SU, 1999). A composição química do aço ABNT 4340 esta apresentada na Tabela 1.

*Tabela 1 – Composição química do aço ABNT 4340 (CALLISTER; RETHWISCH, 2012)*

SAE	C	Mn	P máx	S máx	Si	Ni	Cr	Mo
4340	0,40%	0,70%	0,030%	0,040%	0,25%	1,80%	0,80%	0,25%

##### 3.1.2. Retificadora cilíndrica externa

Nesta pesquisa foi realizado o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho. Para isso, utilizou-se a retificadora cilíndrica externa de mergulho marca

Sulmecanica, modelo RUAP 515 H equipada com CNC com processador Fagor para o acionamento do eixo “X”.

A ferramenta de corte empregada nesta pesquisa foi o rebolo do tipo convencional de óxido de alumínio branco ( $Al_2O_3$ ), fabricado pela empresa Saint Gobain (Norton), o qual possui a especificação 38A 150 L 6 V, com dimensões de 355,6 mm de diâmetro externo ( $d_s$ ), 25,4 mm de largura e 127 mm de furo. Ele possui liga vitrificada, dureza média, uma estrutura mediana e grão de tamanho médio. Esse rebolo é recomendado para a usinagem de aços ligados e alguns aços sensíveis a queima de retificação.

### 3.2. Parâmetros de corte e planejamento dos ensaios

Para a realização dos ensaios foi elaborada a matriz de experimentos conforme ilustra a Figura 21.

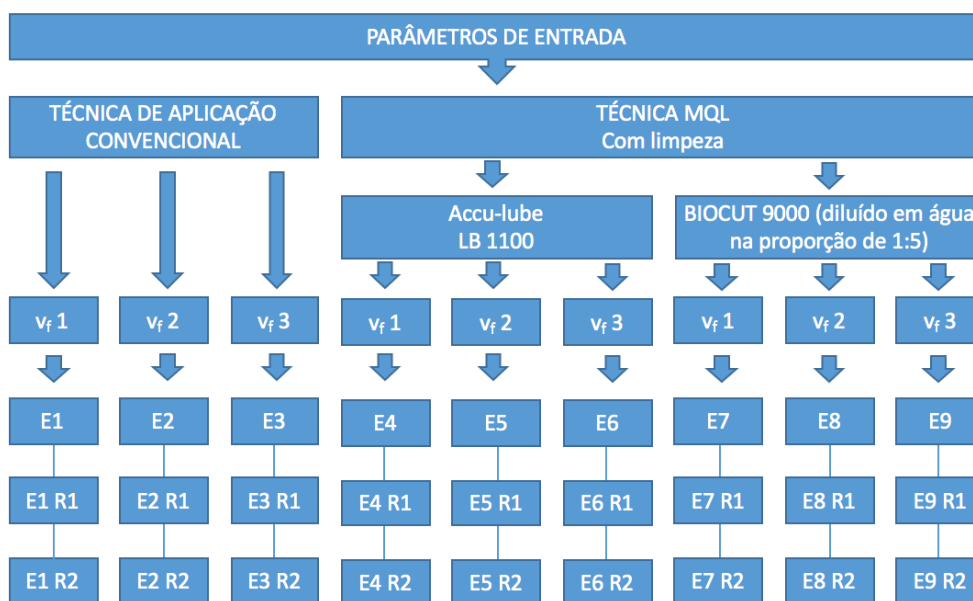


Figura 21 – Matriz de experimentos

O procedimento seguido para a execução de cada ensaio esta ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 22



*Figura 22 – Planejamento dos ensaios*

O parâmetro de entrada variável foi o avanço radial ( $v_f$ ), tendo sido utilizado os valores de 0,25; 0,50 e 0,75 mm/min, que resultaram nos seguintes valores de taxa de remoção de material específica ( $Qw'$ ): 45,55; 91,10 e 136,66 mm<sup>2</sup>/min, respectivamente, e de espessura equivalente de corte ( $heq$ ): 0,0253, 0,0506 e 0,0759  $\mu$ m.

Para cada condição ensaiada foram realizadas duas réplicas, conforme consta na Figura 21, sendo assim, ao todo foram realizados 27 ensaios, cada ensaio consistiu de 50 ciclos de retificação, sendo que cada ciclo consistiu no avanço diametral de 0,1 mm com respectiva velocidade de mergulho ( $v_f$ ) do ensaio, seguido de um tempo de sparkout ( $t_s$ ) de 7,5. Todos os demais parâmetros foram mantidos constantes de modo a não exercer influência nos resultados obtidos, os valores destes parâmetros estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis de entrada no processo de usinagem

PARÂMETRO	VALOR ADOTADO
Rotação da peça ( $n_w$ )	81 rpm
Velocidade da peça ( $v_w$ ) (inicial)	0,2460 m/s
Rotação do rebolo ( $n_s$ )	1637 rpm
Velocidade de corte ( $v_s$ )	30 m/s
Relação de velocidade ( $q_s$ )	120
Avanço radial	0,25; 0,50 e 0,75 mm/min
Avanço diametral por ciclo	0,1 mm
Número de ciclos por peça	50
Volume de material removido ( $z_w$ )	1743,53 mm <sup>3</sup>
Tempo de sparkout ( $t_s$ )	7,5 s

### 3.3. Fluidos de corte e técnicas de aplicação de fluidos de corte

Nesta pesquisa foram utilizadas duas técnicas distintas de lubri-refrigeração, a convencional com fluido em abundancia e a MQL com limpeza da superfície de corte do rebolo por ar comprimido, sendo que foram testados dois tipos de fluidos de corte aplicados por esta última: o LB 1100 (óleo puro) e o BIOCUT 9000 (óleo diluído em água na proporção de 1:5) ambos do fabricante ITW Chemical Products Ltda.

Para a aplicação da técnica convencional foi utilizado um sistema similar ao utilizado em várias empresas atualmente, que consiste essencialmente na caixa reservatória de fluido, bomba de sucção, mangueiras, bocais aplicadores e fluido de corte. O fluido utilizado para esta técnica foi o óleo solúvel semissintético ME-1, fabricado pela empresa Quimatic Tapmatic, diluído em água na proporção de 1:39 conforme as recomendações da própria fabricante. A vazão utilizada para a técnica convencional foi de 17.000 ml/min, com uma pressão de 0,4 MPa.

Já para a aplicação da técnica MQL, utilizou-se um sistema composto basicamente de: compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, aplicador (accu-lube da empresa ITW) 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 0,6 MPa, aproximadamente.

A vazão de fluido empregada no sistema MQL foi de 150 ml/h para ambos os fluidos. 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. Enquanto o controle da vazão do óleo 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 23. O medidor de vazão foi conectado a uma rede de ar comprimido, fornecendo a leitura direta da vazão em  $\text{m}^3/\text{h}$ , 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 162.000 ml/min.

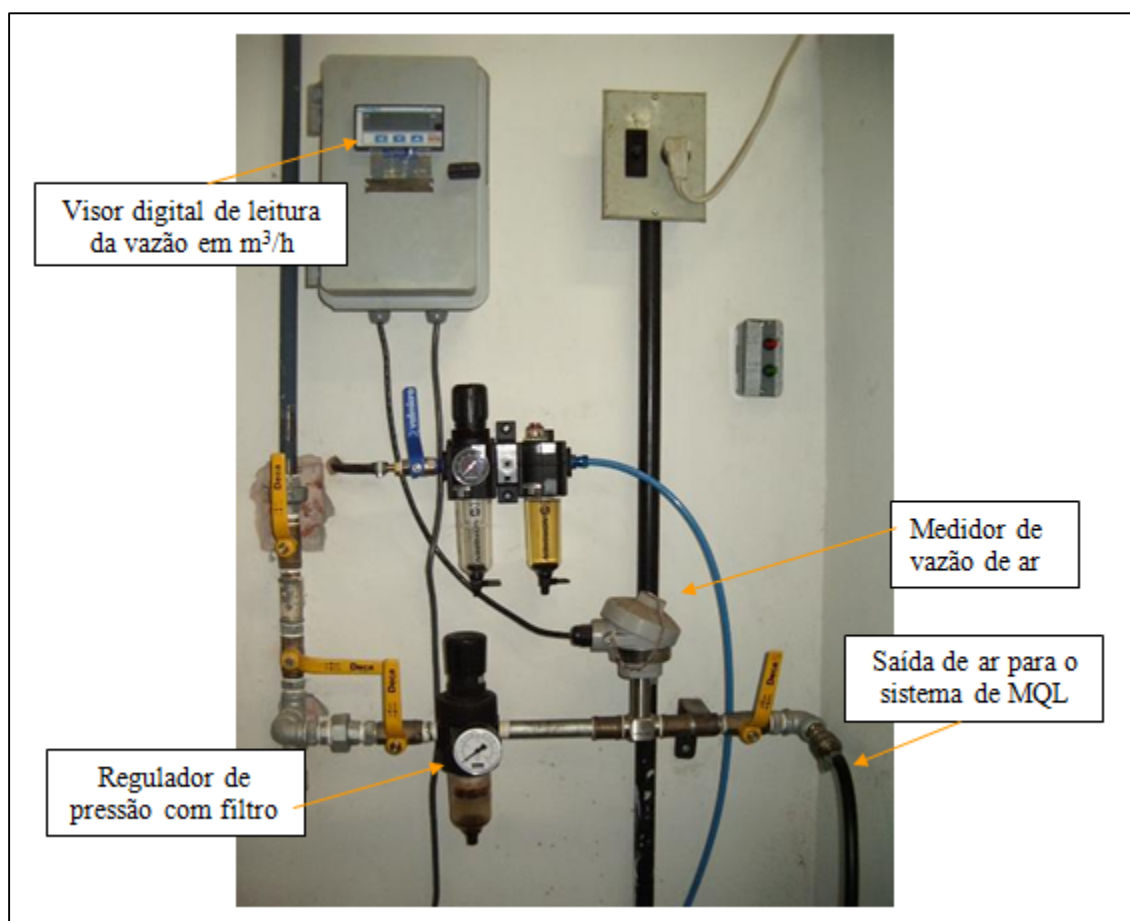


Figura 23 – Sistema de ar comprimido para a técnica MQL (OLIVEIRA, 2011)

Os parâmetros utilizados para as respectivas técnicas de lubri-refrigeração estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições de lubri-refrigeração

Variáveis	MQL	Convencional	MQL + H2O
Fluidos Utilizados	LB 1100	ME – 1	BIOCUT 9000
Vazão	ar – 162.000 ml/min óleo – 150 ml/h	17.000 ml/min	ar – 162.000 ml/min óleo – 150 ml/h
Pressão	0,6 MPa	0,4 MPa	0,6 MPa
Diluição	-	01:39	01:05

Na Figura 24 é apresentado o bocal empregado para a lubri-refrigeração MQL. Este foi o mesmo bocal utilizado por OLIVEIRA et al. (2012), BELENTANI et al. (2014) e RUZZI et al. (2016), o qual foi projetado com dimensões e formas próximas ao desenvolvido por SILVA et al. (2005). 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. Ele 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.

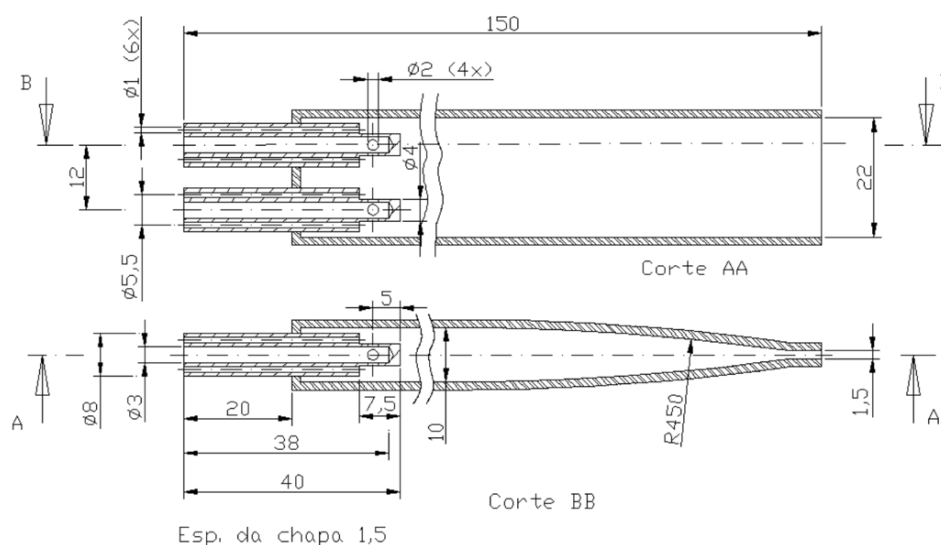


Figura 24 – Projeto do bocal (BELENTANI et al., 2014)



### 3.3.1. Sistema de limpeza por ar comprimido

O sistema utilizado para a limpeza da superfície de corte do rebolo era independente do sistema de MQL e constituído de um compressor, reguladores de vazão e pressão e o bocal de limpeza. Utilizou-se o mesmo bocal e a mesma metodologia de limpeza empregada por OLIVEIRA (2011), com um sistema de ar comprimido independente, porém foi utilizado somente um ângulo de incidência de  $30^\circ$  em relação ao raio do rebolo, ângulo que apresentou os melhores resultados no trabalho de OLIVEIRA (2011) e também foi utilizado por RUZZI et al. (2016).

A localização do bocal de limpeza em relação ao rebolo, ao bocal de MQL e à peça de trabalho esta ilustrada na Figura 25. O bocal 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.

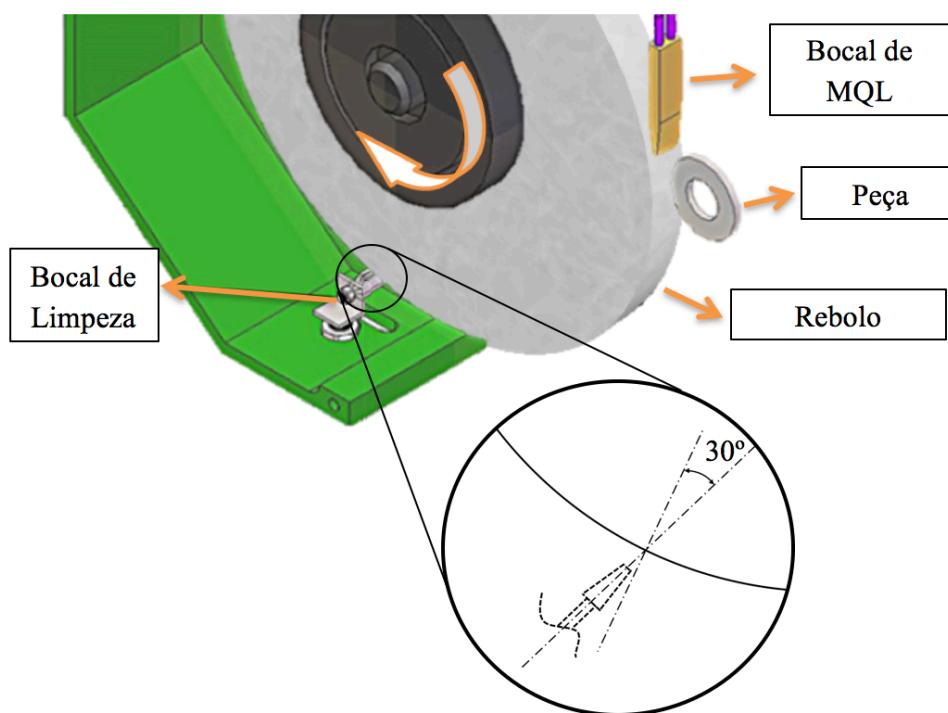
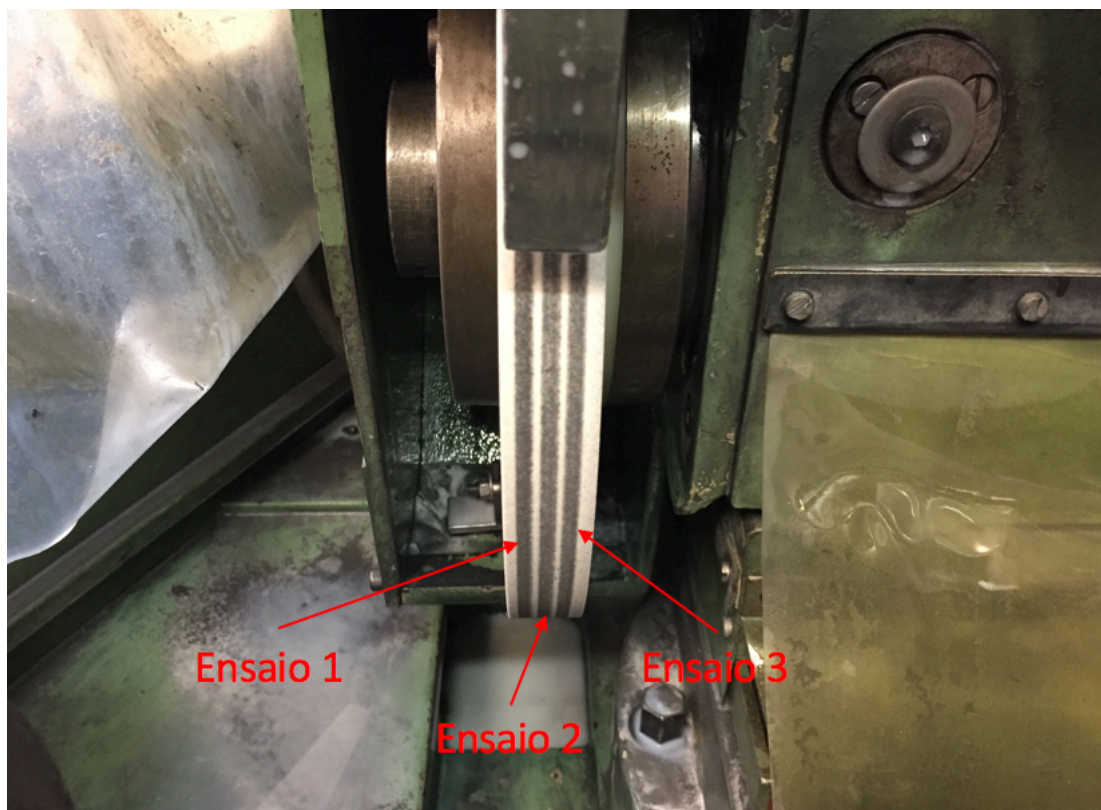


Figura 25 – Posicionamento dos bocais

A vazão e a pressão do ar expelido contra a superfície do rebolo a fim de realizar a limpeza da mesma foram, respectivamente, de aproximadamente 480.000 ml/min e 0,8 MPa, mantidas constantes para todos os ensaios realizados neste trabalho que utilizaram essa técnica.

### 3.4. Dressagem

Sabendo que o rebolo tinha 25,4 mm de largura e o corpo de prova 4 mm, após cada dressagem, foram usinados 3 corpos de prova, um ao lado do outro, ao longo da superfície do rebolo, conforme mostra a Figura 26. Feitos os três ensaios, o perfil do rebolo foi impresso e então o mesmo foi dressado novamente.



*Figura 26 – Regiões do rebolo utilizadas para os ensaios.*

A operação de dressagem do rebolo foi realizada utilizando um dressador do tipo conglomerado, da empresa Master Diamond. Trata-se de um dressador cuja ponta é composta por diamantes em uma matriz metálica, assim conhecida de pastilha. As dimensões da pastilha são 15 mm x 8 mm x 10 mm, com largura de atuação do dressador ( $b_d$ ) aproximado de 1,0 mm, conforme especificado pelo fabricante.

Os parâmetros de dressagem foram: profundidade de dressagem ( $a_d$ ) igual 0,02 mm por passada durante o perfilamento até que toda a camada desgastada fosse eliminada; grau de recobrimento do rebolo ( $U_d$ ) igual 8 (valor adotado visando uma operação de acabamento); avanço por volta ( $S_d$ ) de 0,125 mm (que pode ser calculado a partir da Eq. (9)). Substituindo na equação (8) o valor de  $S_d$  por 0,125 mm e a rotação do

rebolo ( $n_s$ ) por 1637 rpm, obteve-se uma velocidade de dressagem ( $v_{fd}$ ) igual a 200 mm/min. A operação de dressagem foi realizada de forma manual e com fluido de corte aplicado pela técnica convencional de lubri-refrigeração. As condições de dressagem do rebolo foram mantidas constantes a fim de evitar a influencia desta variável no processo de retificação.

### **3.5. Variáveis de saída analisadas na pesquisa e instrumentos de medição**

A metodologia, bem como os equipamentos utilizados para a obtenção das variáveis de saída que foram analisadas no presente trabalho, estão descritos nesta seção.

#### **3.5.1. Rugosidade**

As medições de rugosidade foram realizadas com o uso de um rugosímetro da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic3+. Foram realizadas 5 medidas equidistantes em cada peça da rugosidade média ( $R_a$ ), utilizando um comprimento de amostragem ( $l_e$ ) de 0,25 mm e um comprimento de medição ( $l_m$ ) de 1,25 mm.

Embora, segundo MARINESCU et al. (2007) para a faixa de rugosidade encontrada recomenda-se o uso de um comprimento de amostragem de 0,8mm, a fim de respeitar a recomendação da norma ISO 4288 – 1996 de que o comprimento de medição seja 5 vezes o comprimento de amostragem, ou seja, para um cut-off 0,8 mm precisaria de um comprimento de medição de 4 mm, não sendo possível aplicar devido à espessura do corpo de prova ser 4 mm, sendo assim, adotou-se o comprimento de amostragem de 0,25 mm.

#### **3.5.2. Desvios de circularidade**

Os desvios de circularidade foram obtidos através da utilização de um medidor de circularidade da marca Taylor Hobson, modelo Talyrond 31C. Foram realizadas 3 medidas em cada corpo de prova, sendo uma no centro e as demais 1 mm acima e 1 mm abaixo da primeira, respectivamente.

### 3.5.3. Desgaste diametral do rebolo

Para medir o desgaste sofrido pelo rebolo, foi utilizado o método de impressão do perfil do rebolo desgastado em uma peça cilíndrica de aço SAE 1020, com dimensões de 35 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento, não temperado, devidamente preparado para tal fim. O método consistiu na retificação do corpo de prova, retirando um volume fixo de material (Figura 27a), e posteriormente, medindo os desníveis existentes entre as regiões gastas e não gastas do rebolo que foram repassadas à peça (Figura 27b). Para realizar tal medida foram utilizados o rugosímetro Surtronic3+ e o software TalyMap, ambos da Taylor Hobson, onde pode-se avaliar o desgaste sofrido pelo rebolo através do parâmetro “a” ilustrado na Figura 27c.

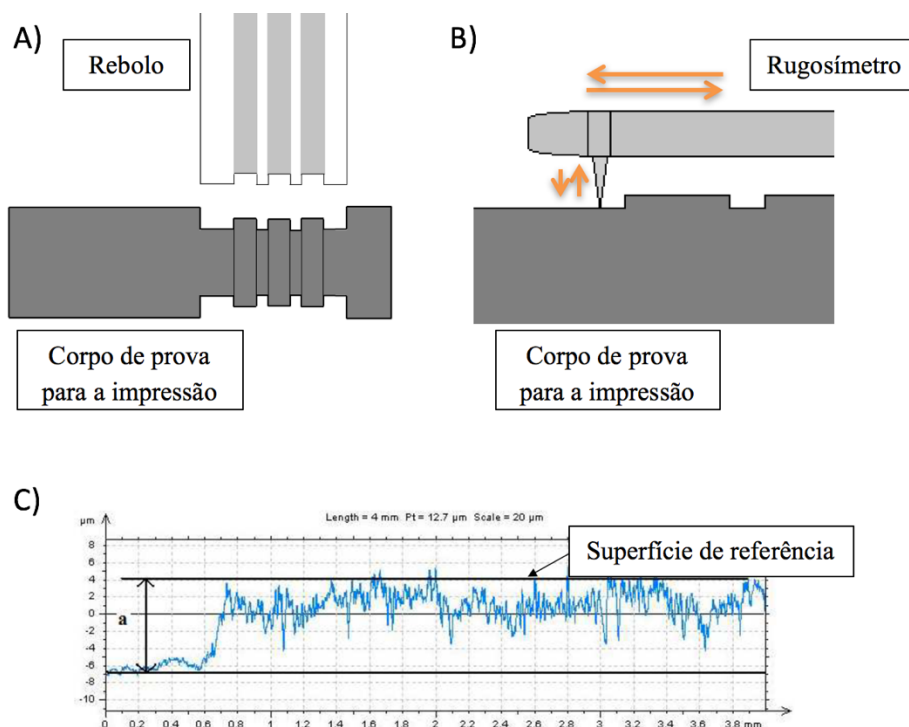


Figura 27 – Medição do desgaste diametral do rebolo

### 3.5.4. Potência de retificação

A potência de retificação foi medida pela determinação da potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo, com o monitoramento dos valores de tensão e corrente elétrica, provenientes deste motor elétrico, conforme ilustrado na Figura 28.



*Figura 28 – Esquema do procedimento utilizado para a medição da potência*

Para realizar o monitoramento da tensão e da corrente elétrica foi utilizado um módulo eletrônico disponível no laboratório, projetado e construído pelo grupo de pesquisa em usinagem por abrasão da Faculdade de Engenharia de Bauru, sob coordenação do Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar. O módulo foi utilizado para transformação dos valores de corrente elétrica e tensão (provenientes do motor) em sinais de tensões compatíveis, para serem enviados a uma placa de aquisição de dados e manipulados pelo programa de aquisição de dados que foi desenvolvido, utilizando-se a placa de aquisição de dados A/D e o software LabView 7.1®, ambos da National Instruments®.

A posterior análise dos resultados foi feita com o auxílio do software MATLAB R2015a da MathWorks, através do qual pode-se converter o sinal obtido em volts para watt, tirar o valor máximo de potência consumida em cada ciclo e fazer uma média dos mesmos para cada ensaio.

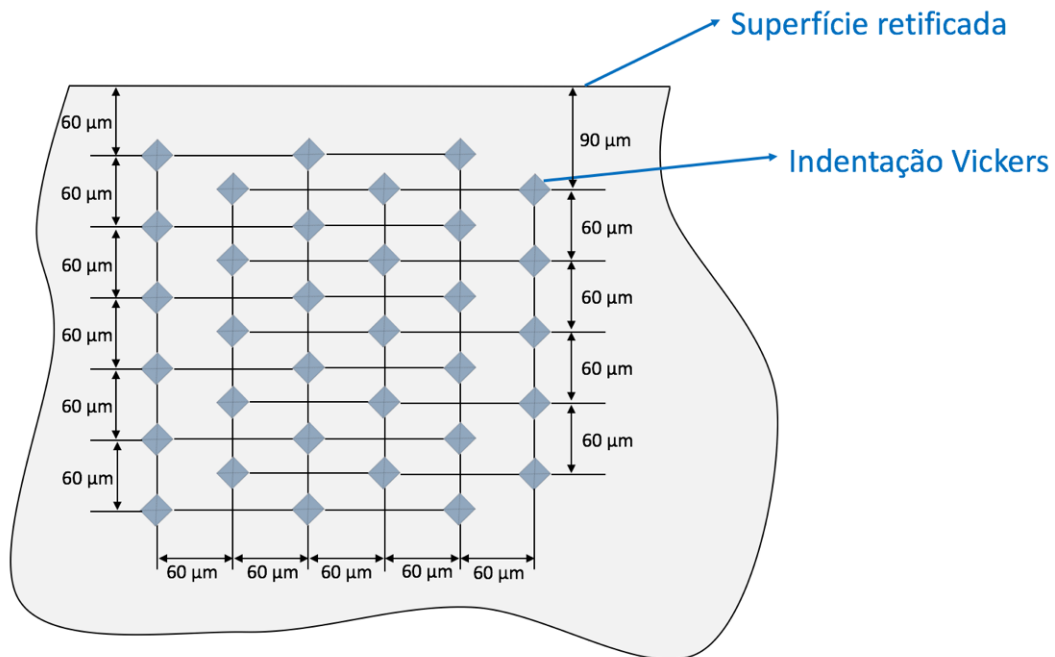
### **3.5.5. Microdureza**

Para a medição da microdureza é necessário realizar uma preparação metalográfica prévia. A preparação consistiu, primeiramente, do corte das peças com uma máquina de corte metalográfico, utilizando-se fluido de corte a fim de não as danificar, e em seguida foram embutidas em uma resina baquelite. Após o embutimento, as amostras passaram por um processo de lixamento, seguindo a sequência de granas mesh: 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1000, 1200 e 1500. Em seguida, as amostras foram polidas utilizando alumina de granulometria de 1  $\mu\text{m}$ .

Para realizar as medidas, foi utilizado um microdurômetro da marca Mitutoyo, modelo HM-200, equipado com objetivas de 10 e 50x e indentador vickers.

Foi utilizada uma carga de 300 g, a qual proporcionou diagonais de aproximadamente 30  $\mu\text{m}$ , estando esta medida dentro da norma ASTM E92, a qual especifica que com o uso de uma objetiva de 50x, a diagonal deve medir 21  $\mu\text{m}$  ou mais.

Ainda segundo a norma ASTM E92, as indentações Vickers devem se distanciar da borda da peça e entre si cerca de 2,5 vezes o valor da diagonal encontrada. Porém, ainda segundo a mesma norma, em algumas situações podem ser utilizados valores menores, sendo assim, a fim de se obter medidas mais próximas da superfície, foi adotado nas medições 2 vezes o valor da diagonal, ou seja, 60  $\mu\text{m}$ , ficando assim distribuídas as indentações conforme ilustrado na Figura 29. Os intervalos de tempo para a realização das medições foram de 4 segundos para a aplicação da carga, 10 segundos de carga aplicada e 4 segundos para a retirada da mesma.



*Figura 29 – Esquema de medição das microdurezas*

Como pode ser observado na Figura 29, foram realizadas 3 medições em cada profundidade para cada corpo de prova, tendo sido realizadas medições 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 e 360  $\mu\text{m}$  distantes da superfície retificada.

### 3.5.6. Microscopia óptica

Para observar se houve alterações microestruturais no material, devido às diferentes condições utilizadas nos ensaios realizados, foram realizadas as análises metalográficas.

Primeiramente, as peças foram preparadas de maneira análoga ao preparo realizado para as medições de microdureza, tendo sido elas cortadas, embutidas, lixadas e polidas, seguindo o mesmo procedimento, ao final do polimento elas foram atacadas quimicamente com reagente Nital 1% por aproximadamente 10 s.

Para realizar as análises metalográficas foi utilizado o microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX5M, equipado com uma câmera e com o software Image Analysis para capturar as imagens das amostras, sendo este também da marca Olympus. Foram feitas aquisições de duas imagens por amostra, sendo uma com 500x de aumento e outra com 1000x.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões dos mesmos para cada condição de retificação utilizada e para cada variável de saída analisada, sendo estas: a rugosidade, os desvios de circularidade, o desgaste diametral do rebolo, a potência de retificação e a microdureza. Além disso foi realizada a análise metalográfica das amostras e obtenção das imagens das sub superfícies usinadas.

Conforme descrito nos procedimentos experimentais, foram comparadas três diferentes técnicas de lubri-refrigeração: convencional; MQL utilizando o óleo LB 1100 puro em conjunto com o sistema de limpeza (MQL) e MQL utilizando o óleo BIO CUT 9000 diluído em água na proporção de 1:5 em conjunto com o sistema de limpeza (MQL + H<sub>2</sub>O (1:5)).

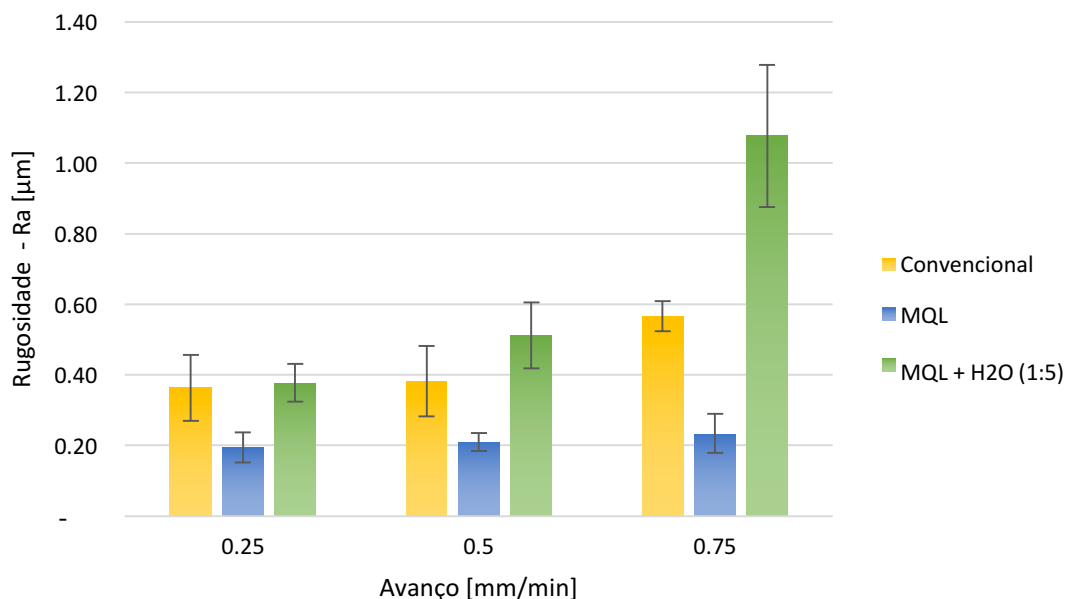
A retificação com a técnica convencional de lubri-refrigeração foi utilizada como referência nas discussões por se tratar de uma técnica já consolidada e amplamente aplicada nas indústrias.

Os resultados para as variáveis analisadas estão dispostos em forma de gráficos, contento a média das medições com seus respectivos desvios padrão (+1 e -1 do desvio padrão da média). O intervalo de confiança calculado entre +1 e -1 do desvio padrão da média contém aproximadamente 68% dos casos.

### 4.1. Rugosidade

Na Figura 30 são apresentados os valores de rugosidade média (Ra) do aço ABNT 4340 obtidos após a retificação sob as três técnicas de lubri-refrigeração analisadas e em função das três velocidades de mergulho ( $v_f$ ).





*Figura 30 – Rugosidade média (Ra) em função do avanço para as diferentes técnicas lubri-refrigerantes*

Como é mostrado na Figura 30, os valores de rugosidade média (Ra) aumentaram com o aumento do avanço radial, como esperado, independente da técnica de lubri-refrigeração empregada. Isso ocorre pelo fato de que quanto maior o avanço radial, maior e mais rápido será o avanço do rebolo contra a peça, o que resulta em uma maior quantidade de material sendo removida da superfície da peça em uma mesma unidade de tempo (maior  $Q_w$  e  $h_{eq}$ ). A rugosidade também aumenta pelas maiores forças de corte produzidas pelo avanço mais rápido que fazem com que ocorram vibrações, que por sua vez prejudicam o acabamento superficial (SOHAL; SANDHU; PANDA, 2014).

Observando a Figura 30, verifica-se que a técnica de lubri-refrigeração por MQL, utilizando o óleo puro com o sistema de limpeza do rebolo, resultou nos menores valores de rugosidade, enquanto a técnica de MQL, utilizando a emulsão de óleo e água com o sistema de limpeza do rebolo, maiores valores. Já a técnica convencional de aplicação de fluido de corte ocupou uma posição intermediária. Os menores valores de Ra observados após a usinagem com a técnica de MQL com óleo puro em relação à técnica convencional se devem ao fato de que o MQL é capaz de romper a barreira de ar que se forma ao redor do rebolo em rotação, o que não é possível com o uso da técnica convencional devido às baixas pressões de fluido utilizadas (BELENTANI et al., 2014). Assim, o ar comprimido tem uma capacidade de promover uma lubrificação mais efetiva,

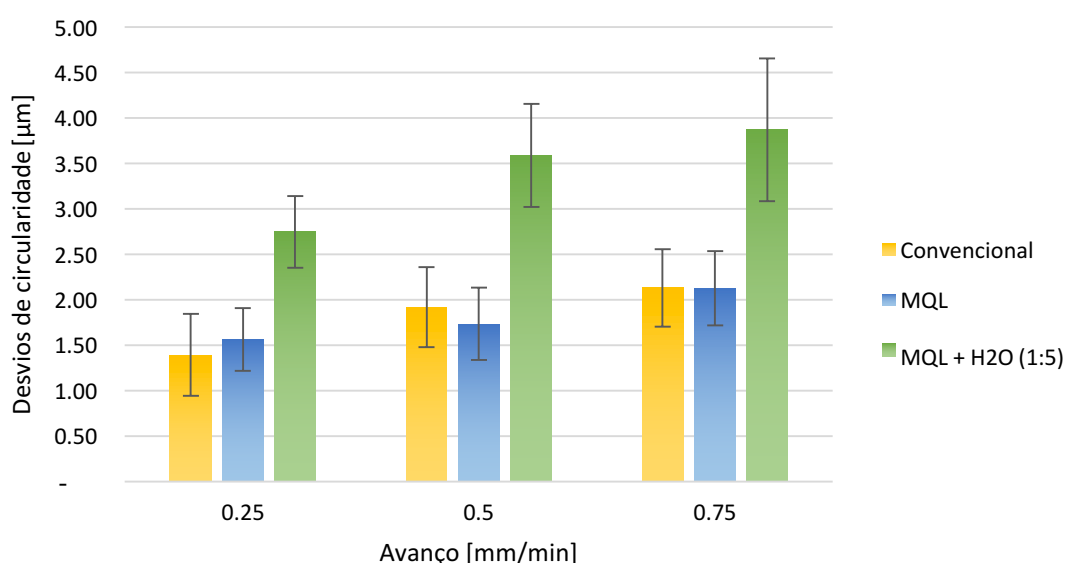
conseguindo entregar o fluido na zona de corte (BELENTANI et al., 2014; RUZZI et al., 2016). Por outro lado, ao contrario do que ocorreu com o uso de rebolos de CBN nos trabalhos de BELENTANI et al. (2014) e RUZZI et al. (2016), a emulsão de água e óleo aplicada na técnica de MQL apresentou o pior resultado, o que pode ser explicado com base nos resultados obtidos por SILVA et al. (2005). Estes autores mostraram o desempenho superior do rebolo de oxido de alumínio perante o CBN com a utilização da técnica de MQL convencional (óleo puro sem limpeza do rebolo), o que atribuíram à melhor capacidade de penetração do lubrificante na zona de corte quando utilizados rebolos convencionais. No trabalho de BELENTANI et al. (2014) os autores atribuíram o melhor resultado do fluido com maior diluição em água à menor viscosidade do mesmo, o que proporcionou, no caso do trabalho com rebolo CBN, uma melhor penetração do fluido na zona de corte. Contudo, como o óleo puro é capaz de chegar à zona de corte com o uso do rebolo de  $Al_2O_3$ , a maior diluição, neste caso, só prejudicou a lubrificação do contato peça/ferramenta.

O uso da técnica de MQL com óleo puro e sistema de limpeza melhorou significativamente o acabamento superficial das peças, sendo que para o avanço radial de 0,25 mm/min diminuiu o valor médio da rugosidade de 36 para 19  $\mu m$  (aproximadamente 47%), enquanto para a situação mais severa a diminuição foi maior ainda, de 0,57 para 0,23  $\mu m$  (aproximadamente 60%). Embora os valores médios da rugosidade após a usinagem com a técnica de MQL com óleo puro e limpeza do rebolo apresentaram uma tendência de aumentar com o avanço radial, esta tendência foi bem menor do que para as demais técnicas analisadas, podendo-se afirmar que estatisticamente não se obteve diferenças significativas, isso segundo OLIVEIRA (2011) se deve ao fato de que com maior avanço radial, se obtém uma maior espessura de corte equivalente, o que gera um cavaco maior, que com o sistema de limpeza é removido mais facilmente, melhorando assim o desempenho deste sistema.

Já com o uso da técnica de MQL com a emulsão de água e óleo e o sistema de limpeza, a tendência de aumento da rugosidade com o aumento do avanço radial foi a mais acentuada. Em relação à técnica convencional, o valor médio da rugosidade apresentou um aumento de aproximadamente 5,5% (não apresentando diferenças estatisticamente significativas) na condição mais branda, avanço radial de 0,25 mm/min, e aproximadamente 89% de aumento na condição mais severa, avanço radial de 0,75 mm/min.

## 4.2. Desvios de circularidade

Na Figura 31 são apresentados os valores dos desvios de circularidade obtidos após a retificação sob as três técnicas de lubri-refrigeração analisadas em função dos três avanços radial ( $v_f$ ). Pode ser observado que os valores dos desvios de circularidade, independente da técnica de lubri-refrigeração empregada, aumentaram com o avanço radial. Isso pode ser explicado pelo aumento na espessura equivalente de corte e na taxa de remoção de material específica que ocorre com o aumento do avanço radial e resulta em uma deterioração do acabamento superficial (SHAW, 1996).



*Figura 31 – Desvios de circularidade em função do avanço para as diferentes técnicas lubri-refrigerantes*

Como pode ser observado na Figura 31, com a utilização da emulsão de óleo e água na técnica de MQL, os desvios de circularidade apresentados pelas peças foram maiores, devido à uma baixa lubrificação como já citado. A melhor lubrificação do óleo puro diminuiu a fricção, o que promoveu uma menor geração de calor, que segundo RUZZI et al. (2016) reduz as distorções de origem térmicas e consequentemente os desvios de circularidade. Por outro lado, a melhor capacidade de refrigeração provida pela técnica convencional, de acordo com (BELENTANI et al., 2014), proporciona temperaturas menores na zona de corte, o que minimiza as distorções térmicas, melhorando a precisão dimensional e geométrica, e consequentemente diminuindo os

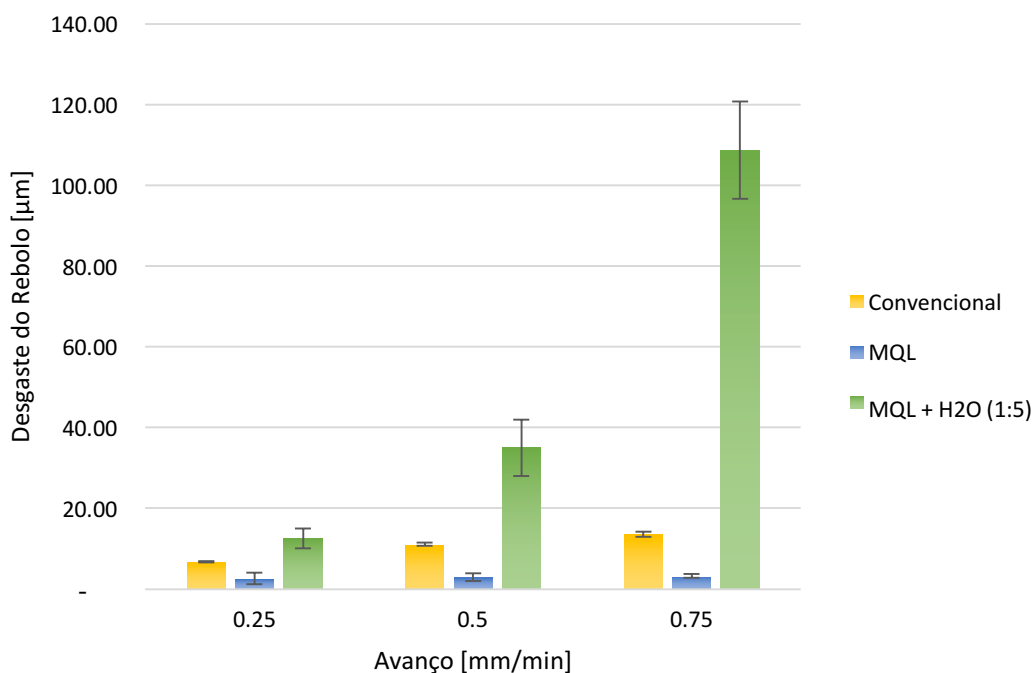
erros de circularidade. Sendo assim, os melhores valores foram apresentados pelas técnicas convencional e MQL com óleo puro e sistema de limpeza, sendo ainda que os resultados dos desvios de circularidade apresentados após o uso destas respectivas técnicas não apresentaram diferenças estatísticas para o mesmo valor de avanço radial.

Já comparando os resultados da técnica de MQL com a emulsão de água e óleo e o sistema de limpeza com os da técnica convencional, o valor médio do desvio de circularidade apresentou um aumento de aproximadamente 98% na condição mais branda, avanço radial de 0,25 mm/min, aproximadamente 87% na condição intermediária, avanço radial de 0,50 mm/min e aproximadamente 82% de aumento na condição mais severa, avanço radial de 0,75 mm/min.

### **4.3. Desgaste diametral do rebolo**

O desgaste do rebolo é basicamente o desgaste devido ao atrito intenso entre os grãos abrasivos e a peça (WANG et al., 2016). Assim, o aumento no efeito da lubrificação, devido ao fluido de corte, reduz o desgaste do rebolo graças à redução do atrito entre os abrasivos e a peça, e dos cavacos com o ligante, o que permite aos grãos abrasivos permanecerem por mais tempo presos ao ligante (MALKIN; GUO, 2008).

Na Figura 32 são apresentados os valores do desgaste diametral medidos no rebolo de óxido de alumínio após a retificação sob as três técnicas de lubri-refrigeração analisadas em função dos três avanços radial ( $v_f$ ). Pode-se observar que o desgaste sofrido pelo rebolo aumentou com o avanço radial para todas as técnicas de lubri-refrigeração empregadas, devido ao aumento da espessura de cavaco equivalente ( $h_{eq}$ ) (CHOI et al., 2008).



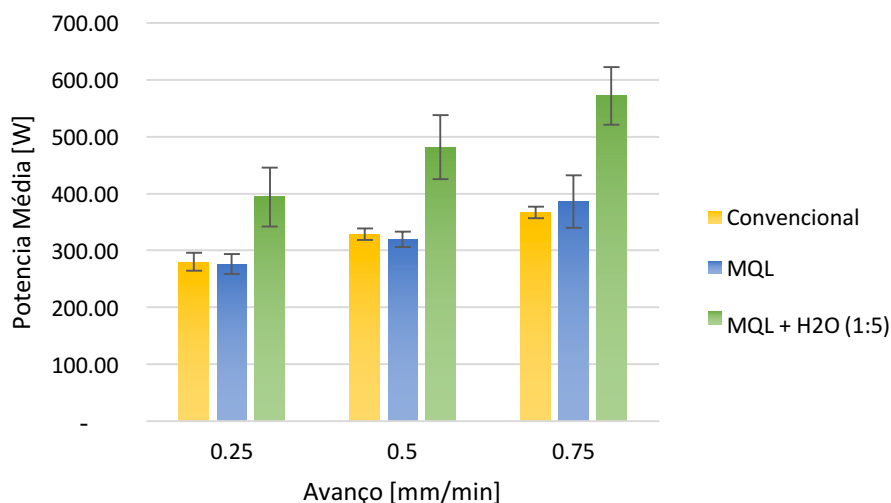
*Figura 32 – Desgaste diametral do rebolo de  $Al_2O_3$  em função do avanço para as diferentes técnicas lubri-refrigerantes*

Na Figura 32, pode-se observar que a melhor função de lubrificação do fluido de corte proporcionada através da técnica de MQL com óleo puro, gerou um menor desgaste do rebolo, sendo este aproximadamente 60% menor do que o apresentado pela técnica convencional após retificação com avanço radial de 0,25 mm/min e 76% menor com o avanço de 0,75 mm/min. Devido à baixa lubrificação provida pela técnica de MQL utilizando a mistura de óleo e água, o desgaste do rebolo ocorreu de maneira mais intensa, sendo que para a situação mais severa, avanço radial de 0,75 mm/min, o desgaste apresentado foi cerca de 8 vezes maior que o apresentado após a retificação com a técnica convencional na mesma situação.

Os piores resultados apresentados pela técnica MQL utilizando água e óleo também podem ser explicados pelo fato de que um atrito maior na zona de corte gera maiores temperaturas, o que ocasiona perdas na força de ligação, e maiores cargas mecânicas, sendo assim acelerando o desgaste do rebolo (MALKIN; GUO, 2008).

#### 4.4. Potência de retificação

Na Figura 33 são apresentados os valores da potência consumida durante a retificação obtidos após a retificação sob as três técnicas de lubri-refrigeração analisadas em função das três velocidades de mergulho ( $v_f$ ).



*Figura 33 – Potência de retificação em função do avanço para as diferentes técnicas lubri-refrigerantes*

Observando a Figura 33, nota-se que a potência consumida aumentou com o avanço radial para todas as técnicas de lubri-refrigeração empregadas, como já era esperado. Devido à baixa lubrificação proporcionada pela emulsão contendo água e óleo aplicada pela técnica de MQL, a potência consumida para a retificação com o uso desta técnica foi maior em todas as situações analisadas.

A potência consumida durante a retificação utilizando as técnicas convencional e MQL com óleo puro foi em média equivalente, não apresentando diferenças significativas. De acordo com BELENTANI et al. (2014), esperava-se que os ensaios de retificação com a técnica MQL exigisse uma potência menor pela capacidade de romper a barreira de ar formada ao redor do rebolo em rotação e assim proporcionar uma melhor lubrificação. Contudo, como observado no trabalho de (OLIVEIRA et al., 2012), uma hipótese levantada pelos autores foi que o jato de ar comprimido do sistema de limpeza com um ângulo de incidência de 30° criou uma força de reação na superfície do rebolo que removeu os cavacos e ao mesmo tempo criou uma componente tangencial dessa força contra a rotação do rebolo, o que aumentou a potência.

#### 4.5. Análise da integridade microestrutural (microdureza e metalografia)

A Figura 34 apresenta os valores da microdureza em função da distância entre a indentação e a superfície retificada ( $\mu\text{m}$ ) para cada avanço radial ( $v_f$ ) analisado, para as peças retificadas com o uso da técnica convencional. Nela estão representadas curvas com os valores de microdureza medidos abaixo da superfície usinada. As linhas tracejadas representam o valor médio de microdureza encontrados para cada amostra na distância de  $360 \mu\text{m}$  da superfície retificada.

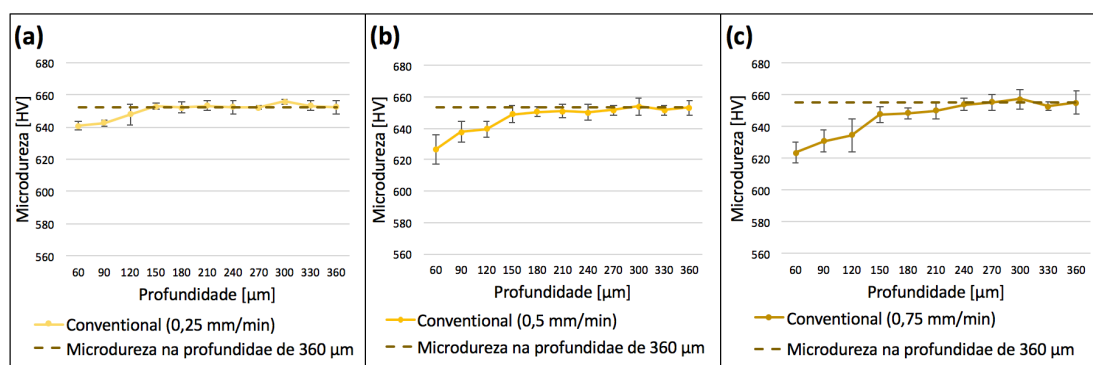


Figura 34 – Microdureza após retificação com a técnica convencional: (a)  $v_f = 0,25 \text{ mm/min}$ ; (b)  $v_f = 0,5 \text{ mm/min}$ ; (c)  $v_f = 0,75 \text{ mm/min}$

Na Figura 34 pode-se observar uma perda na dureza superficial para as três condições de usinagem aplicadas. Esta perda de dureza pode ser associada com os vários ciclos de aquecimento e resfriamento que a superfície retificada foi submetida durante o processo, o que é crucial para definir a microestrutura gerada com dureza inferior à inicial.

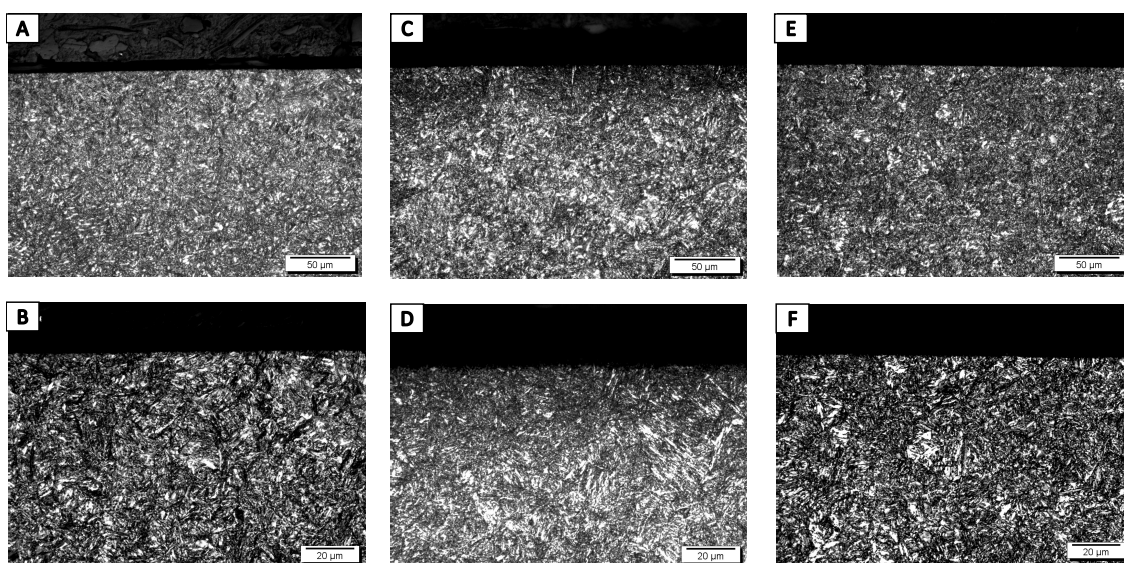
De acordo com MALKIN & GUO (2008), aços endurecidos retificados, mesmo quando nenhuma queima é detectada, apresentam, geralmente, uma diminuição na dureza na superfície usinada, devido ao efeito de super revenimento que ocorre próximo da superfície.

Ainda observando a Figura 34 (a, b e c), nota-se que a perda de dureza na medida mais próxima da superfície ( $60 \mu\text{m}$ ) aumentou com o avanço radial, assim como a profundidade afetada, como era esperado, uma vez que em situações mais severas de usinagem, devido às maiores taxas de remoção, o calor gerado é maior elevando mais a temperatura e acentuando o efeito do super revenimento, informação destacada por MALKIN & GUO (2008). Considerando que não houve dano na profundidade de  $360 \mu\text{m}$ ,

o valor de microdureza encontrado é igual ao inicial de toda a peça, sendo assim, na situação mais branda de retificação, avanço radial de 0,25 mm/min, a microdureza na profundidade de 60  $\mu\text{m}$  diminuiu aproximadamente 1,8%, enquanto na situação mais severa diminuiu aproximadamente 4,8%.

Sendo assim, a partir da Figura 34, pode concluir que em nenhum caso, nas profundidades analisadas, houve queima branca pois, de acordo com MALKIN & GUO (2008), quando ocorre queima na superfície de peças de aços endurecidos, formação de camada branca, a dureza na superfície aumenta, graças a uma austenitização seguida da formação de martensita não revenida, o que não ocorreu em nenhuma situação analisada.

Na Figura 35 pode-se observar as imagens metalográficas com ampliações de 500x (A, C e E) e 1000x (B, D e F) obtidas para as amostras retificadas com o uso da técnica convencional para os valores de avanço radial de 0,25 mm/min (A e B), 0,50 mm/min (C e D) e 0,75 mm/min (E e F).



*Figura 35 – Microestrutura das peças retificadas com a técnica convencional e diferentes velocidades de avanço: (A)  $v_f = 0,25 \text{ mm/min}$  (ampliação de 500x); (B)  $v_f = 0,25 \text{ mm/min}$  (ampliação de 1000x); (C)  $v_f = 0,5 \text{ mm/min}$  (ampliação de 500x); (D)  $v_f = 0,5 \text{ mm/min}$  (ampliação de 1000x); (E)  $v_f = 0,75 \text{ mm/min}$  (ampliação de 500x); (F)  $v_f = 0,75 \text{ mm/min}$  (ampliação de 1000x)*

Pode-se notar que pelas micrografias apresentadas na Figura 35 vão de acordo com os resultados de microdureza apresentados na Figura 34, sendo possível notar



que a Figura 35a, assim como a Figura 35b, apresentam uma microestrutura bem mais homogênea que as demais comprovando assim a menor queda na dureza apresentada nessa condição de usinagem. Da Figura 35d nota-se uma camada mais escura, próxima da superfície, com alguns pontos brancos (carbonetos nos contornos de grão e grãos de ferrita ou bainita), o que pode inferir que houve o super revenimento nesta região da peça, porém com pouca intensidade. Já pela Figura 35f pode-se observar um aumento na quantidade de pontos brancos dispersos na microestrutura, o que é responsável pela maior queda na dureza.

Levando em consideração os resultados dispostos na Figura 34 e na Figura 35, pode-se concluir que embora tenha havido uma pequena queda na dureza próxima da superfície (aproximadamente 4,8% na situação mais severa), esta não foi suficiente para comprometer a qualidade da peça tendo em vista as tolerâncias assumidas.

A Figura 36 apresenta os valores da microdureza em função da distância entre a indentação e a superfície retificada ( $\mu\text{m}$ ) para cada avanço radial ( $v_f$ ) analisado, para as peças retificadas com o uso da técnica de MQL com óleo puro e utilizando o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo. Nela estão representadas curvas com os valores de microdureza medidos abaixo da superfície usinada. As linhas tracejadas representam o valor médio de microdureza encontrados para cada amostra na distância de  $360 \mu\text{m}$  da superfície retificada.

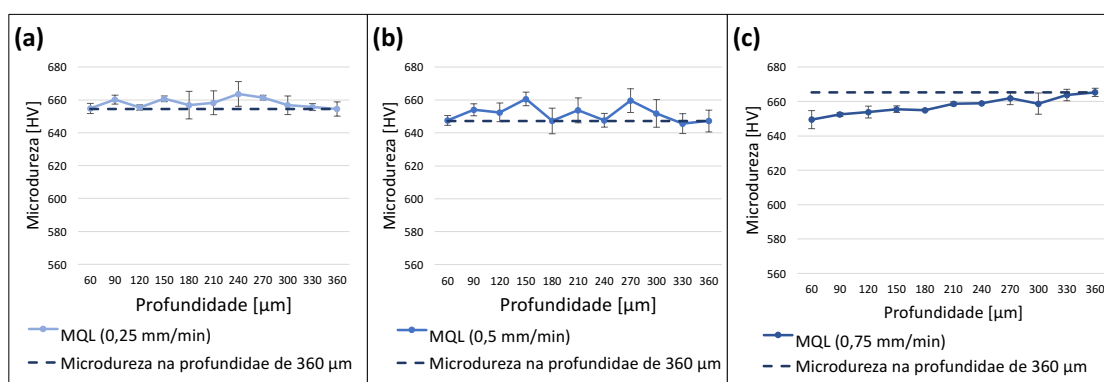
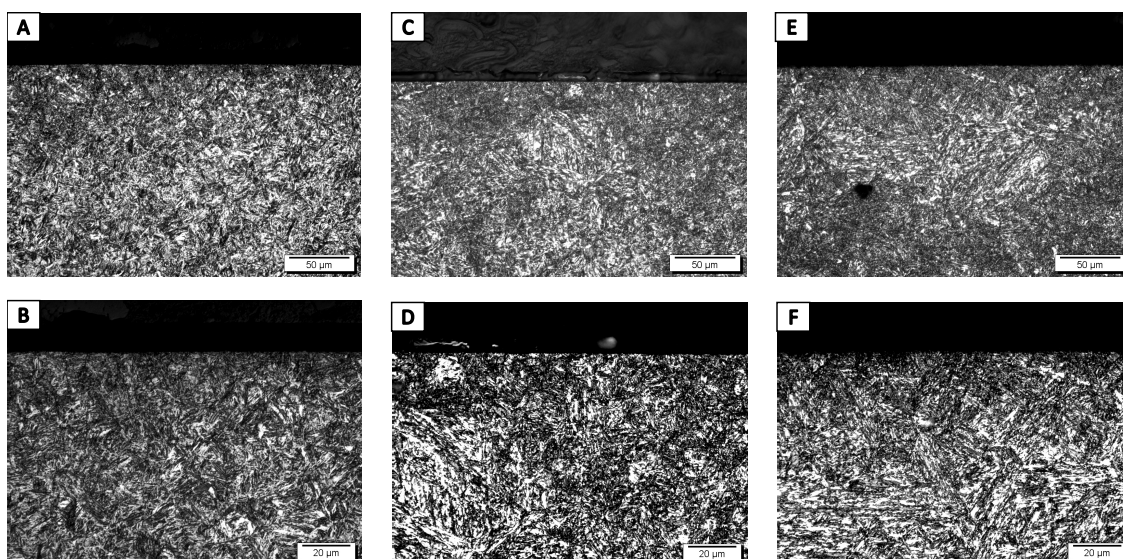


Figura 36 – Microdureza após retificação com a técnica MQL (óleo puro): (d)  $v_f = 0,25 \text{ mm/min}$ ; (e)  $v_f = 0,5 \text{ mm/min}$ ; (f)  $v_f = 0,75 \text{ mm/min}$

Na Figura 36 (a) a (c), pode observar que, para as profundidades analisadas, a única condição que provocou uma queda na dureza foi a condição mais

severa, avanço radial de 0,75 mm/min, Figura 36c, em que se pode observar uma queda de dureza na profundidade de 60  $\mu\text{m}$  em relação à de 360  $\mu\text{m}$  de aproximadamente 2,4%.

Na Figura 37 são apresentadas as micrografias das peças usinadas com a técnica de MQL com óleo puro e sistema de limpeza para os avanços radiais de 0,25 mm/min (A e B), 0,50 mm/min (C e D) e 0,75 mm/min (E e F).



*Figura 37 – Microestrutura das peças retificadas com a técnica de MQL e diferentes velocidades de avanço: (A)  $v_f = 0,25$  mm/min (ampliação de 500x); (B)  $v_f = 0,25$  mm/min (ampliação de 1000x); (C)  $v_f = 0,5$  mm/min (ampliação de 500x); (D)  $v_f = 0,5$  mm/min (ampliação de 1000x); (E)  $v_f = 0,75$  mm/min (ampliação de 500x); (F)  $v_f = 0,75$  mm/min (ampliação de 1000x)*

Da Figura 37 pode-se inferir que todas as estruturas são homogêneas, mas ainda é possível a visualização de uma pequena camada com características diferentes apenas na Figura 37F, próximo da superfície usinada, que é justamente a condição que apresentou uma pequena queda na dureza na profundidade de 60  $\mu\text{m}$ . Por estas imagens é possível comprovar os resultados apresentados na Figura 36, que não houve grande variação na microdureza após a retificação com a técnica MQL com óleo puro e sistema de limpeza.

Comparando os resultados de microdureza apresentados pela técnica convencional (Figura 34) e MQL com óleo puro (Figura 36), é possível notar que a técnica de MQL com óleo puro proporcionou uma menor variação nos valores de microdureza, garantindo integridade superior às peças usinadas nas mesmas condições com a técnica

convencional. Os melhores resultados apresentados pela técnica MQL empregada por MALKIN & GUO (2008), em seu trabalho de retificação foram atribuídos a um menor efeito de super revenimento se devem a um menor efeito de super revenimento, o que cria a hipótese de que a temperatura na zona de corte foi menor após a usinagem com a técnica de MQL com óleo puro em relação à técnica convencional, tal hipótese vai de acordo com os resultados anteriores que mostraram que essa técnica de MQL promoveu uma lubrificação mais eficiente, o que gera menos calor. Desta forma, embora a refrigeração proporcionada pela técnica convencional seja superior, ainda assim, pela lubrificação inferior, as temperaturas alcançadas durante o processo de retificação com a técnica convencional foram maiores do que as alcançadas com a técnica de MQL com óleo puro e limpeza do rebolo.

A Figura 38 apresenta os valores da microdureza em função da distância entre a indentação e a superfície retificada ( $\mu\text{m}$ ) para cada avanço radial ( $v_f$ ) analisado, para as peças retificadas com o uso da técnica de MQL com emulsão de óleo e água na proporção de 1:5 e utilizando o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo. Nela estão representadas curvas com os valores de microdureza medidos abaixo da superfície usinada. As linhas tracejadas representam o valor médio de microdureza encontrados para cada amostra na distância de  $360 \mu\text{m}$  da superfície retificada.

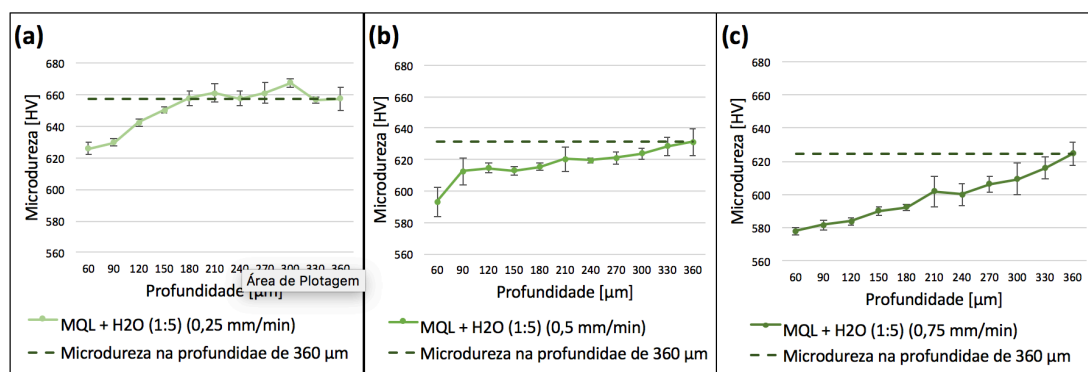


Figura 38 – Microdureza após retificação com a técnica MQL +  $\text{H}_2\text{O}$  (1:5): (g)  $v_f = 0,25 \text{ mm/min}$ ; (h)  $v_f = 0,5 \text{ mm/min}$ ; (i)  $v_f = 0,75 \text{ mm/min}$

Pode-se observar na Figura 38, de maneira análoga à análise da Figura 34, uma perda na dureza superficial das peças mais acentuada para as três condições de usinagem aplicadas. A perda de dureza na medida mais próxima da superfície ( $60 \mu\text{m}$ ) aumentou com o avanço radial, assim como a profundidade afetada, como esperado. A

perda de dureza na profundidade de 60  $\mu\text{m}$  em relação à de 360  $\mu\text{m}$  após a retificação com avanço radial de 0,25 mm/min foi de aproximadamente 4,8%, chegando a aproximadamente 8% quando utilizado o avanço radial de 0,75 mm/min.

Na Figura 39 são mostradas as micrografias para as amostras retificadas com o uso da técnica de MQL com emulsão de óleo e água na proporção de 1:5 e utilizando o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo para os avanços radiais de 0,25 mm/min (A e B), 0,50 mm/min (C e D) e 0,75 mm/min (E e F).

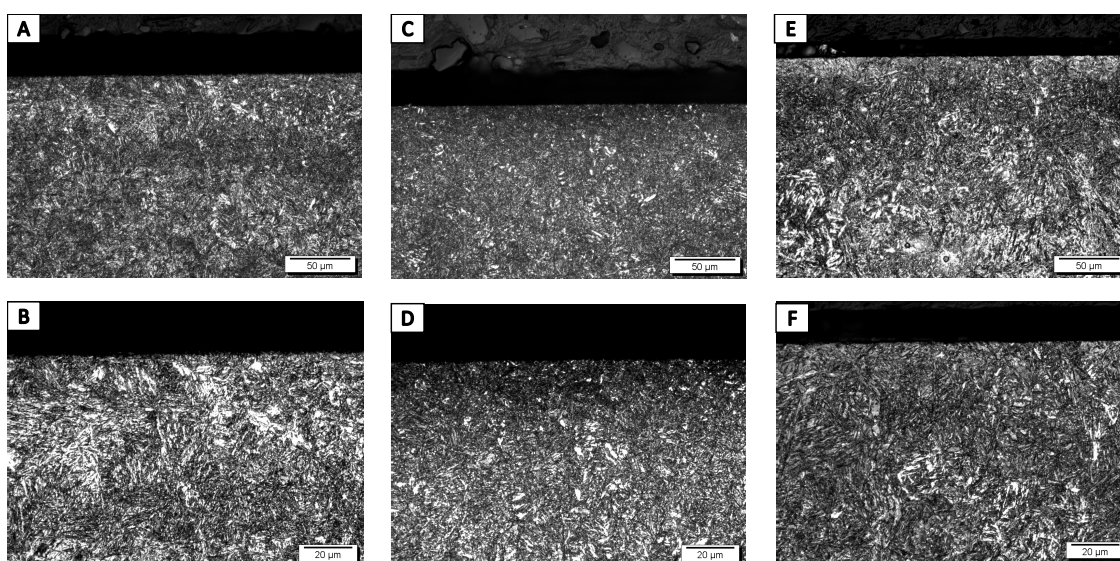


Figura 39 – Microestrutura das peças retificadas com a técnica de MQL +  $\text{H}_2\text{O}$  (1:5) e diferentes velocidades de avanço: (A)  $v_f = 0,25 \text{ mm/min}$  (ampliação de 500x); (B)  $v_f = 0,25 \text{ mm/min}$  (ampliação de 1000x); (C)  $v_f = 0,5 \text{ mm/min}$  (ampliação de 500x); (D)  $v_f = 0,5 \text{ mm/min}$  (ampliação de 1000x); (E)  $v_f = 0,75 \text{ mm/min}$  (ampliação de 500x); (F)  $v_f = 0,75 \text{ mm/min}$  (ampliação de 1000x)

Observando a Figura 39, nota-se que as micrografias apresentadas confirmam a microestrutura esperada após a análise de microdureza pela Figura 38, com uma região heterogênea distinta próxima da superfície. Da Figura 39a, assim como da Figura 39b, observam-se alguns pontos brancos dispersos em uma microestrutura escura próximo da superfície, e que foram em maior número nas Figuras 39 (c) e (d), enquanto que na imagem da Figura 39e é possível, ainda, visualizar próximo da superfície retificada, a uma distância inferior a 60  $\mu\text{m}$  da superfície retificada, o aparecimento de uma região mais clara, possivelmente caracterizadas por queima branca com alta dureza.

Tomando como base os resultados de microdureza dispostos na Figura 38 e as micrografias da Figura 39, pode-se afirmar que as peças retificadas com o uso da técnica de MQL com água e óleo apresentaram uma acentuada ação da temperatura na microestrutura, chegando, na situação mais severa de usinagem (0,75 mm/min), a causar a queima na superfície da peça.

As maiores alterações microestruturais ocorridas nas peças após a retificação empregando-se a técnica de MQL com água mostram que, provavelmente, as temperaturas na zona de corte foram superiores com o uso desta técnica, o que comprova que ela proporcionou uma lubrificação inferior à técnica de MQL com óleo puro e uma refrigeração pior que aquela observada pela técnica convencional.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos após a retificação cilíndrica externa com rebolo convencional de óxido de alumínio do aço ABNT 4340 temperado e revenido, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- A rugosidade média Ra das peças retificadas aumentou com o avanço radial para todas as técnicas utilizadas, sendo que o melhor resultado, para um mesmo avanço radial, foi apresentado pelo uso da técnica de MQL utilizando óleo puro (LB 1100) e o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo, por outro lado, o pior resultado foi apresentado pelo uso da técnica de MQL utilizando óleo (BIOCUT 9000) e água junto com o sistema de limpeza, ficando por fim a técnica convencional em uma posição intermediária.
- Os desvios de circularidade, assim como a rugosidade, aumentaram com o avanço radial, e os valores obtidos após a retificação com uso das técnicas convencional e MQL (óleo puro com limpeza do rebolo) não apresentaram em todas as condições analisadas diferenças significativas, enquanto os apresentados com o uso da técnica de MQL + H<sub>2</sub>O (óleo e água com limpeza do rebolo) foram superiores em todas as condições.
- O desgaste diametral sofrido pelo rebolo também aumentou com o avanço radial e foi menor quando a lubrificação foi mais eficiente, ou seja, com a técnica de MQL (óleo puro com limpeza do rebolo) obteve-se o menor desgaste, seguido pela técnica convencional, e por fim a técnica de MQL+ H<sub>2</sub>O (óleo e água com limpeza do rebolo), sendo que esta última apresentou, na situação mais severa, desgaste 8 vezes maior que a técnica convencional.
- A potência consumida durante a retificação aumentou com o avanço radial e não apresentou diferenças significativas entre as técnicas convencional e MQL (óleo puro com limpeza do rebolo) em todas as condições analisadas. A técnica de MQL+ H<sub>2</sub>O (óleo e água com limpeza do rebolo) consumiu uma potência maior em todas as situações.
- As peças retificadas com as técnicas convencional e MQL (óleo puro com limpeza do rebolo) não apresentaram danos, sendo que o MQL causou, inclusive, menores quedas de dureza superficial, por outro lado, em

condição mais severa a técnica de MQL+ H<sub>2</sub>O (óleo e água com limpeza do rebolo) apresentou danos à peça.

- De modo geral, a usinagem com a técnica de lubri-refrigeração de MQL utilizando óleo puro com o sistema de limpeza da superfície do rebolo foi responsável pelos melhores resultados de retificação utilizando rebolos convencionais de alumina, em todas as condições analisadas, sendo que foi igual ou superior à técnica convencional nas mesmas condições.
- O uso da técnica de lubri-refrigeração de MQL utilizando óleo e água na proporção de 1:5 não repetiu no caso de rebolos de óxido de alumínio os bons resultados apresentados para rebolos de CBN, inviabilizando a sua aplicação nesta situação, devido ao pior desempenho em todas as variáveis analisadas, bem como ao dano ocorrido nas peças retificadas nas condições mais severas.

## 6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de entender melhor os fenômenos de retificação, reforçar as evidências do aprimoramento da lubri-refrigeração MQL e encorajar sua utilização dentro das indústrias, algumas sugestões de trabalhos futuros são apresentadas:

- Medição e análise da temperatura durante a retificação utilizando a técnica de MQL e comparando os resultados com o uso da técnica convencional.
- Verificar o desempenho do método proposto na retificação, utilizando rebolos de CBN em altas velocidades de corte neste mesmo material;
- Investigar o desempenho da técnica MQL + limpeza na retificação de outros materiais como cerâmicas, compósitos e superligas;
- Verificar o desempenho da técnica de lubri-refrigeração proposta em outros processos de retificação, tais como, retificação interna, a retificação centerless e a retificação plana.
- Testar menores vazões de óleo no sistema MQL;
- Fazer um estudo de caso para comparar os custos com a utilização da técnica convencional e a técnica de MQL com limpeza do rebolo proposta.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANON, H. S. E. Warnings for grinding coolants. **Metalworking Production**, v. 147, n. 5, p. 44, 2003.

AZIZI, A.; REZAEI, S. M.; RAHIMI, A. Study on the rotary cup dressing of CBN grinding wheel and the grinding performance. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 47, n. 9–12, p. 1053–1063, 2010.

BADGER, J. A.; TORRANCE, A. Burn awareness. **Cutting Tool Engineering**, v. 52, n. 12, p. 16–19, 2000.

BARROS, B. G.; SILVA, T.; CANARIM, R. C.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Utilization of Teflon and Aluminum Oxide for Wheel Cleaning in Minimum Quantity Lubrication ( MQL ) Grinding 2 . Theoretical Background. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 23–32, 2014.

BARTZ, W. J. Lubricants and the environment. **Tribology International**, v. 31, n. 1–3, p. 35–47, 1998.

BELENTANI, R. D. M.; FUNES JÚNIOR, H.; CANARIM, R. C.; DINIZ, A. E.; HASSUI, A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 88–96, 2014.

BIANCHI, E. C.; MONICI, R. D.; NETO, L. D.; AGUIAR, A. R.; GUERMANDI, L. G. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado. **Cerâmica**, v. 57, p. 431–437, 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132011000400010&lang=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132011000400010&lang=pt)>.

BIENKOWSKI, K. Coolants and Lubricants: The Truth. **Manufacturing Engineering(USA)**, v. 110, n. 3, p. 90–92, 1993.

BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 48, n. 2, p.

581–598, 1999.

BYERS, J. P. (ed.). **Metalworking fluids**. Second Edition. [s.l.] CRC Taylor & Francis, 2006.

BYRNE, G.; SCHOLTA, E. Environmentally clean machining process - A strategic approach. **Annals of the C.I.R.P.**, v. 42, n. 1, p. 471–474, 1993.

CAI, R.; ROWE, W. B. Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 12–13, p. 1391–1402, 2004.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. 4th edition. [s.l.] John Wiley & Sons, 2012.

CAMERON, A.; BAUER, R. J.; WARKENTIN, A. An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 1, p. 126–130, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.08.008>>.

CHO, N.; TU, J. Roundness modeling of machined parts for tolerance analysis. **Precision Engineering**, v. 25, n. 1, p. 35–47, 2001.

CHOI, H. Z.; LEE, S. W.; JEONG, H. Do. The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 127, n. 2, p. 155–158, 2002.

CHOI, T. J.; SUBRAHMANYA, N.; LI, H.; SHIN, Y. C. Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 1, p. 61–72, 2008.

DE METER, E. C.; HOCKENBERGER, M. J. The application of tool path compensation for the reduction of clamping-induced geometric errors. **International journal of production research**, v. 35, n. 12, p. 3415–3432, 1997.

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, M. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, n. 2, p. 299–304, 2006.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos metais**. 4ª ed. Campinas, SP, Brasil: Editora Artliber, 2003.

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

DUDZINSKI, D.; DEVILLEZ, A.; MOUFKI, A.; LARROUQUÈRE, D.; ZERROUKI, V.; VIGNEAU, J. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 4, p. 439–456, 2004.

EBBRELL, S.; WOOLLEY, N. H.; TRIDIMAS, Y. D.; ALLANSON, D. R.; ROWE, W. B. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 2, p. 209–223, 2000.

EVERSHEIM, W.; KÖNIG, W.; PFEIFER, T.; WECK, M. **Manufacturing Excellence: The Competitive Edge** Chapman and Hall, London, , 1994. .

GRAF, W. Cylindrical Grinding. **Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 87p**, p. 991–1003, 2004.

GU, R. .; SHILLOR, M.; BARBER, G. .; JEN, T. Thermal analysis of the grinding process. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 39, n. 9–10, p. 991–1003, maio 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0895717704905304>>.

HAFENBRAEDL, D.; MALKIN, S. Technology environmentally correct for intern cylindrical grinding. **Machines and Metals Magazine**, v. 426, p. 40–55, 2001.

HARIMKAR, S. P.; SAMANT, A. N.; KHANGAR, A. A.; DAHOTRE, N. B. Prediction of solidification microstructures during laser dressing of alumina-based grinding wheel material. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 39, n. 8, p. 1642–1649, 2006. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0022-3727/39/i=8/a=025?key=crossref.87b417ae251ba78b5024cf4522fca4ae>>.

HASSUI, A. **Estudo da vibração durante o corte e centelhamento na retificação**

**cilíndrica de mergulho**. 2002. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2002.

HECKER, R. L.; LIANG, S. Y.; WU, X. J.; XIA, P.; JIN, D. G. W. Grinding force and power modeling based on chip thickness analysis. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 33, n. 5–6, p. 449–459, 2007.

HEINZEL, C.; BLEIL, N. The use of the size effect in grinding for work-hardening. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 1, p. 327–330, 2007.

IRANI, R. A.; BAUER, R. J.; WARKENTIN, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 15, p. 1696–1705, 2005.

JACKSON, M. J.; DAVIM, J. P. **Machining with abrasives**. Boston, MA: Springer US, 2011. v. 1

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**, v. 110, n. 1, p. 78–88, 2001.

JACKSON, M. J.; KHANGAR, A.; CHEN, X.; ROBINSON, G. M.; VENKATESH, V. C.; DAHOTRE, N. B. Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 185, n. 1–3, p. 17–23, 2007.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 108, n. 1, p. 114–124, 2000.

JEDRZEJEWSKI, J.; MODRZYCKI, W. Intelligent Supervision of Thermal Deformations in High Precision Machine Tools. In: KOCHHAR, A. K.; ATKINSON, J.; BARROW, G.; BURDEKIN, M.; HANNAM, R. G.; HINDUJA, S.; BRUNN, P.; LI, L. (Ed.). **Proceedings of the Thirty-Second International Matador Conference**. London: Macmillan Education UK, 1997. p. 457–462.

JEGATHEESAN, V.; LIOW, J. L.; SHU, L.; KIM, S. H.; VISVANATHAN, C. The need for global coordination in sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 7, p. 637–643, 2009. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.11.016>>.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 2**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLATTER, G.; FRITSCH, R.; LUNG, D.; POHLS, M. Applications of minimal quantity lubrication (MQL) in cutting and grinding. In: Proceeding of the 12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrification, Esslingen. **Anais...** Esslingen: Technische Akademie, 2000.

KÖNIG, W.; MESSER, J. Planing of Conventional Grinding Disks With Polycrystalline Diamond. **Ind. Anz.**, v. 102, n. 46, p. 35–38, 1980.

LEE, S. W.; LEE, Y. C.; JEONG, H. Do; CHOI, H. Z. The effect of high pressure air jet on form accuracy in slot grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 128, n. 1–3, p. 67–72, 2002.

LEE, W.-S.; SU, T.-T. Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 87, n. 1–3, p. 198–206, 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013698003513>>.

MACEDO, C. V. **Análise da influência dos parâmetros de retificação cilíndrica na rugosidade média (ra) da luva externa para cardan**. 2012. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15003161>>.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. Advantages and disadvantages of the use of the cutting fluids. In: Machining Congress, **Anais...**2000.

MALKIN, S. Grinding mechanisms e grinding temperatures and thermal damage. In: **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives**. [s.l.: s.n.]1p. 108–171.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and application of machining with abrasives**. Second Edi ed. New York, NY: Industrial Press, 2008.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B.; INASAKI,

I. **Handbook of machining with grinding wheels.** [s.l.] CRC Press, 2007.

MARINESCU, I. D.; ROWE, B.; LING, Y.; WOBKER, H. G. Abrasive Processes. In: **Handbook of Ceramics Grinding and Polishing.** Second Edi ed. [s.l.] Elsevier Inc., 2015. p. 67–132.

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

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

MINKE, E. Contribution to the role of coolants on grinding process and work results. **TECHNICAL PAPERS-SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS-ALL SERIES-**, p. 1–18, 1999.

NGUYEN, T. A.; BUTLER, D. L. Simulation of precision grinding process, part 1: Generation of the grinding wheel surface. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 11, p. 1321–1328, 2005.

NOVASKI, O.; DÖRR, J. Usinagem quase a seco. **Máquinas e Metais**, n. 406, p. 34–41, 1999.

OBIKAWA, T.; KAMATA, Y.; SHINOZUKA, J. High-speed grooving with applying MQL. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 14, p. 1854–1861, 2006.

OBIKAWA, T.; TAKEMURA, Y.; AKIYAMA, Y.; SHINOZUKA, J.; SASAHARA, H. Microscopic phase-dependent residual stresses in the machined surface layer of two-phase alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 9, p. 4496–4501, 2009.

OLIVEIRA, D. D. J. **Aprimoramento da técnica da mínima quantidade de lubrificante (mql) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos.** 2011. Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru-SP, 2011.

OLIVEIRA, D. D. J.; GUERMANDI, L. G.; BIANCHI, E. C.; DINIZ, A. E.; AGUIAR, P. R.; CANARIM, R. C. Improving minimum quantity lubrication in CBN

grinding using compressed air wheel cleaning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 12, p. 2559–2568, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.019>>.

PAWLAK, Z.; KLAMECKI, B. E.; RAUCKYTE, T.; SHPENKOV, G. P.; KOPKOWSKI, A. The tribochemical and micellar aspects of cutting fluids. **Tribology International**, v. 38, n. 1, p. 1–4, 2005.

PUERTO, P.; FERNÁNDEZ, R.; MADARIAGA, J.; ARANA, J.; GALLEGO, I. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **Procedia Engineering**, v. 63, n. 1996, p. 174–182, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.181>>.

RUZZI, R. de S.; BELENTANI, R. de M.; DE MELLO, H. J.; CANARIM, R. C.; D'ADDONA, D. M.; DINIZ, A. E.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. MQL with water in cylindrical plunge grinding of hardened steels using CBN wheels, with and without wheel cleaning by compressed air. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1–10, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9396-4>>.

SADEGHI, M. H.; HADDAD, 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, n. 5–6, p. 487–500, 2009.

SAHM, D.; SCHNEIDER, T. The production without coolant is interesting and must be more know. **Machines and Metals Magazine**, v. 367, p. 38–55, 1996.

SALMON, S. C. **Modern grinding process technology**. [s.l.] McGraw-Hill, 1992.

SANCHEZ, J. A.; POMBO, I.; ALBERDI, R.; IZQUIERDO, B.; ORTEGA, N.; PLAZA, S.; MARTINEZ-TOLEDANO, J. Machining evaluation of a hybrid MQL-CO<sub>2</sub> grinding technology. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 18, p. 1840–1849, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.07.002>>.

SHAJI, S.; RADHAKRISHNAN, V. Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 141, n. 1, p. 51–59, 2003.

SHAW, M. C. Energy Conversion in Cutting and Grinding\*. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 45, n. 1, p. 101–104, 1996.

SILVA, L. R.; BIANCHI, E. C.; CATAI, R. E.; FUSSE, R. Y.; FRANÇA, T. V.; AGUIAR, P. R. Study on the behavior of the minimum quantity lubricant - MQL technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 27, n. 2, p. 192–199, 2005.

SILVA, L. R.; BIANCHI, E. C.; FUSSE, R. Y.; CATAI, R. E.; FRANÇA, T. V.; AGUIAR, P. R. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant-MQL in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 2, p. 412–418, 2007.

SILVA, L. R.; CORRÊA, E. C. S.; BRANDÃO, J. R.; DE ÁVILA, R. F. Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **Journal of Cleaner Production**, 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652613000383>>.

SINOT, O.; CHEVRIER, P.; PADILLA, P. Experimental simulation of the efficiency of high speed grinding wheel cleaning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 2, p. 170–175, 2006.

SOARES, D. D.; OLIVEIRA, J. F. G. Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais. **Revista Máquina e Metais**, n. 436, p. 140–157, 2002.

SOHAL, N.; SANDHU, C. S.; PANDA, B. K. Analyzing the Effect of Grinding Parameters on MRR and Surface Roughness of EN24 and EN353 Steel. **Mechanica Confab**, v. 3, p. 1–6, 2014.

SOKOVIĆ, M.; MIJANOVIĆ, K. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 109, n. 1–2, p. 181–189, 2001.

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. Dry machining: Machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 101, n. 1, p. 287–291, 2000.



STANFORD, M.; LISTER, P. M. The future role of metalworking fluids in metal cutting operations. **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 54, n. 1, p. 11–19, 2002.

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 and Manufacture**, v. 47, n. 6, p. 927–933, 2007.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M. H. Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 8, p. 698–708, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.04.009>>.

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 and Manufacture**, v. 49, n. 12–13, p. 924–932, 2009.

TAWAKOLI, T.; HEISEL, U.; LEE, D. H.; DANESHI, A. An experimental investigation on the characteristics of cylindrical plunge dry grinding with structured cbn wheels. **Procedia CIRP**, v. 1, n. 1, p. 399–403, 2012.

TAWAKOLI, T.; WESTKAEMPER, E.; RABIEY, M. Dry grinding by special conditioning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 33, n. 3–4, p. 419–424, 2007.

TAWAKOLI, T.; WESTKÄMPER, E.; RABIEY, M.; RASIFARD, A. Influence of the type of coolant lubricant in grinding with CBN tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 5 SPEC. ISS., p. 734–739, 2007.

TORRES, M. A. .; VOORWALD, H. J. . An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel. **International Journal of Fatigue**, v. 24, n. 8, p. 877–886, 2002.

WALKER, T. **The mql handbook – a guide to machining with minimum quantity lubrication**. [s.l.] Unist Inc, 2013.

WANG, C. M.; G. S., I. I. I. C.; CHAN, H. M.; HARMER, M. P. Structure of Y and Zr segregated grain boundaries in alumina. **Interface Science**, v. 8, p. 243–255, 2000.

WANG, Y.; LI, C.; ZHANG, Y.; YANG, M.; LI, B.; JIA, D.; HOU, Y.; MAO, C. **Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in mql grinding using different types of vegetable oils**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2016.

WEBSTER, J. A. Coolant calculus. **Cutting Tool Engineering**, v. 60, n. 2 s 58, p. 60–66, 2008.

WEBSTER, J. A.; CUI, C.; MINDEK, R. B.; LINDSAY, R. Grinding Fluid Application System Design. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 44, n. 1, p. 333–338, 1995.