



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

ALAN RODRIGO DE SALES

“APLICAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO COM
INIBIDORES VOLÁTEIS DE CORROSÃO NA RETIFICAÇÃO DE AÇO
ENDURECIDO”

BAURU

2023



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



ALAN RODRIGO DE SALES

**“APLICAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO COM
INIBIDORES VOLÁTEIS DE CORROSÃO NA RETIFICAÇÃO DE AÇO
ENDURECIDO”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. José Claudio Lopes

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

BAURU

2023

S163a Sales, Alan Rodrigo de
Aplicação de diferentes métodos de lubrificação com
inibidores voláteis de corrosão na retificação de aço endurecido / Alan
Rodrigo de Sales. -- Bauru, 2023
110 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: José Claudio Lopes
Coorientador: Eduardo Carlos Bianchi

1. Retificação. 2. Aço endurecido. 3. Fluido de corte. 4. Aditivo
anticorrosivo. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE ALAN RODRIGO DE SALES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 24 dias do mês de fevereiro do ano de 2023, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de ALAN RODRIGO DE SALES, intitulada **APLICAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DA LUBRIRREFRIGERAÇÃO COM INIBIDORES VOLÁTEIS NA RETIFICAÇÃO DE AÇO ENDURECIDO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Campus de Bauru, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. LUIZ DARE NETO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. GILSON EDUARDO TARRENTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Sistemas de Produção / Faculdade de Tecnologia de Botucatu, Profa. Dra. KATIA CRISTIANE GANDOLPHO CANDIOTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Materiais / Engenharia Mecânica/EEL/USP. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: **APROVADO** . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES

A minha esposa Camila Destro e a minha filha
Liz Destro de Sales.

AGRADECIMENTOS

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

À minha esposa Camila Destro e a minha filha Liz Destro de Sales, pela paciência pelo carinho, apoio e dedicação

Aos meus pais Vicente Benedito de Sales e a minha mãe Rosalina A. Rolim de Sales, aos quais devo minha vida, por me ensinarem valores e sempre me incentivarem a buscar novas conquistas.

Ao meu irmão Alison Bruno de Sales, pelo carinho.

Ao meu sogro Luiz Antônio Destro e minha sogra Maria José M Destro

Aos meus orientadores, Prof. Dr. José Claudio Lopes e Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi pela amizade, constante apoio e confiança em meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues pela contribuição na análise da Microscopia Confocal.

Ao Anthony Gaspar Talon por ter participado desta pesquisa.

Ao Dr. Mário Celso Genovez e ao Dr. Tiago Alexandre Dinis Pinto da VCI Brasil, pela contribuição e fornecimento dos fluidos de corte utilizados nesta pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Câmpus Bauru, pela oportunidade que me foi concedida

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

Agradeço ao Dr. Hamilton José de Mello, do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica e a todos da Faculdade de Engenharia da FEB/UNESP, por gentilmente colaborarem neste projeto.

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

“A mente humana é parte do intelecto infinito de Deus.”

(Baruch Spinoza)

RESUMO

Em meio à atual busca por adequações dos processos produtivos em função da saúde humana e preservação do ambiente, sem renunciar à preocupação com os custos e a qualidade dos produtos, é preciso pesquisar e tentar novas técnicas de lubrificação eficiente 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. Assim este trabalho teve como objetivo comparar os métodos de lubrificação com a aplicação dos fluidos com inibidores voláteis de corrosão (VCI) com fluido de corte base, utilizando métodos de lubrificação convencional, MQL sem limpeza e MQL com limpeza da superfície de corte do rebolo (MQL+WCJ). Todos os métodos de lubrificação foram aplicados na retificação de aço endurecido (ABNT 4340) com rebolo de óxido de alumínio. Os parâmetros de saída analisados foram: rugosidade média aritmética (R_a), desvio de circularidade, microdureza da peça, desgaste diametral do rebolo, emissão acústica e potência de retificação. As superfícies retificadas foram avaliadas por microscopias óptica e confocal, microscopia eletrônica de varredura. Não foram observados danos térmicos, microtrincas ou alterações microestruturais nas peças, independentemente do método de lubrificação aplicado. Além disso, pode-se concluir que o uso de fluidos de corte com VCI evidenciaram os melhores resultados em comparação ao fluido de corte base.

Palavras chaves: Retificação. Aço endurecido. Fluido de corte. Aditivo anticorrosivo.

ABSTRACT

During the current search for adequacy of the productive processes in function of human health and preservation of the environment, without giving up the concern with the costs and the quality of the products, researchers must try new techniques of lubrication and cooling efficiency as alternatives to the conventional ones. Thus, modern techniques are sought to replace them. The MQL technique (minimum quantity of lubricant) has been an alternative because it uses low oil flow with high-pressure air, reducing the waste generated. Thus, this work aimed to compare the methods of lubrication-cooling with the application of fluids with volatile corrosion inhibitors (VCI) with base cutting fluid, using conventional lubrication-cooling methods, MQL without cleaning, and MQL with the cleaning of the cutting surface of the grinding wheel (MQL+WCJ). All lubrication and cooling techniques were applied to grinding hardened steel (ABNT 4340) with an aluminum oxide grinding wheel. The output parameters analyzed were: arithmetic mean roughness (Ra), roundness deviation, part microhardness, diametral wear of the grinding wheel, acoustic emission, and grinding power. In addition, the rectified surfaces were evaluated by optical and confocal microscopy and scanning electron microscopy. No thermal damage, microcracks, or microstructural changes were observed in the parts, regardless of the applied lubrication-cooling method. In addition, it can be concluded that cutting fluids with VCI showed better results than the essential cutting fluid.

Keywords: Grinding. Hardened steel. Cutting fluid. Anticorrosive additive.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática do processo de retificação externa de mergulho	21
Figura 2: Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho.....	22
Figura 3: Seis elementos básicos envolvidos na retificação.....	23
Figura 4: Fases de formação do cavaco na retificação	24
Figura 5: Representação esquemática do processo de dressagem com dressador conglomerado	33
Figura 6: Divisão de gastos com o método convencional de lubrificação	38
Figura 7: Fluxo de ar existente nos rebolos em rotação	39
Figura 8: Rugosidade média Ra por velocidade de mergulho.....	42
Figura 9: Desvio de circularidade por velocidade de mergulho.....	42
Figura 10: Desgaste diametral do rebolo por velocidade de mergulho	43
Figura 11: Cavacos aderidos aos poros do rebolo	47
Figura 12: Efeito do jato de ar comprimido na superfície de corte do rebolo (a) retificação sem limpeza do rebolo (b) retificação com limpeza do rebolo	49
Figura 13: Dimensões do corpo de prova (em mm)	61
Figura 14: Matriz de ensaios	65
Figura 15: Medição do desgaste diametral do rebolo.....	69
Figura 16: Resultado de rugosidade média Ra em função do método de lubrificação ...	73
Figura 17: Resultado de desvio de circularidade em função do método de lubrificação	76
Figura 18: Resultado de desgaste diametral do rebolo em função do método de lubrificação	79
Figura 19: Resultado de emissão acústica em função do método de lubrificação	81
Figura 20: Resultado de potência em função do método de lubrificação.....	83
Figura 21: Esquema da análise de Microdureza Vickers e Microscopia óptica.....	85
Figura 22: Microscopia eletrônica de varredura para diferentes condições de lubrificação	86
Figura 23: Microdureza das peças retificadas com o método de lubrificação convencional	87
Figura 24: Microdureza das peças retificadas com o método de lubrificação MQL.....	87
Figura 25: Microdureza das peças retificadas com o método de lubrificação MQL+WCI	87
Figura 26: Microscopia confocal das peças retificadas através do método convencional utilizando (a) fluido base, (b) MV-Aqua 100, (c) MV-Aqua 180 e (d) MV-Aqua 182	89
Figura 27: Microscopia confocal das peças retificadas através do método de MQL utilizando (a) fluido base, (b) MV-Aqua 100, (c) MV-Aqua 180 e (d) MV-Aqua 180	90
Figura 28: Microscopia confocal das peças retificadas através do método de MQL+WCI utilizando (a) fluido base, (b) MV-Aqua 100, (c) MV-Aqua 180 e (d) MV-Aqua 182	91
Figura 29: Microscopia eletrônica de varredura para diferentes condições de Lubrificação	93

LISTA DE QUADRO

Quadro 1: Variáveis de entrada no processo de usinagem	64
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius	(°C)
°INPM	Grau Instituto Nacional de Pesos e Medidas	°INPM)
μ	Coeficiente de atrito	(-)
μm	Micrometro	(μm)
A	Área média no topo dos grãos abrasivos	(mm^2)
A/D	Analógico/digital	(-)
ad	Profundidade de dressagem	(μm)
ae	Profundidade real de corte	(μm)
Al_2O_3	Óxido de alumínio	(-)
ap	Profundidade de corte	(μm)
b	Largura do rebolo	(mm)
C	Carbono	(-)
cd	Profundidade radial de corte	(μm)
Cr	Cromo	(-)
de	Diâmetro equivalente	(mm)
ds	Diâmetro do rebolo	(mm)
dw	Diâmetro da peça	(mm)
ec	Energia específica	(J/mm^3)
Fa	Força axial	(N)
Fn	Força normal	(N)
Ft	Força tangencial	(N)
G	Relação G	(-)
gf	Grama-força	(gf)
heq	Espessura equivalente de corte	(μm)
HV	Dureza Vickers	(HV)
HRC	Dureza Rockwell C	(HRC)
K	Força de corte unitária	(N)
kgf	Quilograma-força	(kgf)
L/min	Litro por minuto	(L/min)
lc	Comprimento de contato	(μm)
m	Metro	(m)
m/s	Metro por segundo	(m/s)
mL /h	Mililitro por hora	(mL/h)
mm	Milímetro	(mm)
mm/min	Milímetro por minuto	(mm/min)
Mn	Manganês	(-)
Mo	Molibidênio	(-)
MPa	Mega Pascal	(MPa)
Ni	Níquel	(-)
ns	Rotação do rebolo	(rpm)
nw	Rotação da peça	(rpm)
P	Potência de corte	(W)
p	Pressão unitária	(N/mm^2)
P.A.	Para análise	(-)
Q'w	Taxa específica de remoção de material no tempo	($\text{mm}^3 / \text{mm.s}$)
Qw	Taxa de remoção de material no tempo	(mm^3/s)
Ra	Rugosidade média aritmética	(μm)

RMS	Root Mean Square	(-)
Rq	Rugosidade média quadrática	(μm)
Ry	Rugosidade máxima	(μm)
Rz	Rugosidade total	(μm)
Si	Silício	(-)
SiC	Carbeto de silício	(-)
ts	Tempo de centelhamento	(s)
vd	Velocidade de dressagem	(mm/min)
vf	Velocidade de mergulho do rebolo	(mm/min)
vs	Velocidade de	(m/s)
vw	Velocidade da peça	(m/s)
WCJ	Limpeza da superfície de corte do rebolo	(-)
Zs	Volume de rebolo gasto	(mm ³)
Zw	Volume de material removido	(mm ³)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Motivação	18
1.2 Objetivo	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 O processo de retificação cilíndrica externa de mergulho	20
2.1.1 O ciclo de retificação cilíndrica externa de mergulho	22
2.1.2 Remoção de material no processo de retificação	23
2.1.3 Danos térmicos causados pelo processo de retificação	24
2.1.4 Parâmetros para o processo de retificação	25
2.1.4.1 Comprimento de corte (l_c)	25
2.1.4.2 Profundidade de corte (a_e)	26
2.1.4.3 Velocidade de corte (V_s)	27
2.1.4.4 Velocidade da peça (V_w)	28
2.1.4.5 Taxa de remoção do material (Q_w)	28
2.1.4.6 Taxa de remoção de material específica (Q_w')	28
2.1.4.7 Espessura equivalente de corte (h_{eq})	29
2.1.5 Rebolo de óxido de alumínio	30
2.2 Processo de dressagem do rebolo	30
2.2.1 Microefeito na dressagem	34
2.3 Fluido de corte	34
2.3.1 Importância da aplicação dos fluidos de corte no processo de retificação	35
2.3.2 Problemas causados pelos fluidos de corte	36
2.3.3 Custos dos fluidos de corte no processo	37
2.3.4 Otimizações na aplicação dos fluidos de corte	38
2.3.5 Aditivos de fluidos de corte	39
2.3.6 Uso do V-active VCI no processo de retificação	40
2.4 A técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL)	43
2.4.1 Vantagens da utilização do MQL	44
2.4.2 Desvantagens no uso da técnica de MQL	45
2.5 Fenômeno do entupimento dos poros do rebolo	46
2.6 Limpeza da superfície de corte do rebolo	47

2.6.1 Limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido	48
2.7 Aço endurecido	50
2.8 Variáveis de saída do processo	50
2.8.1 Emissão acústica (EA).....	51
2.8.2 Análises metalográficas	52
2.8.3 Rugosidade media aritmética (Ra)	53
2.8.4 Desvio de circularidade	54
2.8.5 Desgaste diametral do rebolo	55
2.8.6 Potência de retificação.....	56
2.8.7 Microdureza.....	57
2.8.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (superfície da peça)	57
2.8.9 Microscopia confocal	58
3 MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1 Materiais e equipamentos utilizados.....	60
3.1.1 Retificadora cilíndrica externa.....	60
3.1.2 Corpos de prova.....	61
3.1.3 Dressagem	61
3.1.4 Fluidos de corte e técnicas de aplicação de fluidos de corte	62
3.1.5 Sistema de limpeza secundário da superfície de corte do rebolo	63
3.2 Classificação e parâmetros dos ensaios	64
3.3 Caracterização dos parâmetros de saída.....	66
3.3.1 Força tangencial de corte	67
3.3.2 Emissão acústica (EA).....	67
3.3.3 Desvio de circularidade	68
3.3.4 Rugosidade média aritmética (Ra)	68
3.3.5 Desgaste diametral do rebolo	68
3.3.6 Preparação das amostras para análise da microdureza e metalográfica	60
3.3.7 Microscopia óptica das peças	70
3.3.8 Microdureza Vickers	71
3.3.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	71
3.3.10 Microscopia confocal	71
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1 Rugosidade média aritmética	73
4.2 Desvio de circularidade	76

4.3 Desgaste diametral do rebolo	79
4.4 Emissão acústica	81
4.5 Potência de retificação.....	83
4.6 Microscopia óptica e Microdureza Vickers.....	84
4.7 Microscopia confocal.....	88
4.8 Microscopia eletrônica de varredura.....	92
CONCLUSÕES.....	96
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTURO	98
REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

A retificação pode ser definida como um processo de usinagem por abrasão que emprega utiliza uma ferramenta de geometria não definida (rebolo) em alta rotação para remover material de uma peça. É um dos processos de fabricação mais importantes quando se tratam de superfícies de alta qualidade e precisão, sendo normalmente uma das operações finais pela qual a peça passa (MARINESCU et al., 2007).

Entretanto, a maior parte da energia consumida no processo durante a formação do cavaco é convertida em calor, aumentando a temperatura na zona de contato entre peça e rebolo, o que caracteriza a retificação como um processo de elevada temperatura (TALON et al., 2019).

Portanto, os fluidos de corte são utilizados como uma alternativa para reduzir a temperatura gerada no processo de retificação. Esses fluidos refrigeram, lubrificam e auxiliam no escoamento do cavaco (TAWAKOLI; WESTKAEMPER; RABIEY, 2007). Entretanto, os fluidos de corte causam problemas à saúde do operador e ao meio ambiente se descartado de maneira errada (SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2015). Isso gera uma necessidade de desenvolvimento de técnicas alternativas para o uso convencional de fluido de corte.

Nesse contexto, algumas técnicas de lubrificação surgiram para amenizar os problemas dos danos advindos do uso de fluido de corte convencional. Entre elas se destaca a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), a qual consiste na mistura de ar comprimido com óleo em uma proporção pequena, muito inferior à quantidade de óleo utilizada nos fluidos de corte comuns. Essa mistura em forma de um spray é pulverizada diretamente na zona de contato. Por ser injetado com alta pressão, a fim de penetrar e lubrificar a zona de contato com eficiência (OLIVEIRA et al., 2012).

A utilização dessa técnica, em comparação com as convencionais, melhora a qualidade da peça resultante em conjunto com a preservação do meio ambiente e da saúde do operador (BIANCHI et al., 2010).

Os óleos de origem mineral são comumente os mais utilizados. Entretanto, os mesmos contaminam a água, o solo e o ar, além disso podem causar irritações respiratórias, asma, pneumonia, dermatites, reações alérgicas e câncer quando em contato com o operador. Assim, a mínima quantidade de lubrificante (MQL) a partir de um fluido de corte que não é prejudicial à saúde humana, se tornando uma atrativa alternativa para redução do uso de fluidos de corte, melhorando a eficiência do uso dos mesmos e reduzindo os riscos ao meio ambiente e a saúde humana (ASHRAFIJOU et al., 2016).

De acordo com Oliveira et al. (2012), a técnica de MQL não é amplamente utilizada por não conseguir controlar a temperatura do processo e não retirar totalmente os cavacos produzidos, causando o entupimento do rebolo, piorando a qualidade do produto final e aumentando o desgaste da ferramenta.

A mistura de cavaco com óleo quando aderida no rebolo aumentam as forças de corte, o que prejudica a eficiência do processo e reduz a qualidade da peça (LOPES et al., 2019c).

Por essa razão, a técnica de MQL quando aliada a limpeza do rebolo tem potencial para superar os resultados obtidos na refrigeração convencional (OLIVEIRA et al., 2012). No estudo de Javaroni et al. (2020), os autores obtiveram os melhores resultados quando a limpeza do rebolo foi utilizada junto com o MQL. Sendo assim, o autor cita que a técnica é um avanço para a fabricação sem agredir o meio ambiente e uma otimização na aplicação de MQL.

No estudo de Bianchi et al. (2018), os autores demonstraram que a retificação sob a técnica de MQL com limpeza apresentou resultados superiores a retificação sob a lubrificação com MQL sem limpeza em todas as variáveis de saída analisadas. A partir disso, os autores concluíram que a usinagem com a técnica MQL com limpeza pode ser uma alternativa viável à aplicação convencional de fluido de corte, proporcionando benefícios à saúde, ao meio ambiente e econômicos.

1.1 Motivação

Devido às altas temperaturas que o processo de retificação atinge, o uso de fluidos de corte é indispensável para manter a integridade da peça, evitando alterações microestruturais e criação de tensões internas (IRANI et al., 2005). Na atualidade o método de lubri-refrigeração mais utilizado e mais eficiente é a aplicação do fluido de corte em abundância.

Apesar de seus diversos benefícios a peça o fluido de corte possui substâncias nocivas ao meio ambiente e a saúde humana. Essas substâncias quando descartadas de forma incorreta poluem o ar, a água e o solo (SOKOVIC E MIJANOVIC, 2001). Além de causar problemas à saúde do trabalhador, que tem potencial para causar desde uma simples dermatite até um severo câncer (SILVA et al., 2013).

Desses estudos surgiu a possibilidade de utilizar fluidos de corte com V-active VCI na técnica de MQL. De acordo com Genovez et al. (2015), o V-active VCI apresenta vantagens ao processo, não só na usinagem, mas na proteção da peça e da máquina contra a corrosão, na saúde do operador e na preservação do meio ambiente. A técnica de MQL, a limpeza da superfície de corte do rebolo e os inibidores voláteis de corrosão são assuntos estudados

atualmente para garantir avanços tecnológicos, logo, essa pesquisa engloba assuntos pertinentes no meio acadêmico e industrial atual. Por essa razão, a VCI Brasil, empresa que formulou o V-active VCI possui interesse e garante a parceria para o estudo da aplicação dos fluidos com inibidores de corrosão aplicados com a técnica de MQL.

Nenhum trabalho científico foi encontrado na literatura específica que apresente um estudo sobre a influência de inibidores voláteis de corrosão V-active VCI na retificação cilíndrica de mergulho utilizando o aço endurecido, tampouco utilizando a técnica de mínima quantidade de lubrificante com limpeza ou sem limpeza.

1.2 Objetivo

Analisar o desempenho de fluidos de corte com inibidor de corrosão V-active VCI aplicados pela técnica de MQL na retificação do aço endurecido com e sem aplicação da técnica de limpeza da superfície de corte do rebolo de óxido de alumínio. Nos testes serão avaliados: rugosidade média aritmética; desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, microdureza, microscopia óptica da peça a partir da superfície retificada, potência, emissão acústica, além de análises da superfície retificada, utilizando microscopia eletrônica de Varredura (MEV) e microscopia óptica confocal. Assim, espera-se obter informações que visem sustentar e catalogar os fenômenos gerados pelos fluidos durante o processo de retificação. Os resultados serão comparados com o desempenho dos mesmos fluidos aplicados na lubrificação convencional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foram abordados os tópicos relevantes para a realização do presente trabalho. Entre esses tópicos estão a retificação cilíndrica externa de mergulho, parâmetros e variáveis de saída, rebolos, fluidos de corte, a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante, limpeza da superfície de corte do rebole entre outros assuntos importantes para o estudo.

2.1 O processo de retificação cilíndrica externa de mergulho

A retificação é geralmente processo de acabamento onde a qualidade é importante e erros podem custar caro, uma vez que é uma das etapas finais do processo de fabricação. Para evitar tais erros os parâmetros de retificação devem ser bem definidos (ANDERSON et al., 2007). De acordo com Winter et al. (2015) o processo em países industriais chega a custar de 20% a 25% dos gastos totais nos processos de fabricação.

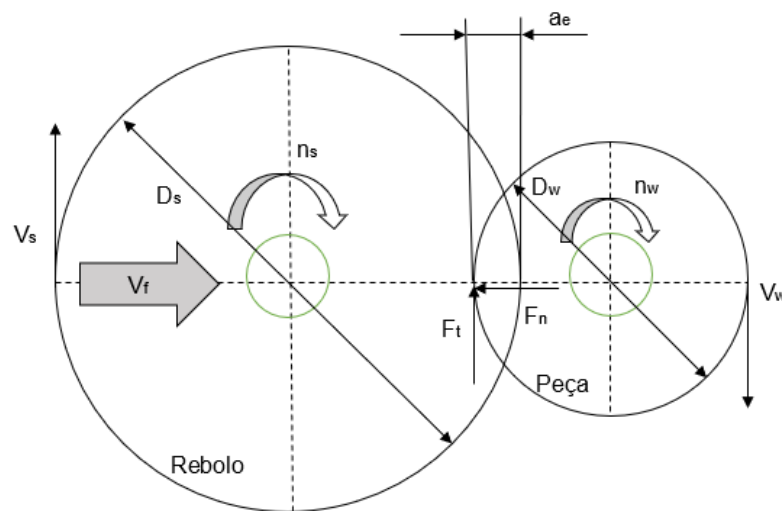
A retificação é um processo complexo e dinâmico. É muito aplicado na manufatura de peças de alta qualidade, isto é, com exatidão e pequenas tolerâncias, além de uma excelente qualidade superficial (SINHA et al., 2016).

O rebole normalmente é mais largo que o comprimento da peça, há possibilidade de se fazer a retificação de várias superfícies simultaneamente através da montagem de diversos rebolos ou a retificação de perfis, através da afiação do rebole no perfil adequado (DINIZ et al. 2008).

Comparada aos processos convencionais de usinagem com ferramenta de geometria definida, a retificação envolve forças e velocidades significativamente maiores, o que implica em elevada geração de energia (AZARHOUSHANG; DANESHI; LEE, 2017). A maior parte desta é dissipada através da peça, na forma de calor, o que pode causar diversos danos térmicos à peça, como alterações microestruturais, microtrincas, queimas, tensões residuais de tração, elevação da rugosidade e desvios de forma (LAVISSE et al., 2018). Por se tratar de um dos processos finais na fabricação de um componente, normalmente realizado após o tratamento térmico, a retificação possui elevado valor agregado, podendo representar entre 20% e 25% do custo total da peça. Desta forma, para lubrificar e refrigerar o processo, a aplicação de fluidos de corte de maneira abundante é amplamente empregada em retificação. Além disso, os parâmetros de usinagem devem ser muito bem definidos, para que não ocorram danos à peça que levariam ao seu descarte, implicando em elevados custos e retrabalhos (BIANCHI et al., 2013).

Na retificação quando há um avanço do rebolo na peça vários componentes sofrem deformações elásticas, devido à falta de rigidez tanto da ferramenta como da peça ou da própria máquina, isso resulta em uma diferença entre o avanço real e o programado, como se pode notar na Figura 1. Para que no final do processo a profundidade avançada seja próxima à profundidade teórica, existe um período denominado spark-out, onde as deformações elásticas são eliminadas e o rebolo remove o material. No spark-out ou tempo de faiscamento não há avanço isso faz com que o avanço real se aproxime do avanço teórico atingindo-se assim as dimensões necessárias à peça (HASSUI E DINIZ 2003).

Figura 1: Representação esquemática do processo de retificação externa de mergulho.



Fonte: Malkin e Guo 2008, modificado.

De acordo com a Figura 1, Malkin e Guo (2008) a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho é basicamente constituída dos seguintes parâmetros:

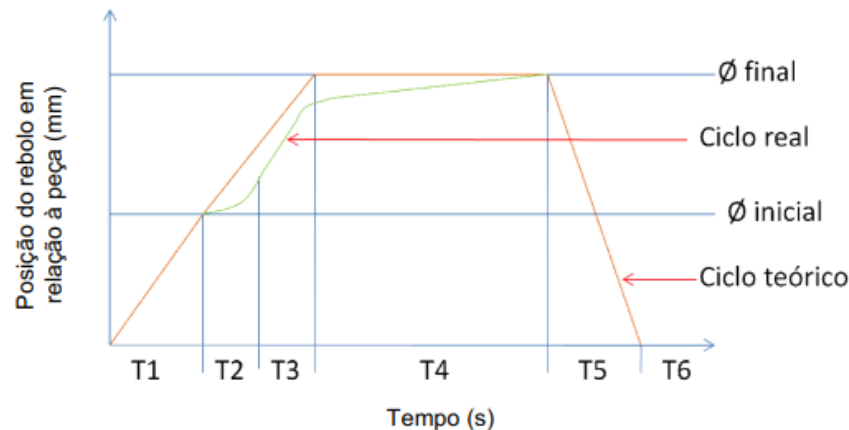
- V_s é a velocidade de corte (mm/s);
- v_w é a velocidade da peça; (mm/min)
- d_s é o diâmetro do rebolo; (mm)
- d_w é o diâmetro da peça; (mm)
- a_e é a profundidade de corte; (mm)
- n_w é rotação da peça (rpm);
- n_s é rotação do rebolo (rpm);
- v_f é a velocidade de mergulho (mm/min);
- F_t é a força tangencial de corte (N);

F_n é a força normal de corte (N);

2.1.1 O ciclo de retificação cilíndrica externa de mergulho

Segundo Soares e Oliveira (2002), o ciclo de retificação externa de mergulho é demonstrado como o conjunto de etapas que ocorrem em um processo de fabricação, iniciando com a colocação da peça na máquina até a saída desta dentro de especificações pré-determinadas. O ciclo de retificação é subdividido em fases e, cada uma possui um tempo para sua execução como mostra a Figura 2.

Figura 2: Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho.



Fonte: Soares; Oliveira, 2002, adaptado por Oliveira, 2011.

Os intervalos de tempo indicados na Figura 2 são descritos a seguir:

- T1: onde não há contato entre o rebolo e a peça, o rebolo apenas avança em direção à peça.
- T2: início do contato entre o rebolo e a peça, aumento da força de corte gerando deformações elásticas, o avanço é menor do que o programado, e gera uma diferença entre a posição real e a teórica.
- T3: remoção do cavaco e a posição real se iguala a posição teórica.
- T4: período de centelhamento, onde não há avanço do rebolo, permitindo, desta forma, eliminar as deformações adquiridas durante o período T2. Nesse período as tolerâncias dimensionais e geométricas da peça são atingidas e a rugosidade diminui.
- T5: recuo do rebolo, permitindo a retirada da peça usinada.

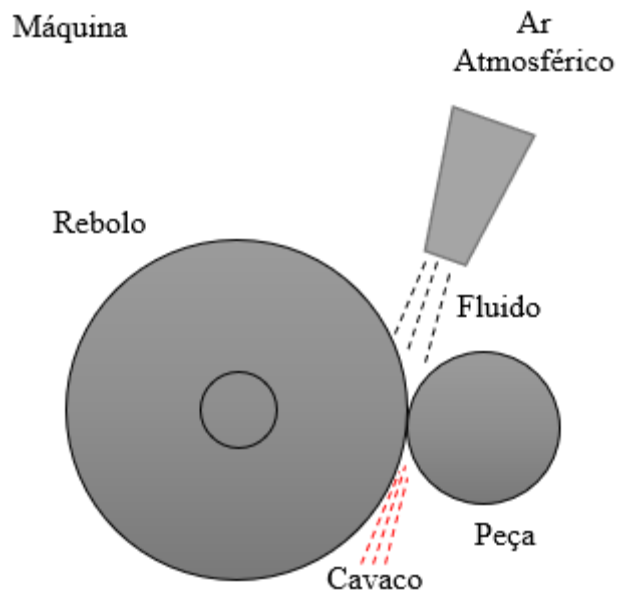
- T6: troca de peça e uma possível operação de dressagem (afiação do rebolo).

2.1.2 Remoção de material no processo de retificação

A remoção de material no processo de retificação é feita por grãos abrasivos com forma irregular e dispostos aleatoriamente na ferramenta de corte, o rebolo (RASIM et al., 2015).

Para Marinescu et al. (2007) na retificação há seis elementos básicos: a retificadora, o rebolo, a peça, o fluido de corte, a atmosfera e o cavaco produzido, que estão representados na Figura 3.

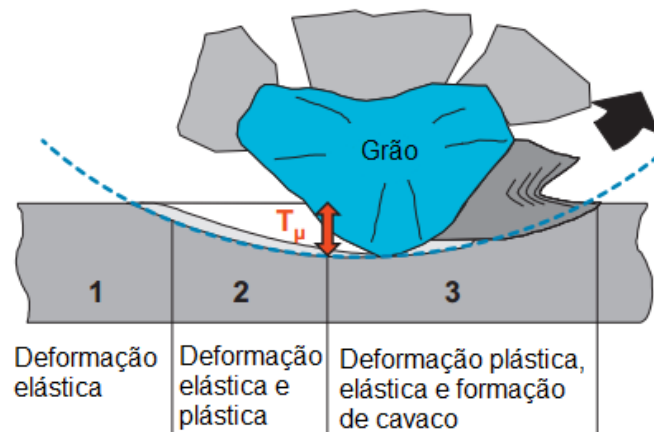
Figura 3: Seis elementos básicos envolvidos na retificação,



Fonte: Marinescu et al. 2007, modificado.

De acordo com Klocke (2009) a formação de cavaco na retificação é dividida em três etapas como mostrado na Figura 4, na primeira parte começa o contato entre o grão abrasivo e a peça causando uma deformação plástica conforme a profundidade de penetração aumenta começa a surgir deformação plástica, dando início a segunda etapa. Quando se atinge uma profundidade T_μ a terceira fase começa a ocorrer, que é a formação do cavaco. A profundidade T_μ depende de fatores como qual material a serem retificados, os parâmetros de retificação utilizados, a forma dos grãos entre outros (RASIM et al., 2015).

Figura 4: Fases de formação do cavaco na retificação.



Fonte: Klocke, 2009, modificado.

A remoção do material na retificação ocorre basicamente pela formação de cavaco, similarmente a outros processos de usinagem como torneamento e fresagem, mas em uma escala mais fina (MALKIN e GUO, 2008).

A remoção do material na retificação é devido à combinação da fricção, deformação e cisalhamento do material. O cisalhamento é a ação responsável pela formação do cavaco, enquanto a fricção e a deformação consomem energia sem remover material (SINHA et al., 2016).

A velocidade periférica do rebolo na retificação convencional é de 20 m/s, no entanto na retificação de alta velocidade a velocidade periférica do rebolo pode chegar a mais de 140 m/s, nesse caso o rebolo deve ser projetado para aguentar o estresse causado em sua utilização (MARINESCU et al., 2004).

Oliveira et al. (2012) descreve a retificação como um processo de energia intensa, onde para remover uma pequena quantidade de material a energia requerida é imensa comparada com outros processos de usinagem. A combinação de altas velocidades com infinitas arestas cortantes consome muita energia e gera muito calor, isto pode causar deteriorações nas propriedades metalúrgicas do material, na superfície do material, exatidão da peça além de afetar a vida útil do rebolo.

2.1.3 Danos térmicos causados pelo processo de retificação

Segundo Anderson et al. (2007) o erro mais comum de se ocorrer na retificação é a queima da peça. Assim é importante estudar quais as principais causas da queima para evitá-la.

Na retificação, muitos dos grãos abrasivos estão em contato com a peça a cada segundo, no entanto apenas uma pequena parte desses grãos está realmente cortando, a maioria dos grãos estão se arrastando causando as altas temperaturas devido ao atrito gerado (TAWAKOLI et al. 2009).

A queima da peça ocorre quando o processo de retificação atinge uma temperatura e energia suficiente para causar descoloração e manchas que podem ser vistas na peça. A queima da peça também pode não apresentar defeitos físicos a serem observados. Conforme a temperatura aumenta a microestrutura do material pode se alterar, variando a dureza na parte afetada. Essas variações na dureza podem ocasionar tensões residuais na superfície, o que pode resultar em uma menor resistência a fadiga. Se o material for sensível o bastante podem surgir trincas no material devido às tensões residuais ou às expansões térmicas (IRANI et al., 2005).

As altas temperaturas podem causar vários tipos de danos térmicos na peça, como a queima superficial, modificações microestruturais, aquecimento superficial e sub superficial que pode causar a têmpera e a retempera superficial. Além disso, a expansão térmica não controlada e a contração da peça durante a retificação contribuem para erros dimensionais e de forma, geralmente esses erros são de desvio de circularidades (SILVA et al., 2007).

O calor gerado na retificação na área de contato entre a peça e o rebolo é a principal causa da deterioração das propriedades metalúrgicas, da qualidade superficial, da precisão nas dimensões e na vida de rebolo (ALAGUMURTHI et al., 2007).

2.1.4 Parâmetros para o processo de retificação

2.1.4.1 Comprimento de corte (l_c)

O comprimento de corte é definido de acordo com Marinescu et al. (2004) como sendo a extensão de contato entre o rebolo e a peça e pode ser calculado pela Equação 1:

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

Onde:

l_c = comprimento de contato (mm);

a_e = profundidade de corte (mm);

d_e = diâmetro equivalente do rebolo (mm);

Os mesmos autores afirmam que o comprimento de corte real pode ser muito maior que o comprimento de corte calculado pela equação. A equação é uma boa aproximação quando a operação de retificação possui grande profundidade de corte.

Uma vez que a Equação 1 não considera as deformações ocorridas no processo, Malkin e Guo (2008) chamam esse parâmetro encontrado de comprimento de corte estático.

De acordo com Anderson et al. (2008) a retirada de material e a geração de calor ocorre ao longo do comprimento de contato. O comprimento de contato de acordo com os autores depende da cinemática do processo e dos contatos mecânicos durante a retificação.

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

$$d_e = \frac{d_e}{1 \pm \frac{ds}{dw}} \quad (2)$$

Onde:

ds = diâmetro do rebolo (mm);

dw = diâmetro da peça (mm);

2.1.4.2 Profundidade de corte (a_e)

A profundidade de corte para Marinescu et al. (2007) é a profundidade de material removido para cada revolução.

De acordo com Rowe (2014) a profundidade de corte apresenta um papel importante na retificação, o mesmo autor esquematiza a profundidade de corte.

A peça, o rebolo e estrutura da máquina defletem quando o contato é estabelecido, assim a real profundidade de corte é menor do que a calculada baseando-se no avanço (MARINESCU et al., 2004). O mesmo autor afirma que para que não haja muita diferença entre a profundidade de corte real e a calculada existe um período denominado spark-out onde não há avanço, assim as deflexões tendem a se estabilizar.

Talon et al. (2019) utiliza em seu trabalho um tempo de spark-out (t_s) de 3,68 segundos utilizando rebolo de oxido de alumínio, fluido de corte com inibidores voláteis de corrosão e

retificação do aço endurecido, entretanto a aplicação de um tempo de spark-out adequado e um processo de dressagem adequado pode evitar o perfil irregular do rebolo (LOPES et al., 2018).

Marinescu et al. (2004) define que a profundidade de corte real a_e é igual a diferença entre a profundidade de corte programada, as deflexões e o desgaste do rebolo mais a expansão térmica. Assim a profundidade real de corte é calculada pela Equação 3.

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

Onde:

a_e = profundidade da peça (mm)

v_f = velocidade de mergulho (mm/min);

v_w = velocidade da peça (mm/min);

2.1.4.3 Velocidade de corte (V_s)

Segundo Graf (2010) a velocidade de corte é a velocidade que um ponto da superfície do rebolo se desloca. Assim a Equação 4 representa essa variável.

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

Onde:

v_s é a velocidade de corte (m/s);

n_s é a rotação do rebolo (rpm);

d_s o diâmetro do rebolo (mm);

Segundo Jackson et al. (2001) o aumento da velocidade de corte proporciona uma diminuição nas forças envolvidas no processo, um menor desgaste do rebolo e uma melhor rugosidade da superfície. Consequentemente aumenta a qualidade da peça e melhora a produtividade. Entretanto o aumento da velocidade de corte a quantidade de energia térmica produzida no processo também aumenta.

Marinescu et al. (2007) cita que a maioria das retificadoras tem como padrão uma velocidade de corte de 43 m/s para abrasivos convencionais. O mesmo autor afirma que ao aumentar a velocidade de corte a espessura do cavaco diminui assim como o número de arestas ativas de corte.

2.1.4.4 Velocidade da peça (v_w)

A velocidade da peça é definida por Graf (2010) de acordo com a Equação 5.

$$V_w = \frac{\pi \times d_w \times n_w}{60 \times 1000} \quad (5)$$

Onde:

v_w = velocidade da peça (m/s);

d_w = diâmetro da peça (mm)

n_w = rotação do eixo da peça (rpm);

Nota-se que a velocidade da peça é a velocidade periférica da peça. Segundo Graf (2010) o aumento da velocidade da peça faz com que a taxa de remoção de material aumente. Isso causa um aumento do esforço em cada grão, elevando-se a força tangencial de corte. Desta forma, com um aumento da velocidade da peça confere ao rebolo um comportamento macio.

2.1.4.5 Taxa de remoção do material (Q_w)

Segundo Klocke (2009) a taxa de remoção do material é definida como o volume de material removido por unidade de tempo.

Marinescu (2004) define a taxa de remoção do material na retificação segundo a Equação 6.

$$Q_w = b_w \times \pi \times d \times V_f \quad (6)$$

Onde:

Q_w = taxa de remoção de material (mm³ /min)

b_w = largura do rebolo (mm);

v_f = velocidade de mergulho (mm/min)

2.1.4.6 Taxa de remoção de material específica (Q'_w)

De acordo com Rowe (2014) a taxa específica de remoção do material (Q'_w) é a taxa de remoção do material pela largura da retificação, isto permite que o dado se apresente de forma mais geral, sendo mais empregado.

Dividindo a taxa de remoção do material pela largura de retificação temos a Equação 7.

$$Q'_w = \frac{Q_w}{a_p} = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (7)$$

Onde:

Q'_w = taxa de remoção de material específica (mm²/min)

Q_w = taxa de remoção de material (mm³/min);

a_p = largura de contato (mm);

d_w = diâmetro da peça (mm);

v_f = velocidade de mergulho (mm/min).

A taxa específica de remoção do material tem uma particular relevância no estresse causado nos grãos abrasivos, na taxa de desgaste dos abrasivos e todos os aspectos do comportamento do abrasivo, incluindo as altas temperaturas e os danos térmicos (Rowe, 2014).

2.1.4.7 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

Rowe (2014) afirma que quando a espessura equivalente de corte aumenta o estresse nos grãos abrasivos aumenta caso contrário o estresse nos grãos abrasivos diminui. Isso explica o porquê à busca por aumentar a velocidade do rebolo.

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

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

Onde:

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

Marinescu et al. (2004) afirma que a espessura equivalente de corte é muito utilizada por sua simplicidade. Em um trabalho experimental é difícil determinar precisamente o espaçamento dos grãos abrasivos, uma vez que essa variável depende da profundidade de corte e do desgaste do rebolo.

Marinescu et al. (2007) escreve que a espessura equivalente não leva em conta o espaçamento dos grãos na superfície do rebolo. Mas é um fator importante já que determina a espessura com que os cavacos emergem da retificação e para que também sejam consideradas as características do rebolo é possível calcular a espessura teórica máxima do cavaco h_{max} .

2.1.5 Rebolo de óxido de alumínio

Os rebolos são compostos por três elementos, o grão abrasivo, que é o elemento que deve entrar em contato com a peça para remover material desta, o espaço intergranular, o qual serve para a armazenagem do material removido e permite o fluxo de líquido de arrefecimento, e o ligante que tem a função de reter os grãos no rebolo. (WEGENER et al., 2011). Assim, seu desempenho está relacionado ao tipo e ao tamanho do grão, às propriedades abrasivas do material aglomerante e ainda à porosidade do conjunto. Não obstante, tem-se que as propriedades características da topografia do rebolo podem ser condicionadas por meios da dressagem (afiações do rebolo), das condições de desgaste e das especificações do rebolo. A qualidade da superfície da peça, bem como os mecanismos de formação de cavaco, além das forças envolvidas durante o processo de retificação, está diretamente relacionada à forma e ao tamanho das arestas de corte e de toda a cinemáticas decorrente da interação dos grãos abrasivos na superfície da peça (HOLTERMANN, 2013 e DENKENA, 2016).

O rebolo é a ferramenta de revolução utilizada nos processos de retificação. Possui grãos abrasivos ligados por um ligante que formam um corpo abrasivo. Esses grãos formam arestas de corte de geometria não definidas, os quais são responsáveis pela remoção do material no processo de retificação. Segundo Rowe (2014), o rebolo de óxido de alumínio é mais resistente ao impacto que o carboneto de silício e apresenta menor desgaste quando utilizado para corte de aços. Este rebolo é utilizado para aços, ligas ferrosas e ligas de alta resistência. É altamente utilizado dentre os abrasivos, pois se mostra eficaz tanto em operações de desbaste, como acabamento

2.2 Processo de dressagem

O processo de dressagem consiste na criação e a exposição de novas arestas de corte na superfície do rebolo, através de um processo no rebolo que reestabelece o corte da ferramenta (SRIVASTAVA, 2013).

De acordo com Marinescu et al. (2007), a dressagem consiste em um processo que tem por objetivo deixar o rebolo perfeitamente circular e concêntrico com o eixo de rotação, limpar o material da peça incorporado na superfície do rebolo, obter novos grãos abrasivos com arestas de corte afiadas e remover o ligante em volta dos grãos para expor novas arestas.

Em tese, o rebolo deveria se auto afiar quando ficasse desgastado. Para isso, os grãos abrasivos desgastados iriam se fraturar e gerar novas arestas de corte, ou o ligante iria soltar o grão desgastado, expondo novos grãos. Porém, esse processo nem sempre é efetivo, e, portanto, restaura-se as características de corte da ferramenta através da dressagem (JACKSON et al., 2007).

Segundo Rowe (2014), a dressagem é uma preparação do rebolo para a retificação e tem por função:

- Eliminar os desvios de uma forma do rebolo;
- Alcançar as arestas de corte afiadas e uniformizá-las;
- Eliminar o ligante em volta do grão abrasivo para criar uma superfície mais aberta do rebolo, principalmente para rebolos resinoides e vitrificados;
- Remover a camada de abrasivo que está carregada com cavacos gerados pela usinagem.

Durante o processo de retificação, em torno de 10% do rebolo é realmente gasto usinando a peça e cerca de 90% do rebolo é gasto no processo de dressagem. Porém, esse processo de afiação do rebolo é de suma importância, uma vez que durante a usinagem, as arestas de corte dos grãos abrasivos ficam arredondadas, aumentando as forças de retificação, além de ocorrer o empastamento do rebolo, onde os poros do mesmo ficam entupidos com material da peça. Sem a dressagem, o rebolo perde seu poder de corte e qualidade superficial da peça fica prejudicada (JACKSON et al., 2007).

A aplicação de fluido de corte é indispensável na dressagem para manter o diamante em temperaturas baixas. Vale ressaltar que o fluido deve ser ligado antes do início da dressagem para evitar choque térmico no dressador (ROWE, 2014).

Algumas anomalias no rebolo como a rugosidade, ondulação, desgaste e perda do perfil, são definidas como defeitos macroscópicos, sendo que os mesmos provocam problemas no processo de retificação e falta de precisão dimensional nas peças usinadas. Já a falta de corte

nos grãos abrasivos, que gera um aumento das forças na retificação, necessitando de uma maior potência requerida, é um defeito microscópico. Esses defeitos ainda aumentam o risco do surgimento de danos térmicos nas peças, e, portanto, a dressagem tem por objetivo criar as condições ideais para o rebolo ser eficiente (KLOCKE, 2009).

A dressagem é necessária tanto no primeiro uso do rebolo, quanto durante o processo de retificação, para manter a qualidade da peça. Oliveira et al. (1992) definem o conceito de ponto de dressagem, ou seja, o momento adequado de realizar essa operação, onde os grãos abrasivos perderam suas arestas de corte e não removem material de maneira eficiente. Deve-se salientar se a dressagem for realizada de forma tardia, aumenta-se o risco de queimas superficiais na peça, trincas, e peças fora da tolerância, enquanto se for feita de forma precoce, proporciona um desgaste prematuro da ferramenta e perda de tempo na linha de produção.

O tipo de dressagem é definido de acordo com os requisitos econômicos e qualitativos, além do tipo de abrasivo do rebolo, seu ligante e seu formato. Esses parâmetros determinam os possíveis métodos e as ferramentas que serão utilizados no processo de dressagem (KLOCKE, 2009).

Marinescu et al (2004) definem que existem dois tipos básicos de dressadores: estacionários e os rotativos. Sobre os estacionários, Rowe (2014) diz que os mesmos são divididos em dressadores estáticos de ponta única e conglomerado.

No processo de dressagem mecânica, a ferramenta não exibe nenhum movimento na direção periférica do rebolo, logo, o perfil do rebolo é originado pelo movimento axial no contorno do rebolo, o que justifica a comparação desse processo com o torneamento (KLOCKE, 2009).

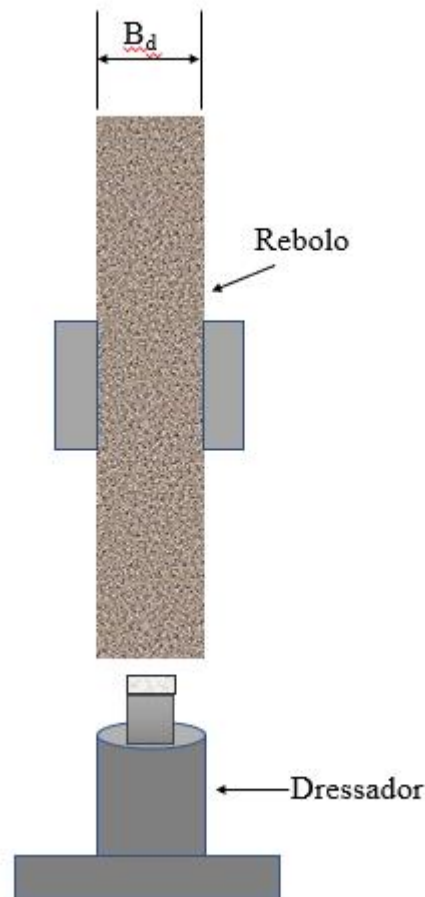
De acordo com a Figura 5 o dressador estacionário conglomerado utilizado no presente trabalho, essa ferramenta utilizada no processo não exibe nenhum movimento na direção periférica do rebolo. O perfil do rebolo é originado pelo movimento axial no contorno do rebolo, compara-se esse processo com o torneamento (KLOCKE, 2009). Esse tipo de dressador conglomerado possui vários pontos de corte, assim possui uma vida útil maior (ROWE, 2014). O dressador conglomerado possui um arranjo espacial de grãos que permite maiores avanços na dressagem e uma maior largura de dressagem. No entanto, os resultados da dressagem nesse caso não são exatamente previsíveis

Os grãos de diamante ao entrarem em contato com o rebolo se arredondam e abafam a sua capacidade de corte, que sejam retirados da matriz. Isso acontece devido ao acréscimo das forças operando sobre eles, deixando que os grãos com cortes afiados, situados na camada logo abaixo, possam agir. Como consequência, sucede uma leve alteração nos resultados da

dressagem, o que é perceptível em metodologias de precisão. De outra maneira, caso os grãos desgastados não forem extraídos, o dressador perde o poder de corte e não consegue mais abrir a estrutura do rebolo, passando praticamente a alisá-lo (MURAKAWA et al., 2001).

Ao se utilizar os dressadores conglomerados com grãos de diamante natural, pode incidir o macro lascamento do diamante em condições de elevadas forças. Caso isso ocorra, a consequência da dressagem oscilará muito. O importante é que desse modo são instituídos novos gumes afiados, alterando-se os parâmetros da dressagem, os resultados podem ser de boa qualidade. Por outro lado, a repetição do processo é baixa (GRAF, 2008)

Figura 5: Representação esquemática do processo de dressagem com Dressador conglomerado



Fonte: Bianchi 1990, modificado.

2.2.1 Microefeito na dressagem

O processo de dressagem conforme mostra a figura 6, feito com dressadores conglomerado gera o micro-efeito assim definido por Malkin (1989), como um efeito gerado a partir do arrancamento dos grãos desgastados do ligante pela fratura, gerando novas arestas de corte.

Ainda se tratando do micro-efeito gerado pela dressagem, Rowe (2014) afirma que o acabamento da superfície do rebolo depende do grau de recobrimento U_d , que é definido pelo número de vezes que um ponto da superfície do rebolo é recoberto pelo dressador. O grau de recobrimento pode ser especificado pela Equação 9:

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

De acordo com Inasaki e Okamura (1985) o S_d é calculado através da velocidade de dressagem (V_{fd}) (velocidade transversal da mesa da máquina durante o processo de dressagem) pela rotação do rebolo (n_s), conforme Equação 10.

$$S_d = \frac{v_{fd}}{n_s} \quad (10)$$

2.3 Fluido de corte

Os fluidos de corte foram introduzidos no processo de retificação para melhorar as características do processo. Ele aumenta a vida útil da ferramenta, possibilita velocidades de corte mais econômicas e assim melhora a eficiência da produção (SOKOVIC e MIJANOVIC, 2001).

As principais tarefas que um fluido de corte deve cumprir são (KLOCKE, 2009):

- Reduzir o atrito entre o grão abrasivo e a peça e entre o ligante e a peça, formando uma camada lubrificante.
- Resfriar a área de contato, absorvendo e transportando o calor.

Assim o fluido de corte não apenas deve refrigerar como também tem um papel importante na lubrificação. O lubrificante tem o papel de evitar ou diminuir o contato sólido entre os elementos para reduzir os desgastes (MARINESCU et al., 2004).

2.3.1 Importância da aplicação dos fluidos de corte no processo de retificação

A remoção de material por processos abrasivos pode ser desafiadora devido a altas potências requeridas resultando em altas temperaturas. Assim é necessária uma efetiva lubrificação e refrigeração para assegurar que a temperatura não se torne excessiva (BARCZAK et al., 2010).

Na retificação altas temperaturas são atingidas. Para evitar danos térmicos, é essencial que grandes quantidades de energia térmica sejam retiradas do processo, caso contrário pode ocorrer queima da peça, desgaste acelerado do rebolo, deformações induzidas termicamente resultando assim em baixa qualidade dos componentes (SANCHEZ et al., 2010).

Segundo Oliveira et al. (2012) o uso de fluidos de corte reduz a temperatura e o atrito do processo, com isso as forças e o estresse residual que atuam na peça são minimizados.

Para Debnath et al. (2014) o fluido de corte além de aumentar a vida útil da ferramenta, produz um melhor controle dimensional e uma ótima qualidade superficial. Esse último item não é desejado apenas por apresentar uma melhor aparência, mas também para melhorar as propriedades tribológicas como as tensões residuais e a resistência a corrosão.

O fluido de corte é responsável por diminuir o atrito entre o rebolo e a peça, pelo seu efeito lubrificante, além disso, ele remove o cavaco produzido da área de corte e tem um papel importante na refrigeração do processo (CAGGIANO e TETI, 2013).

Os fluidos de corte reduzem a temperatura de duas formas. A primeira é retirando diretamente o calor do processo e a segunda é mantendo a eficiência de corte do rebolo, isto é, reduzindo o atrito e o desgaste do rebolo diminui a energia específica e assim a temperatura produzida é reduzida. Essa última forma é mais significativa do que o resfriamento direto (ROWE, 2014).

Klocke (2009) ainda descreve as tarefas secundárias como:

- Transportar os cavacos gerados no processo para fora da área de contato;
- Proteger contra a corrosão tanto a retificadora quanto a peça;

Rowe (2014) adiciona algumas funções do fluido de corte:

- Limpeza do rebolo;
- Aprisionar os a poeira e os gases tóxicos produzidos no processo.

Como as propriedades químicas, físicas e biológicas do fluido de corte influenciam na retificação, a seleção correta do fluido de corte é de extrema importância (KLOCKE, 2009).

Segundo Klocke (2009) a principal característica física de um fluido de corte é a viscosidade. Essa característica está ligada as duas principais funções do fluido de corte, a lubrificação e a refrigeração. Um fluido de corte com baixa viscosidade aumenta o poder refrigerante, é mais fácil de retirar da peça e de se filtrar. No entanto aumenta a produção de vapor, formando uma névoa que causa irritação na pele e doenças respiratórias.

Para a seleção de um fluido de corte apropriado deve-se levar em conta características econômicas, estabilidade operacional (vida útil) e se é agressivo ao meio ambiente. Para atender essas exigências o fluido deve ser (MARINESCU et al., 2007):

- De fácil reciclagem e filtragem;
- Remoção fácil do fluido impregnado na peça, rebolo e máquina;
- Baixa inflamabilidade;
- Exibir boa compatibilidade com os materiais envolvidos no processo.

2.3.2 Problemas causados pelos fluidos de corte

Apesar das vantagens oferecidas pelo fluido de corte, a utilização dele tem sido questionada devida seus vários efeitos negativos. Seu uso inapropriado pode causar danos ao solo e às reservas de água, além de ser responsável por problemas respiratórios e reações alérgicas nos operários (DHAR et al., 2007).

A utilização de fluido de corte geralmente produz uma névoa, fumaça, partículas em suspensão que prejudicam a qualidade de ar no ambiente de trabalho. Os fluidos de corte convencionais utilizados na retificação são considerados um problema para os fabricantes, pois essas substâncias provocam sérios danos à saúde humana e ao meio ambiente (SADEGHI et al., 2009).

O fluido de corte sofre alterações durante a retificação. A princípio o fluido de corte novo oferece apenas um pequeno risco, isso muda conforme o seu tempo de serviço. Substâncias secundárias surgem pela reação de produtos e por microrganismos presentes que se

desenvolvem no fluido. Os operários podem ser afetados pelo contato dessas várias substâncias contidas no fluido de corte. A saúde deles pode ser prejudicada pelo contato na pele, por engolir as substâncias ou inalando os vapores e a névoa produzida (SOKOVIC e MIJANOVIC, 2001).

Para evitar a proliferação de bactérias e fungos, aditivos químicos são adicionados, e esses aditivos são substâncias tóxicas tanto para o meio ambiente como para os trabalhadores. Tem-se discutido que as indústrias utilizam o biocida mais para manter o fluido de corte estável do que para proteger a saúde dos trabalhadores. Muitos biocidas possuem em sua composição formaldeído é um potencial causador de câncer, assim como pesquisas mostraram que o uso de óleo mineral é cancerígeno (SHOCKRANI et al., 2012).

De acordo com Hadad (2015) a exposição prolongada aos fluidos de corte durante a usinagem pode causar irritações respiratórias, asma, pneumonia, dermatite e câncer. Hadad e Sharbati (2016) o descarte inapropriado de óleos a base de petróleo é problemática, pois causam contaminação da água, poluição do ar e solo.

Os fluidos de corte são conhecidos por causar irritações na pele, como a dermatite. Possuem metais pesados que afetam o sistema respiratório e digestório (IRANI et al., 2005).

De acordo com Rabiei et al. (2015) um estudo mostrou que 80% das doenças causadas nas indústrias são em consequência pelo contato com o fluido de corte. A composição do fluido de corte é complexa e pode ser irritante ou alérgica. Toxinas são geradas por bactérias e fungos que se proliferam no fluido, principalmente em fluidos de corte a base de água.

De acordo com Rowe (2014) o usuário deve ser responsável para descartar o fluido de corte. Vários aspectos ambientais devem ser considerados. As leis nacionais e internacionais têm aumentado a fim de evitar potenciais danos à saúde e proteger o meio ambiente.

Com as fortes pressões sobre questões ambientais, as indústrias começaram a procurar novos métodos de lubrificação, para uma produção mais sustentável. O novo paradigma da produção sustentável inclui o critério social, meio ambiente e econômico (SANCHEZ et al., 2010).

2.3.3 Custos dos fluidos de corte no processo

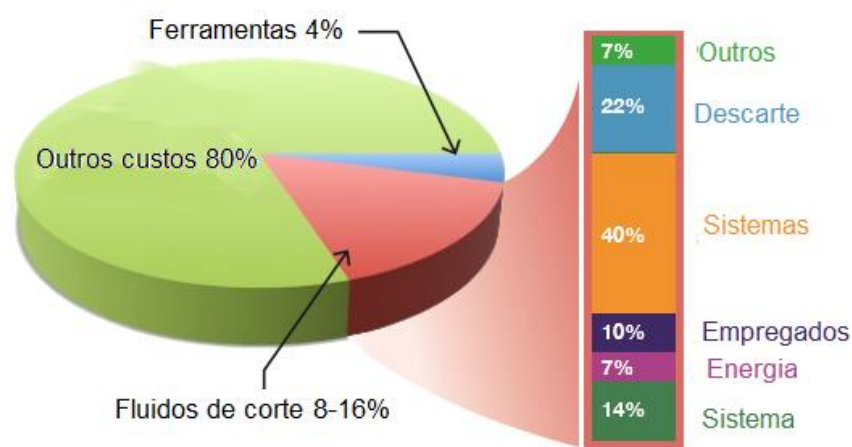
Além do custo do próprio fluido de corte, outros aspectos devem ser levados em conta como: o descarte do fluido de corte, a reciclagem, as medidas de segurança, entre outros fatores (ALBERDI et al., 2011).

Para as companhias o fluido de corte representa uma grande quantidade do total de custos, chegando a ser maior do que os gastos relacionados a ferramentas de corte (DHAR et al., 2007).

A indústria automobilística gasta de 15 a 30% dos custos de fabricação em fluidos de corte (RABIEI et al., 2015).

Segundo Walker (2013) a redução do fluido de corte tem várias vantagens, entre elas tem-se a vantagem econômica. Isto porque os gastos com fluido de corte nos processos de usinagem chegam a 16% do custo total do processo. O autor ainda explicita a divisão dos gastos na Figura 6.

Figura 6: Divisão de gastos com o método convencional de lubrificação



Fonte: Walker, 2013, modificado.

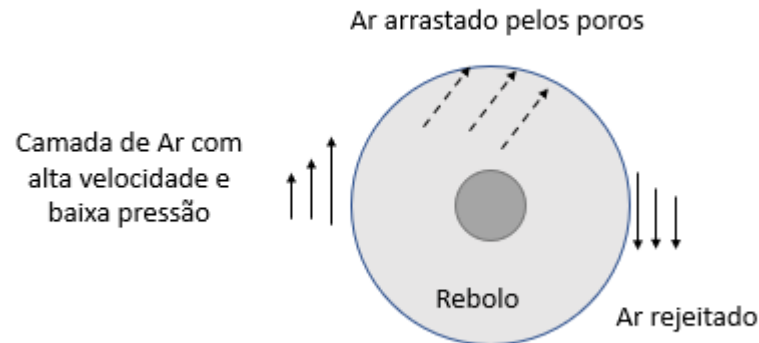
2.3.4 Otimizações na aplicação dos fluidos de corte

O aumento da preocupação com o meio ambiente e sustentabilidade tem feito com as pesquisas para diminuição do uso de fluido de corte aumentem. Pesquisadores começaram a analisar novos métodos de aplicação de fluido de corte no processo de retificação. Aspectos relacionados à geometria e ao posicionamento são de extrema importância para que o fluido consiga atingir a área de corte (ALBERDI et al., 2011).

Segundo Alberdi et al. (2011) a dinâmica de fluido computacional (CFD) é um software de grande ajuda na otimização do design dos bocais utilizados na retificação. O bocal Webster se tornou popular nos recentes anos devido a seu excelente desempenho em diferentes situações.

O ar situado em volta do rebolo forma uma barreira que impede a penetração do fluido na zona de corte. Essa barreira é um ambiente de baixa pressão com o ar se movimentando em grandes velocidades. Quando essa camada de ar chega ao contato do rebolo com a peça, não consegue atravessar, assim se desfaz como esquematizado na Figura 7 (ROWE, 2014).

Figura 7: Fluxo de ar existente nos rebolos em rotação



Fonte: Rowe, 2014, modificado.

De acordo com Ebbrell et al. (2000) essa camada de ar impede que a maioria do fluido de corte não chegue a zona de retificação. Assim o fluido de corte aplicado com um bocal que produz jato tem dois benefícios, o primeiro é que o fluido adquire velocidade necessária para vencer a barreira de ar, e o segundo é que pode ser utilizado na limpeza do rebolo, removendo os cavacos alojados.

2.3.5 Aditivos de fluidos de corte

Muitas vezes, o fluido de corte em sua forma pura, não atende a todas as necessidades ao qual é solicitado. Portanto, frequentemente são utilizados aditivos que garantem propriedades extras ao fluido original, alterando as características físicas e químicas dos mesmos, melhorando seu desempenho.

Dentre os tipos de aditivos, pode-se citar (KLOCKE, 2009):

- Aditivos que melhoram o processo físico propriamente dito, como aditivos de refrigeração;
- Aditivos que alteram as propriedades químicas do fluido, lhe garantindo propriedades anti-corrosivas, por exemplo;
- Aditivos tribologicamente ativos, que reduzem o atrito na zona de corte.

2.3.6 Uso do V-active VCI no processo de retificação

Um método eficaz e relativamente barato de controlar a corrosão em ambientes fechados é o uso de inibidores voláteis de corrosão (VCI's). Esses compostos podem ser usados como protetores temporários e uma das características que os distinguem dos sistemas permanentes de prevenção da corrosão, como pinturas e revestimentos metálicos, é que eles podem ser removidos da superfície (ESTEVÃO E NASCIMENTO, 2001).

Portanto, os VCI's são uma ferramenta boa e econômica para a proteção de metais e ligas contra os danos causados pela corrosão atmosférica.

Os VCI comerciais são sais de ácidos orgânicos e inorgânicos juntamente com compostos aminos, geralmente fornecidos como cristais contidos em suportes de espuma de plástico e aplicados em veículos tais como papel ou plástico (FODOR, 1985).

Além disso, são adicionadas a ambientes corrosivos fechados em doses relativamente pequenas e podem reduzir significativamente a taxa de corrosão subsequente (BASTIDAS et al., 2005).

As bases orgânicas (geralmente aminas) funcionam como um "carregador passivo e ativo em alguns casos" que transporta o íon quando volatilizado, depositando o mesmo sobre a superfície metálica, formando um filme uniforme e invisível. Os inibidores voláteis de corrosão (VCI's) são compostos que têm a capacidade de vaporizar e condensar em uma superfície metálica, tornando-a menos suscetível à corrosão pela formação de uma fina camada de uma película protetora (BASTIDAS et al., 2005; VALDEZ et al., 2006 SKINNER, 1993).

A escolha de um composto químico como VCI depende da sua pressão de vapor e eficiência para evitar a corrosão ao formar um filme de proteção. A pressão de vapor do VCI deve possuir valores ótimos (KUMAR E SAINI, 2012).

Em um sistema ideal, para garantir proteção, o recipiente deve ser selado hermeticamente, resultando no equilíbrio do sistema. Neste caso, a durabilidade do componente a ser protegido pelo VCI pode ser infinita. Se houver uma troca entre o meio interno com o externo (vazamentos pequenos ou aberturas), haverá uma "renovação" no meio, o que provoca o consumo e, portanto, uma diminuição da concentração do VCI aplicado (FODOR, 1985).

Outra vantagem dos VCI's é que as moléculas volatilizadas podem atingir os espaços difíceis de alcançar porque, como é uma fase de vapor, a condensação ocorre em qualquer local da superfície metálica, fato que não é possível com outros tipos de proteção, como óleo ou graxa (GENOVEZ et al., 2015).

De acordo com Magrini (2019) após as análises feitas nesse estudo da retificação do aço endurecido com rebolo de óxido de alumínio, foi possível concluir que o fluido com a nova formulação de inibidores de corrosão (V-active VCI) apresentou melhores resultados para as variáveis de saída da retificação, quando comparado com o fluido base:

A rugosidade média Ra da peça foi superior (menor rugosidade) de acordo com a Figura 8 e o desgaste diametral do rebolo conforme Figura 9 foi considerado menor, com redução da emissão acústica com fluido V-active VCI, quando comparado com o fluido base.

Desvio de circularidade apresentaram uma pequena perda de qualidade conforme a Figura 10 com a utilização do fluido com V-active VCI, porém ainda com excelentes resultados.

Potência Elétrica e Vibração não apresentaram diferenças significativas entre os fluidos.

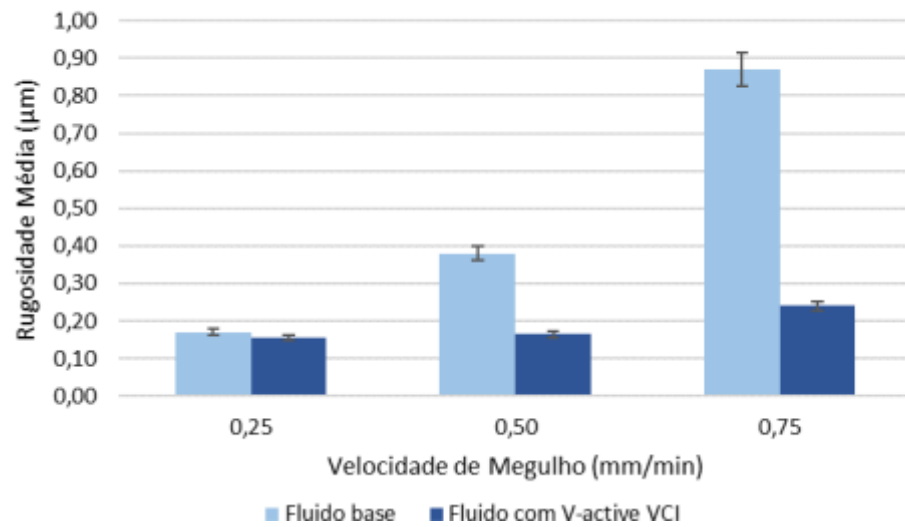
A Principal vantagem do fluido VCI foi o rendimento superior em maiores velocidades de avanço. Isso permite um aumento da produção, devido a maiores taxas de remoção de cavaco, sem perda de qualidade.

A partir da microscopia óptica e da microdureza Vickers, foi possível verificar que ambos os fluidos refrigeraram de forma eficiente, garantindo não houve qualquer tipo de queima ou danos térmicos.

De acordo com Talon 2019 trouxe benefícios para outras etapas do processo, uma vez que é biodegradável, não é prejudicial à saúde humana e reduz etapas do processo por ser um protetor anticorrosivo. Esta pesquisa traz resultados significativos para o meio industrial, por ser o primeiro estudo da ação dessa nova classe de inibidores de corrosão em fluidos de corte na retificação.

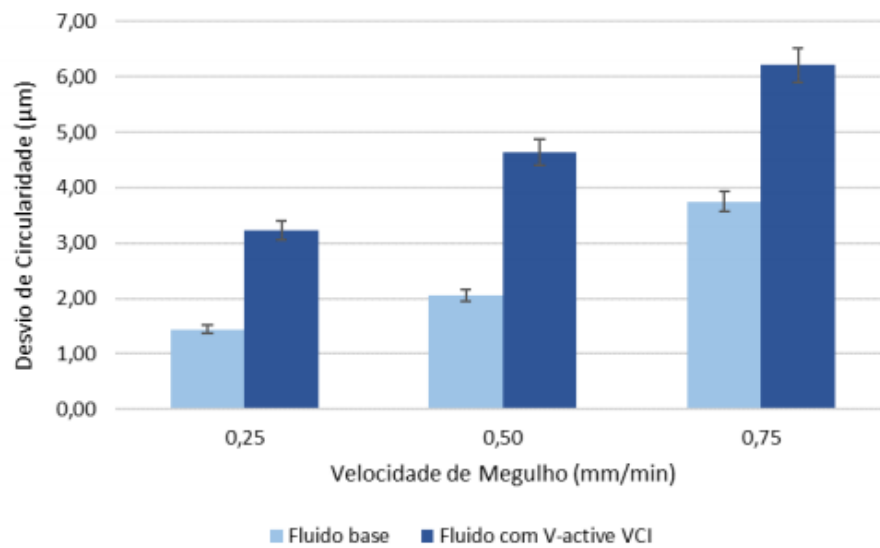
Utilizando o conceito de dissociação do sal VCI promovido pela presença de água, foi desenvolvida uma nova formulação de inibidores químicos que utilizam a umidade como meio de aplicação, ou seja, estes novos inibidores têm a capacidade de transformar a umidade como a rota para aplicação e propagação do mesmo. Tais inibidores, conhecidos genericamente como V-active VCI retém as propriedades de um inibidor volátil. Sua formulação química, quando na presença de água ou contaminante aquoso, migra para o meio e isso promove sua dissociação. Por exemplo, se houver contaminação de água em um tanque de diesel (uma ocorrência comum), a água afunda no fundo do tanque e oxida o metal, e também oxida as partes vazias do tanque acima do diesel. O inibidor V-active VCI, se adicionado ao combustível diesel, migra para o meio aquoso e inibe o processo de corrosão, tanto na fase líquida (inferior) quanto na área de vapor (GENOVEZ et al., 2015).

Figura 8: Rugosidade média Ra por velocidade de mergulho.



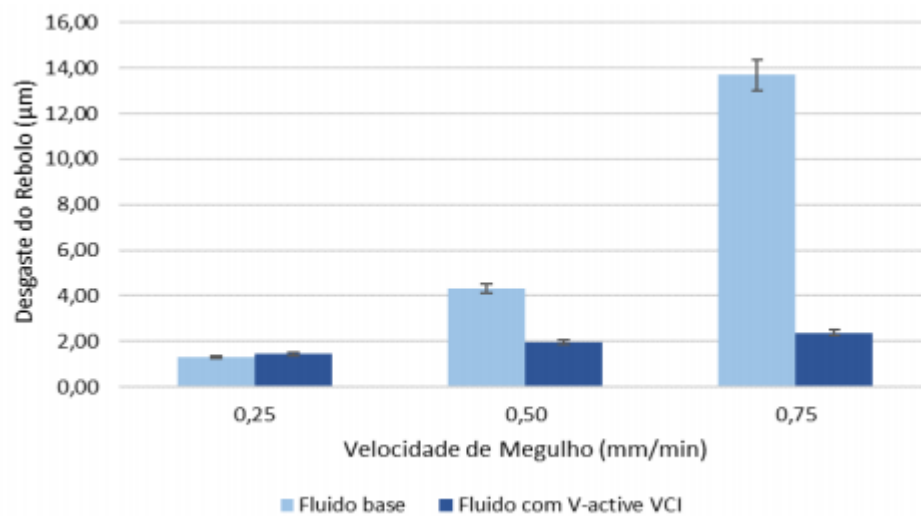
Fonte: Talon, 2019.

Figura 9: Desvio de circularidade por velocidade de mergulho.



Fonte: Talon, 2019.

Figura 10: Desgaste diametral do rebolo por velocidade de mergulho.



Fonte: Talon, 2019.

2.4 A técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL)

Uma eficiente alternativa é a mínima quantidade de lubrificação, que fornece uma eficiente lubrificação e melhora o desempenho do corte com apenas uma pequena quantidade de fluido (RABIEI et al., 2014). A mínima quantidade de lubrificante (MQL) ou usinagem quase seca é uma alternativa para processos de usinagem em que a usinagem a seco não é aplicável, quando há um interesse na eficiência e na qualidade da superfície (SHOKRANI et al., 2012).

De acordo com Marinescu et al. (2007) o MQL surgiu para reduzir a quantidade de lubrificante usado no processo de fabricação de peças. Com a assistência de ar pressurizado, uma névoa de fluido de corte é pulverizada na superfície do rebolo. Idealmente nesse processo uma fina camada de fluido cobre toda superfície do rebolo lubrificando a área de contato. Apesar das dificuldades do processo, em certas operações de retificação a técnica de MQL mostra potencial. Segundo Walker (2013) o MQL utiliza uma pequena quantidade de fluido que reduz o atrito entre a peça e a ferramenta de corte, por possuir um alto fator de penetração na área de contato.

O autor ainda fala que os fluidos utilizados na técnica MQL são mais caros, no entanto o aumento do preço não se compara com a diminuição da quantidade utilizada. Em seus trabalhos Rabie et al. (2014) conclui que o MQL pode consideravelmente diminuir as forças de corte e o coeficiente de atrito para aços macios e duros. Além disso, a qualidade superficial é

significativamente melhor quando o MQL é aplicado na retificação de aços duros. No entanto, no caso de aços moles a qualidade superficial é pior do que quando o aço é retificado a seco ou com fluido de corte em abundância. Comparada com a retificação a seco a retificação com MQL apresenta melhores performances de corte, pois aumenta a vida do rebolo e melhora a qualidade superficial das peças (TAWAKOLI et al., 2009).

A utilização do MQL é considerada mais um método de lubrificação do que de resfriamento. Essa baixa capacidade de resfriamento limita sua utilização na usinagem de materiais mais duros, como titânio e ligas de níquel, onde o principal problema é a geração de calor excessivo (SHOKRANI et al., 2012). Segundo os resultados de Tawakoli et al. (2011) a utilização de rebolos CBN aplicando a técnica MQL apresentam as melhores qualidades superficiais, menores forças de corte. Para os rebolos convencionais os melhores para serem utilizados são os com alta porosidade.

Para Emami et al. (2014) o tipo de fluido de corte utilizado na técnica MQL é de significante importância para o sucesso da técnica. As propriedades químicas e físicas do fluido influenciam na eficiência de lubrificação. Em certas condições de uso na retificação foram observadas menores forças de corte, diminuição no desgaste do rebolo, melhora na rugosidade e baixo residual estresse (BARCZAK et al., 2010). Segundo Mao et al. (2015) com a alta pressão a técnica MQL consegue que o fluido de corte penetre na região de contato com eficiência reduzindo assim as forças na retificação.

Rabiei et al. (2015) cita que a aplicação de MQL na retificação de aços duros reduz a força normal, enquanto a aplicação da técnica na retificação de aços moles faz com que a força normal aumente em comparação com o método convencional de lubri-refrigeração.

2.4.1 Vantagens da utilização do MQL

De acordo com Klocke e Einsenblätter (1997), a técnica de MQL apresenta vantagens se comparada com a refrigeração convencional na retificação. Dentre elas, a redução da potência de retificação e energia específica, além da melhora da qualidade superficial e do menor desgaste do rebolo. Conforme disse Attanasio et al. (2006), MQL é uma técnica que pode reduzir muitos problemas vindos do alto consumo de lubrificantes, como alto custo de usinagem ou problemas ambientais e de saúde. Ainda segundo o mesmo autor, a técnica de MQL apresenta outras vantagens.

O cavaco, a peça e a ferramenta apresentam menos resíduos do lubrificante, o que torna sua limpeza mais fácil e econômica. Também durante a usinagem, a área de trabalho não fica

inundada de fluido de corte, possibilitando assim observar a operação claramente. Heisel et al. (1998) e Klocke et al. (2000) afirmam também que com a técnica de MQL, não é necessário o uso de um sistema de filtragem e reciclagem; há menor manutenção com o fluido; as peças saem mais limpas no final da operação; há redução no volume de fluido impregnado no cavaco e do uso de biocidas e fungicidas. Heisel et al. (1998) relatam que, no caso da retificação, uma vantagem da mínima quantidade de lubrificante é que não aparecem as tensões residuais causadas por grandes gradientes de temperaturas, sendo isto especialmente importante no caso de materiais de corte frágeis.

2.4.2 Desvantagens no uso da técnica de MQL

Para Klocke et al. (2000) a técnica de MQL apresenta algumas desvantagens frente à refrigeração convencional, como por exemplo, a necessidade de implantação de um sistema pneumático capaz de pressurizar o ar, além de outros equipamentos, tais como coifas e exaustores, responsáveis pela sucção de poluentes em suspensão no ar.

Segundo Hafenbraedl e Malkin (2001) a principal desvantagem da MQL refere-se ao resfriamento insuficiente da peça, causando dilatações térmicas e dificuldade com o controle dimensional. Além disso, Diniz et al. (2003) também apresentam algumas desvantagens dos processos de mínima quantidade de lubrificante, poluição ambiental, a pulverização levanta no ambiente atmosférico local, muitas partículas de óleo que exigem cuidados especiais. Deve-se exigir então que a máquina seja totalmente fechada e possua um sistema de exaustão com controle de partículas, no caso do consumo a aplicação do fluido por névoa é considerado sem retorno, isto é, há total perda do fluido de corte. Mesmo a baixos níveis de vazão, o consumo deve ser considerado.

O ruído é outro problema. Na pulverização é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona intermitentemente durante todo o processo. Essas linhas de ar geram muito ruído, normalmente com potência superior àquelas máximas permitidas para o ouvido humano (80 dB). Além de afetar a saúde, o ruído polui o ambiente, prejudicando a comunicação. Outra desvantagem do método MQL está no maior entupimento dos poros do rebolo. Como a característica técnica e funcional do sistema de mínima quantidade de lubrificante é o uso de baixa vazão de fluido, a remoção dos cavacos gerados na zona de corte é menor. Como consequência ocorre um maior entupimento dos poros da ferramenta abrasiva

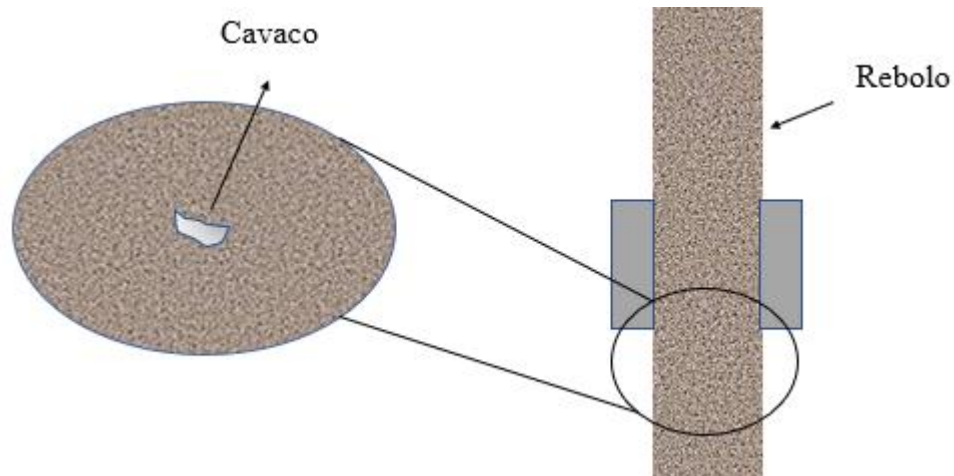
2.5 Fenômeno do entupimento dos poros do rebolo

Wang et al. (2000) comenta quando a energia na interface rebolo e a peça reproduz um aumento na temperatura, pode ocorrer maior aderência de partículas metálicas nos poros da do rebolo. Por conta disso, haverá uma elevação de temperatura, causando danos térmicos como a queima superficial da peça, além do acabamento da peça não ser satisfatório e aumentar o desgaste do rebolo. Portanto, quanto menor a energia específica associada ao processo, menor a chance de danos ao trabalho (SALMON, 1992).

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

Explicando ainda melhor este fenômeno, quando o rebolo inicia o contato com a peça, os cavacos vão sendo gerados e não são eliminados da zona de corte com a aplicação do sistema de refrigeração convencional, mas quando se utiliza o MQL, misturam-se ao óleo do MQL e alojam-se nos poros do rebolo como mostra a Figura 11. À medida que a usinagem ocorre, essa proporção de cavacos vai aumentando até o momento em que ocorre o contato entre a peça e os cavacos alojados. Assim, haverá atrito entre eles, ocasionando apenas deformação elástica e plástica da peça, além do atrito maior, o que aumentará a potência de corte, a rugosidade e desvio de circularidade da peça e o desgaste do rebolo. O cavaco no poro do rebolo irá gerar reações nos grãos abrasivos e na peça. Com isso, desgaste do rebolo se acentuará pelo desprendimento dos grãos. Adicionalmente, a peça será riscada pelo cavaco, piorando sua rugosidade.

Figura 11: Cavacos aderidos aos poros do rebolo.



Fonte: Barros et al. 2014, modificado

Segundo Sinot et al. (2006), alguns materiais são caracterizados como de difícil usinabilidade, e pode haver um entupimento maior nos poros do rebolo. Este efeito ocorre quando as partículas do material sofrem uma compressão nos espaços entre os grãos. Com altas taxas de remoção, o fenômeno é mais acentuado, e alguns rebolos estão mais suscetíveis ao entupimento.

Os cavacos aquecidos gerados na retificação têm uma tendência de penetrar nos poros do rebolo. Cameron et al. (2010) explica que o fenômeno do entupimento dos poros do rebolo se dá da seguinte maneira: quando os cavacos gerados no processo de retificação não são completamente removidos a partir da superfície de corte do rebolo com a utilização do fluido de corte, se alojam nos poros do rebolo, prejudicando a entrada do fluido de refrigeração na superfície de corte do rebolo e dificultando ainda mais a refrigeração e lubrificação. Estes cavacos afetam o processo e a eficiência da ferramenta de corte devido ao aumento da tensão elástica e a deformação plástica no processo de retificação, o que ainda aumenta o calor gerado. Em outras palavras, as arestas de corte do rebolo deverão aumentar a contribuição total específica de energia, e o calor gerado na zona de corte irá aumentar, aumentando o fluxo de calor para a peça de trabalho.

2.6 Limpeza da superfície de corte do rebolo

Segundo Sinot et al (2006) o processo de limpeza da superfície de corte do rebolo é considerado eficaz quando a carga no rebolo é evitada. Quando a estrutura do rebolo sofre

desgastes devido a retificação, a limpeza deve permanecer eficiente, a fim de diminuir a força de corte.

2.6.1 Limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido

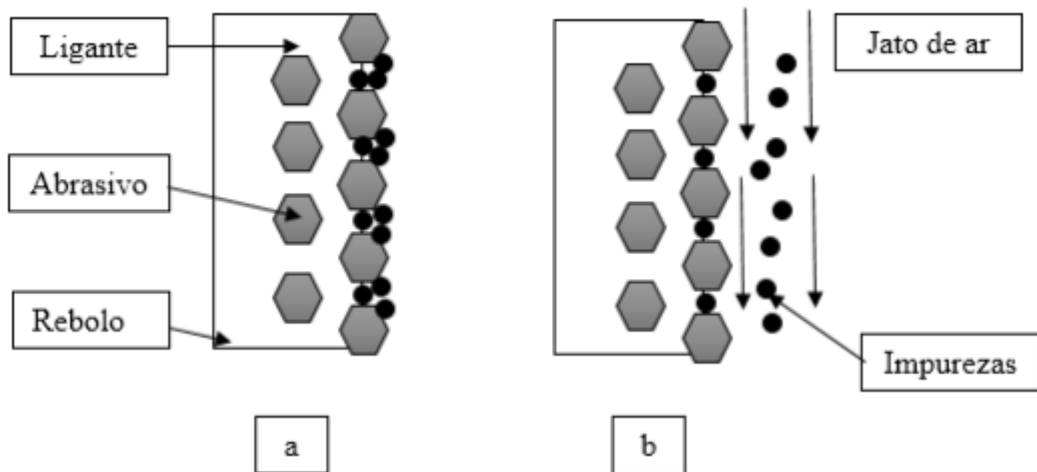
Conforme Oliveira 2012 o uso da técnica de lubrificação MQL associada a um jato de ar comprimido para limpeza da superfície de corte do rebolo com ângulo de incidência de 30 graus proporcionou uma limpeza com melhor resultado entre os ângulos analisados e com isto, melhores resultados em todas as variáveis analisadas, quando comparados a lubrificação convencional e especialmente o MQL sem o uso de jato de ar.

De acordo com Koenig e Arciszewski (1988), os rebolos de CBN (nitreto cúbico de boro) e diamantado são boas ferramentas abrasivas que mantêm a forma superficial quando submetidas a pequenos desgastes. Entretanto, por causa do fenômeno do entupimento dos poros desses rebolos, torna-se complicado manter a forma final da ferramenta.

Em função disso, ocorre a queima na superfície da peça trabalhada e baixa qualidade superficial.

Conforme o trabalho realizado por Lee et al. (2002) na retificação de canais em peças, o jato de ar comprimido é uma alternativa para impedir o fenômeno descrito anteriormente, pois o ar incide no rebolo e retira todas as impurezas que aderiram à ferramenta. Além disso, segundo Li e Seah (2003), destaca que o ar comprimido promove certo efeito lubrificante que não deixa as impurezas direcionarem-se e aderirem à ferramenta, de acordo com a Figura 12 a e b. Dessa forma, quanto menor for a pressão do ar, menor será seu efeito de limpeza.

Figura 12: Efeito do jato de ar comprimido na superfície de corte do rebolo (a) retificação sem limpeza do rebolo (b) retificação com limpeza do rebolo



Fonte: Lee et al 2002, adaptado

Este experimento foi realizado colocando o jato de ar comprimido de duas maneiras, na mesma direção que a rotação do rebolo e na direção oposta à rotação do rebolo Lee et al. (2002) concluíram que quando o jato de ar foi usado, houve uma menor diminuição na profundidade de corte decorrente da diminuição do desgaste da ferramenta abrasiva. Além do mais, a precisão dimensional com o jato de ar foi melhor do que com o líquido refrigerante somente, ou seja, melhores valores de rugosidade podem ser obtidos com a limpeza. Esse resultado indica que o jato removeu o fino pó, e preveniu o entupimento. Isso contribui na manutenção de uma forma do rebolo. Outra conclusão tirada do trabalho foi que o jato de ar na mesma direção da rotação do rebolo obteve melhores resultados que na direção contrária, pois, este último resultou em trepidação no rebolo, o que piora a precisão dimensional.

Oliveira et al. (2011) ressalta que além do uso do jato de limpeza, o sistema projetado permite o ajuste do ângulo de incidência, e os melhores resultados foram alcançados nos posicionamentos tangenciais; a 30° e a 60° nas três velocidades de mergulho empregadas: 0,25; 0,50 e 0,75 mm/min. A inclinação de 30°. do bocal do jato de ar foi a condição que alcançou maior eficiência na limpeza do rebolo nas velocidades de 0,25 e 0,75 mm/min, gerando assim os menores valores de rugosidade. Já para a velocidade de mergulho de 0,50 mm/min as situações de limpeza MQL+30° e MQL+60° apresentam intervalos de confiança próximos, porém as duas situações apresentaram rugosidades inferiores aos outros métodos.

2.7 Aço endurecido

Inúmeros aços têm potencial de serem endurecidos a partir de tratamentos térmicos ou termoquímicos. Nesse estudo, foi utilizado o aço ABNT 4340, com composição química de 0,4% de C, 1,8% de Ni, 0,8% de Cr, 0,23% de Mo, 0,68% de Mn e 0,23% de Si. É classificado como aço temperável e é utilizado em peças que necessitam de uma combinação de resistência mecânica e tenacidade (Silva et al., 2007).

Esse aço é utilizado na fabricação de diversos componentes mecânicos como virabrequins e eixos, peças que necessitam de elevada solicitação mecânica. Esse aço combina uma resistência mecânica média com a resistência a fatura, além de possuir uma alta resistência à fadiga. Possui elevada temperabilidade e boa forjabilidade, no entanto sua usinabilidade é baixa e para ser soldado necessita de métodos sofisticados (CAMARGO et al. 2009).

2.8 Variáveis de saída do processo

Segundo Winter et al. (2014) essas variáveis de saída podem ser divididas em três camadas: a primeira é a transformação da peça em uma forma e acabamento desejado, a segunda é o consumo de energia, gasto e impactos ambientais e por fim os parâmetros que definem a performance da retificação.

De acordo com Tonshoff et al. (2002) a retificação é um processo difícil de prever os resultados, por possuir uma grande quantidade de parâmetros. Assim o monitoramento de dados possibilita um conhecimento maior sobre o fenômeno, gerando potencial para aperfeiçoar o processo quanto ao tempo, custo e qualidade.

Liu et al. (2008) fala que uma retificação de qualidade deve resultar em uma boa rugosidade, integridade superficial e precisão na forma e tamanho.

Holesovsky e Hrala (2004) falam que a integridade superficial está ligada com propriedades superficiais da peça, que são: rugosidade, estresse residual, mudanças na dureza da camada superficial, mudanças estruturais e trincas.

A integridade superficial de uma peça é de extrema importância, pois decide se a peça vai aguentar aos esforços que será submetida. Assim os monitoramentos desses parâmetros de saída devem ser feitos (SINHA et al., 2016).

2.8.1 Emissão acústica (EA)

Segundo Marinescu et al. (2007) a aplicação de sensores de emissão acústica se tornou bem popular, por apresentar os requisitos necessários para um sensor com baixo custo, sem influenciar na rigidez da ferramenta, além de ser capaz de transmitir sinais de partes que rotacionam.

De acordo com Stephenson et al. (2006) como as ondas de EA se propagam com frequências entre 100KHz a 1MHz, acima das frequências naturais estruturais, com isso as vibrações da retificadora não influenciam no sinal de EA. Essas ondas são captadas por um sensor de EA (piezoelétrico) que geralmente é montado em uma posição perto do chão.

A emissão acústica surgiu com o intuito de monitorar o que ocorre na retificação. Entre as possíveis detecções dessa aquisição de dados está a detecção do contato peça-rebolo, esforço demasiado do rebolo e danos térmicos (Babel et al., 2013).

Assim esse parâmetro auxilia no julgamento se o processo está ou não ocorrendo em boas condições. A EA é utilizada na detecção de vários propósitos como o desgaste do rebolo, queima da peça e verificação de dressagem (Kim et al., 2001).

Em seus trabalhos Stephenson et al. (2006) comprovam que a EA pode ser utilizada para detecção do entupimento do rebolo e para monitorar o estado do rebolo. Em seus trabalhos mostraram que quando ocorreu o entupimento do rebolo a energia da emissão acústica aumentou.

Os processos que causam a emissão acústica são as deformações por deslocamento ou deformações nos planos, transformações de fases, atrito, formação de trincas e assim como sua propagação e mudanças estruturais causadas mecanicamente ou termicamente. A emissão acústica é uma classe de fenômenos em que ondas elásticas são lançadas por um lançamento rápido de energia originado de uma fonte localizada no material (TONSHOFF et al., 2002).

Segundo Yang et al. (2014) o sensor de EA é empregado na detecção de queima pelo fato de que os sinais de EA estão relacionados com o fenômeno de queima.

Babel et al. (2013) mostram que existem picos nos sinais de EA captados durante a retificação, esses picos ocorrem no início e término do contato entre o rebolo e a peça. Esses picos potencializam o risco de danos à peça.

2.8.2 Análises metalográficas

Algumas vezes as altas temperaturas na zona de contato da retificação podem provocar mudanças de fases no material, que podem afetar as propriedades mecânicas do produto (Sinha et al., 2016). Assim a importância de avaliar a microestrutura da peça após a retificação.

Ao mesmo tempo em que o atrito entre a peça e o rebolo causa a formação do cavaco e assim a remoção do material, o atrito também gera calor. A temperatura em que a superfície da peça alcança pode ser alta podendo resultar em queima, mudanças nas fases metalúrgicas, retempera, tensões residuais desfavoráveis, trincas e redução da resistência à fadiga (Sieniawski e Nadolny, 2016). Com isso há uma necessidade de avaliar a microestrutura da peça após a retificação.

Utilizando uma técnica adequada é possível observar a microestrutura do material. A importância dessa técnica é que as propriedades mecânicas de um material estão diretamente ligadas com a composição química e sua textura. Para as análises metalográficas deve-se (COLPAERT, 2008):

- Escolha da seção a ser estudada;
- Deixar a superfície plana e polida;
- Ataque da superfície por um reagente químico adequado;
- Observação da superfície em um microscópio.

As duas principais fontes de radiação para a observação da superfície são: a luz e feixe de elétrons de alta energia (microscopia eletrônica de varredura).

Segundo Marinescu (2004) a microscopia eletrônica de varredura é aplicada para investigar a estrutura superficial da peça, isso é avaliar se a peça passou por danos térmicos e/ou mecânicos durante o processo de usinagem. Esse método consiste em bombardear um feixe fino de elétrons na superfície, com isso o impacto dos elétrons primários de feixe faz com que os elétrons secundários da superfície analisada sejam emitidos e captados, assim com a captação dos elétrons secundários é possível construir a imagem da superfície do material.

2.8.3 Rugosidade média aritmética (Ra)

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).

No caso da retificação a rugosidade é uma importante variável de saída, pois o objetivo da retificação é melhorar o acabamento da peça (WINTER et al., 2014).

Apesar de a retificação ser um processo de acabamento, ainda restam do processo pequenos picos e vales, que são a rugosidade. De acordo com Zhang et al. (2015) a rugosidade é uma medida da qualidade da superfície depois da retificação. A rugosidade pode ser calculada pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média (Ra). A rugosidade Ra pode ser calculada ao longo de uma orientação vertical a direção de retificação, posicionando um rugosímetro em diferentes condições.

Zhou et al. (2016) cita que uma alta rugosidade e um pobre acabamento superficial aumentam a probabilidade de iniciação de uma corrosão. Em seus trabalhos comprovaram que quanto menor for o tamanho dos grãos do rebolo, menor será a rugosidade da superfície. Segundo Sieniawski e Nadolny (2016) uma redução de 10 vezes do fluido de corte causa um aumento de 35% na rugosidade da peça.

Para Puerto et al. (2013), os principais fatores relacionados a rugosidade de uma superfície usinada são os parâmetros de dressagem, as condições de usinagem, as forças e a energia que envolvem o processo e o desgaste diametral do rebolo. Segundo Weck et al. (2001), com a utilização lubrificadorrefrigerantes é possível reduzir as forças e a energia que envolvem o processo afim de resultar em uma menor rugosidade na superfície do material. Complementando, o tipo de dressagem e o tempo de centelhamento também podem ser um adicional para melhorar a qualidade superficial, uma vez que podem influenciar na fragmentação dos cavacos (RAMESH e HUANG, 2003). O tamanho dos grãos abrasivos e sua forma mantém uma relação direta com a redução da rugosidade, uma vez que quanto mais arestas de corte estiverem em contato com a superfície da peça, a rugosidade obtida será menor (BIGERELLE et al., 2008).

2.8.4 Desvio de circularidade

Peças com baixo desvio de circularidade tendem a não se encaixar perfeitamente, gerando folgas, comprometendo seu uso. Esse parâmetro é a diferença entre os raios de duas circunferências concêntricas, em que a maior é suficientemente grande para conter o maior pico e a menor é suficientemente pequena para estar contida no maior vale. A deficiência desse sistema é que ele não leva em conta o perfil da secção da peça assim uma mesma tolerância de desvio de circularidade pode possuir diversos perfis (CHO E TU, 2001).

O desvio de circularidade é definido como a diferença entre o ponto mais próximo do centro da peça e o ponto mais distante do centro da peça. Segundo Holesovsky e Hrala (2004) esse tipo de erro aumenta quando há vibração no sistema, nos casos em que o rebolo está mal balanceado ou mal dressado.

Altos coeficientes de atrito gerados durante o processo de retificação contribuem para a formação de erros de desvio de circularidade (SOUZA et al., 2004).

Segundo Shaji e Radhakrishnan (2003) a geometria resultante da retificação depende de:

- Características do rebolo - diâmetro do rebolo, tipo e tamanho do grão abrasivo, tipo de ligante, método de dressagem, grau de balanceamento do rebolo;
- Características da peça – dureza, estrutura e composição química;
- Características da máquina – vibrações e características dinâmicas;
- Condições de operação – velocidade do rebolo, avanço, aplicação de fluido e outros parâmetros.

Portanto, é de grande importância analisar esse parâmetro na retificação cilíndrica, uma vez que nessa modalidade de retificação visa-se obter uma peça cilíndrica exemplo de desvio de circularidade.

Silva et al. (2013) afirmam que a precisão do processo piora conforme a temperatura do processo aumenta devido a dilatação da peça. Como consequência, erros geométricos tendem a ocorrer quando a refrigeração não ocorre de maneira eficaz. Além disso, de acordo com Yoshimura et al. (2005), a adição de água no fluido utilizado melhora significativamente a dissipação de energia térmica, que é provida pela evaporação da água durante o processo de usinagem. De acordo com Belentani et al. (2014) a água possui duas vezes mais capacidade de refrigeração que o óleo puro. Uma vez que ambos os fluidos foram diluídos na concentração de

3%, a quantidade de água no processo foi à mesma para os dois. Dessa forma, o poder de refrigeração da água foi o mesmo para os dois fluidos, e o melhor desempenho do fluido base no desvio de circularidade pode ser explicado pela melhor refrigeração do mesmo, se comparado ao fluido com V-active VCI. Vale ressaltar que o maior desvio de circularidade foi menor do que 7 µm para ambos os fluidos, o que indica que os dois apresentaram resultados consideravelmente satisfatórios nessa variável de saída.

2.8.5 Desgaste diametral do rebolo

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

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

Assim, de acordo com Marinescu et al. (2004), a relação “G” é uma medida de quanto volume de material é removido da peça por unidade de volume de rebolo gasto conforme a Equação 11.

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (11)$$

Onde:

Z_w - volume de material removido (mm³)

Z_s - volume de rebolo gasto (mm³).

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

- Erro na profundidade de corte;
- Erro na dimensão final da peça;
- Aumento das forças características do processo;

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

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).

Segundo Silva et al. (2007), o aumento da lubrificação pela aplicação do fluido de corte, gera a diminuição do desgaste do rebolo, devido a diminuição do atrito entre o grão, a peça e o cavaco. Assim, a lubrificação permite aos grãos abrasivos permanecerem por mais tempo fixado ao ligante, o que gera um menor desgaste diametral do rebolo. Logo, uma eficiente lubrificação da zona de contato reduz o desgaste do rebolo, por diminuir as forças de corte (SILVA et al., 2013).

2.8.6 Potência de retificação

Segundo MALKIN e 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 12.

$$POT = F_T.(V_s \pm V_w) \quad (12)$$

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 13 pode ser descrita como:

$$POT = F_T.V_s \quad (13)$$

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)

2.8.7 Microdureza

O endurecimento mecânico da superfície ocorre quando a superfície sofre uma sobrecarga. Assim há possibilidade de acontecer mudanças estruturais e com isso mudanças mecânicas (HOLESOVSKY E HRALA, 2004).

Segundo Xun et al. (2015) o endurecimento da superfície é um indicador importante da integridade superficial e tem uma influência positiva na resistência a corrosão e ao desgaste.

O endurecimento da superfície ocorre quando há um aumento da temperatura da superfície acima da temperatura de austenitização e em seguida um rápido resfriamento (têmpera). Isso faz com que a microestrutura resultante seja a martensita a qual possui uma alta dureza (SALOTINIS, 2014).

É possível também ocorrer o amolecimento da superfície. A retificação ocorre depois dos tratamentos térmico, assim caso a peça tenha sofrido têmpera e a temperatura do processo for alta a peça pode sofrer revenimento e com isso perder dureza. O revenimento depende da temperatura e o tempo exposto a essa temperatura, assim o tempo de retificação influencia no revenimento da estrutura martensítica (Malkin e Guo, 2008).

A realização desse teste é importante para reforçar os resultados obtidos na micrografia.

2.8.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (superfície da peça)

De acordo com Trino (2014), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) fornece informações morfológicas e topográficas de superfícies sólidas com maior resolução quando comparada à microscopia óptica clássica. Portanto, se apresenta como uma das técnicas mais adequadas para analisar e explicar os fenômenos que ocorrem na escala micrométrica e submicrométrica.

Segundo Marinescu et al. (1998) a microscopia eletrônica de varredura (MEV) é muito utilizada na caracterização de superfícies fraturadas, para investigar a estrutura superficial, detectar falhas e poros abertos. Seu funcionamento consiste no seguinte procedimento: um feixe de elétrons de 0,01 μm de diâmetro varre a superfície linearmente e o impacto dos elétrons primários provoca a emissão de elétrons secundários da amostra. Estes elétrons secundários são detectados e formam uma imagem, onde as regiões mais profundas irradiam menos e as mais elevadas irradiam mais elétrons. Com isso, o microscópio é capaz de formar uma imagem de altíssima qualidade.

O MEV tem sua maior aplicação no exame de superfícies rugosas (contraste topográfico) (MANNHEIMER, 2002). Além disso, a facilidade de visualização e interpretação das imagens foram desde o início um dos elementos marcantes do sucesso do instrumento.

Em sua tese Fusse (2005) afirma que este tipo de equipamento possui algumas vantagens com relação ao microscópio óptico, devido à sua alta resolução em torno de $0,003\mu\text{m}$ contra $0,1\mu\text{m}$ do microscópio óptico. Além disso, o poder de resolução do MEV resulta em ampliações da ordem de 10 a 300.000 vezes. Uma outra vantagem é a profundidade de foco, cerca de 300 vezes maior.

Ainda de acordo com Fusse (2005), o MEV é um equipamento de grande potencial, podendo realizar diferentes análises. Um exemplo disso seria na área de materiais, onde o MEV é utilizado principalmente na análise microestrutural, como precipitados, fases, análise de superfícies fraturadas (análise de falhas), micro-análise qualitativa e quantitativa (com o auxílio de acessórios), determinação do tamanho de grão e porcentagem de fase em microestruturas de materiais. Vale ressaltar que o microscópio eletrônico de varredura possui uma análise voltada para pesquisa e desenvolvimento com fácil interpretação das imagens, com aparência tridimensional.

Zhang et al. (2017) utilizaram a microscopia eletrônica de varredura atrelada a retificação em dois tipos de análises: superfície do rebolo e superfície retificada. Com a utilização dessa ferramenta, os autores conseguiram analisar a uniformidade da porosidade do rebolo, além de identificar pontos de picos nos grãos. Além disso, analisando a peça, os autores puderam verificar o acabamento superficial da peça em diferentes taxas de remoção de cavaco. Porém, um ponto de extrema relevância foi a verificação de fissuras na superfície retificada com a menor velocidade de mergulho, seguido pelo desaparecimento de fissuras em uma velocidade de mergulho mais alta. Isso prova a eficiência do MEV no estudo de variáveis de saída na retificação e como essa ferramenta pode trazer informações úteis para o processo como um todo.

2.8.9 Microscopia Confocal

Segundo Neauport et. al (2009) e Fine et. al (2006), a microscopia confocal está emergindo como uma ferramenta altamente eficaz na caracterização da superfície e subsuperfície de uma variedade de materiais. Seu funcionamento consiste em uma luz monocromática que é dirigida à superfície da peça e a luz refletida é recolhida.

Apresenta um funcionamento bem próximo de um Microscópio óptico, onde uma luz é emitida por uma fonte de excitação que passa através de um orifício situado em um plano conjugado (confocal) com o ponto de estudo da amostra e com um segundo orifício posicionado em frente ao detector (Boratto, 2014). Apresenta a vantagem de ser uma técnica não destrutiva de seccionamento ótico, que permite uma visualização em 3D da superfície do material (topologia), ou ainda, da estrutura interna de materiais semitransparentes (estudo abaixo da superfície).

Um mapa bidimensional da luz captada é fornecido através da varredura da superfície pela luz laser. Com isso, é possível obter a informação do perfil de profundidade a partir da capacidade do microscópio confocal de focar a luz incidente na superfície ou abaixo dela e apenas a luz à partir desse ponto focal é recolhida utilizando uma abertura confocal. Vale salientar que o material a ser analisado deve ser transparente à luz incidente para que possa ser completamente estudado.

De acordo com Klopstein e Lucca (2011), quando usado no modo reflexão, a intensidade da luz refletida é medida, fornecendo informações sobre defeitos ou sítios de espalhamento abaixo da superfície. As resoluções espaciais lateral e de profundidade são comumente limitadas a aproximadamente 1 μm .

Denkena et al. (2016) utilizou a microscopia confocal para medir a rugosidade de uma peça, sendo possível comparar o acabamento visualmente e quantitativamente.

No trabalho de Tahvilian et al. (2015), a microscopia confocal foi utilizada para verificar a topografia de rebolos utilizados em restauração de turbinas, devido a capacidade desse microscópico em analisar a superfície em 3D. A partir do microscópio confocal, foi possível quantificar a altura dos grãos do reboło. Os autores ainda ressaltam que esse método de análise permite uma excelente distinção entre os grãos e o ligante do reboło.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foram descritos os materiais e equipamentos necessários utilizados para a realização da usinagem, além dos métodos empregados para a realização do mesmo. Também foram detalhados os equipamentos e o procedimento para aquisição de dados, medições diretas das variáveis de saída, citadas na revisão bibliográfica, e indiretas das demais variáveis conforme os diversos parâmetros de entrada determinados nos ensaios preliminares. Os ensaios do experimento foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) - UNESP.

3.1 Materiais e equipamentos utilizados

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

3.1.1 Retificadora cilíndrica externa

Os ensaios ocorreram na retificadora cilíndrica externa de mergulho fabricada pela empresa Sulmecânica, modelo RUAP 515H, equipada com comando numérico computadorizado (CNC) da Fagor para acionamento do eixo “X”. Foram utilizados dois programas CNC; um para usinagem dos corpos de prova e outro para impressão do rebolo desgastado.

Por ser equipada com CNC foi possível uma uniformidade na realização da retificação, uma vez que a máquina repetiu todas as vezes o mesmo programa.

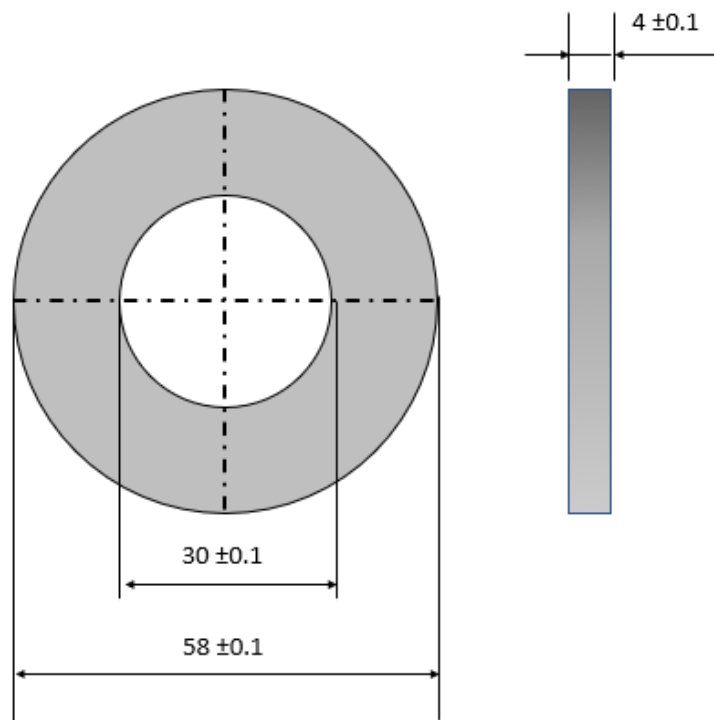
A retificadora possui vedação com cortinas plásticas e placas de policarbonato para minimizar a perda de fluido para o ambiente.

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 (ds), 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.

3.1.2 Corpos de prova

O corpo de prova utilizado para os ensaios foi manufaturado em de aço ABNT4340. Após a confecção, os mesmos foram temperados e revenidos, apresentando uma dureza média de 58 ± 2 HRc. Esse aço é utilizado na fabricação de diversos componentes mecânicos como virabrequins e eixos, peças que necessitam de elevada solicitação mecânica. Esse aço combina uma resistência mecânica média com a resistência a fatura, além de possuir uma alta resistência à fadiga. Possui elevada temperabilidade e boa forjabilidade, no entanto sua usinabilidade é baixa e para ser soldado necessita de métodos sofisticados (CAMARGO et al. 2009). O corpo de prova foi fabricado em formato de anel (Figura 13). Outro corpo de prova em aço dúctil, ABNT 1020, foi utilizado para realizar a impressão do rebolo.

Figura 13: Dimensões dos corpos de prova (em milímetros).



Fonte: Autor, 2022.

3.1.3 Dressagem

As condições de dressagem foi mantida constante nos ensaios de forma a não afetarem no resultado. A dressagem foi realizada com um dressador multigranular do tipo conglomerado

como mostrado na Figura 18, onde os diamantes estão dispostos em uma matriz metálica. O dressador utilizado foi fornecido pela empresa Master Diamond e tem as dimensões de 15x8x10. 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 Equação 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 lubrificação. As condições de dressagem do rebolo foram mantidas constantes a fim de evitar a influência desta variável no processo de retificação.

3.1.4 Fluidos de corte e técnicas de aplicação de fluidos de corte

Nesta pesquisa foram utilizadas 3 técnicas distintas de lubrificação, a convencional com fluido em abundância, MQL sem limpeza da superfície de corte do rebolo e MQL com limpeza da superfície de corte do rebolo por ar comprimido, sendo que foram testados quatro tipos de fluidos de corte.

Para o sistema de lubrificação em abundância foram testadas na seguinte proporção, óleo solúvel semissintético, diluído em água na proporção de 3% conforme as recomendações do próprio fabricante e o fluido de corte sintético MV-Aqua 100, 180 e 182 fabricado pela empresa VCI Brasil, diluído em água na proporção de 3% conforme recomendação do próprio 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, os quatro tipos de fluidos de corte descritos anteriormente foram utilizados sem diluição em água, ou seja, foram utilizados puro, o sistema de MQL é 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. 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 19. O medidor de vazão foi conectado a uma rede de ar comprimido, fornecendo a leitura direta da vazão em m^3/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 é de aproximadamente 162.000 ml/min.

3.1.5 Sistema de limpeza secundário da superfície de corte do rebolo

Esse sistema é independente do sistema de MQL e constituído de um compressor, reguladores de vazão e pressão e o bocal de limpeza. Optou-se por construir um sistema de ar comprimido independente, para não sobrecarregar um único compressor e ter maior eficiência e precisão nos resultados dos ensaios. Ao sistema de limpeza também foi acoplado um sistema para medição da vazão de ar comprimido. Para aplicação do ar comprimido usado na limpeza do rebolo foi projetado um bocal com um sistema de fixação que permite o posicionamento do jato de ar em diferentes ângulos de incidência. 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° em relação ao raio do rebolo, ângulo que apresentou os melhores resultados no trabalho de OLIVEIRA (2011) e, também foi utilizado por Lopes et al. (2019c).

O bocal está fixado na proteção de aço que existe em torno da ferramenta abrasiva. No local é acoplado o medidor de vazão e pressão para obter os parâmetros que serão importantes para a correta limpeza e remoção dos cavacos com óleo aderidos na superfície de corte do rebolo. Durante a realização dos ensaios com o sistema de limpeza o ar foi expelido contra a superfície de corte do rebolo a uma vazão de aproximadamente $30 \text{ m}^3/\text{h}$ e pressão de $5,8 \times 10^5$ Pa.

3.2 Classificação e parâmetros dos ensaios

Os ensaios realizados foram de retificação cilíndrica externa de mergulho. Todas as condições de usinagem foram mantidas constantes, com exceção da técnica de lubrificação aplicada (convencional, MQL e MQL com sistema de limpeza), somando doze condições e, para cada condição, três ensaios foram realizados para aumentar a confiabilidade estatística das análises, totalizando trinta e seis operações de retificação. As condições de usinagem estão descritas no quadro 1. A matriz experimental dos ensaios está demonstrada na Figura 14. A programação CNC utilizada está descrita no Apêndice A: Programa para retificação dos corpos de prova.

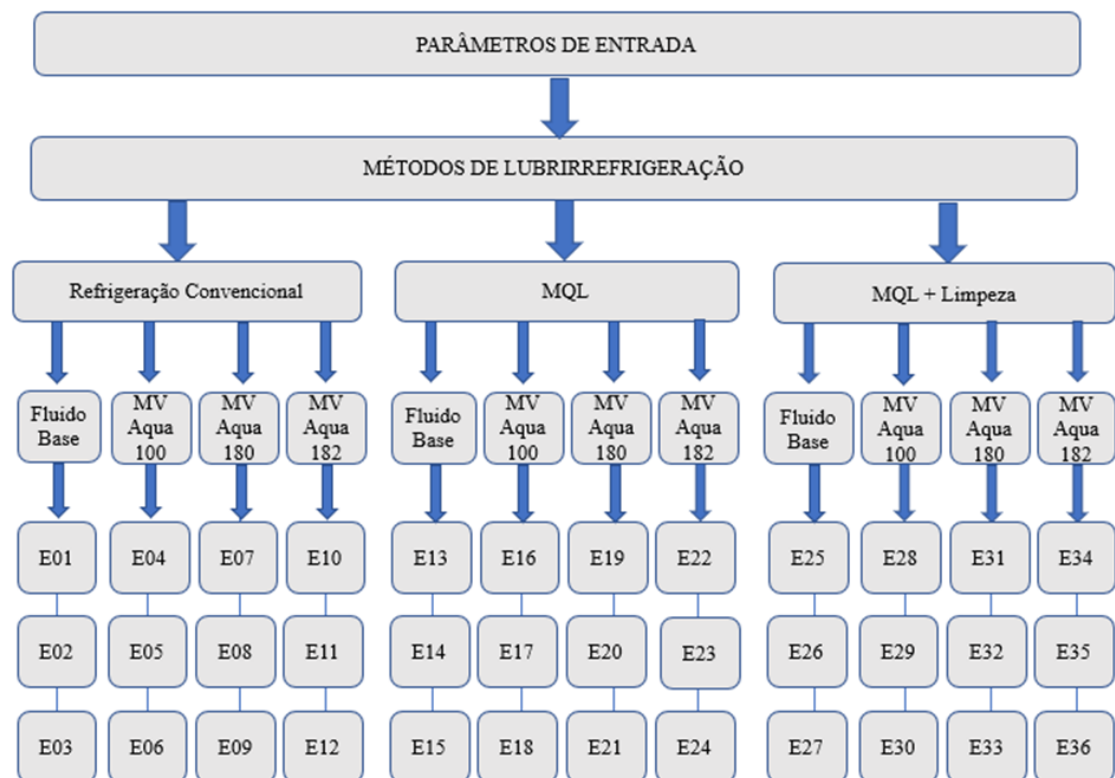
Quadro 1 – Variáveis de entrada no processo de usinagem

Equipamento	Retificadora cilíndrica externa de mergulho, modelo RUAP515H, fabricada pela companhia Sulmecânica, equipada com comando numérico computadorizado (CNC) fornecido pela empresa Fagor
Processo de retificação	Cilíndrica externa de mergulho
Rebolo	Rebolo do tipo convencional de óxido de alumínio branco (Al_2O_3), fabricado pela empresa Saint Gobain (Norton)
Velocidade de corte (v_s)	32 m/s
Rotação do Rebolo	1637 RPM
Velocidade de mergulho (v_f) / Taxa de remoção	0.50 mm/min / 1.62 mm ³ /s
Profundidade de corte (a) / Quantidade de ciclos de retificação	0,1 mm / 50 ciclos, totalizando 5 mm de redução no diâmetro da peça
Largura de retificação (b)	4 mm
Peça	Fabricada em aço ABNT 4340, temperado e revenido, em formato anelar
Rotação da peça (n_w)	81 RPM
Condição de lubrificação	Convencional MQL MQL+WCI
Fluido de corte para método convencional	Fluido de corte semissintético 3% MV-Aqua 100 - 3% MV-Aqua 180 - 3% MV-Aqua 182 - 3%
Vazão de fluido de corte no método convencional	17 L/min

Fluido de corte para técnica de MQL	Fluido de corte semissintético MV-Aqua 100 MV-Aqua 180 MV-Aqua 182
Vazão de fluido de corte na técnica de MQL	150 ml/h
Pressão do ar na técnica de MQL	0,6 Mpa
Velocidade do ar na técnica de MQL	32 m/s
Sistema de limpeza do rebolo	Jato de ar comprimido
Pressão do ar e Vazão no sistema de limpeza do rebolo	0,8 MPa / 30 m³/h
Ângulo de incidência do Sistema de limpeza do rebolo	30°
Tempo de centelhamento (ts)	3,68 s
Dressador	Conglomerado de diamante, dimensões de 15 mm x 8 mm x 10 mm
Profundidade de dressagem (ad)	200 µm – 50 passes de 4 µm
Velocidade de dressagem (vd)	500 mm/min

Fonte: Autor, 2021.

Figura 14: Matriz de ensaios



Fonte: Autor, 2023.

Inicialmente, o rebolo foi devidamente balanceado, instalado na retificadora e dressado conforme condições apresentadas no Quadro 1. O corpo de prova então foi posicionado e fixado pela sua lateral em um eixo e colocado na retificadora em um sistema entre pontas. O rebolo foi então aproximado à peça até tocá-la, e afastado a uma distância de 0,1 mm na direção radial. Feito isso, os sistemas de aquisição de emissão acústica e consumo de potência elétrica foram ligados e a retificadora acionada com a condição de lubrificação desejada, iniciando-se a operação de retificação. Cada ensaio tinha a duração de 50 ciclos, com profundidade de corte de 0,1 mm por ciclo, totalizando 5 mm de redução no diâmetro da peça e, entre cada ciclo, um tempo de centelhamento de 3,68 segundos foi aplicado. Ao término dos ensaios, a retificadora e os sistemas de aquisição de emissão acústica e de potência elétrica eram desligados. Ao término de cada ensaio, a peça foi retirada e, utilizando-se um gravador com ponta de aço temperado, foi identificada de acordo com a condição de lubrificação utilizada e, em seguida, limpa e armazenada para posteriores análises. Além disso, a região utilizada da superfície de corte do rebolo foi inspecionada e fotografada com microscópio óptico portátil. Como a largura do rebolo era maior que a da peça, foi possível realizar dois ensaios utilizando a superfície de corte antes da execução de nova dressagem, somente deslocando-se a posição relativa entre ferramenta e peça. Então, sempre após dois ensaios, o perfil do rebolo desgastado foi impresso no corpo de prova de aço ABNT 1020, devido à baixa dureza desse material, para posterior análise de desgaste diametral e, na sequência, foi realizada nova dressagem para continuidade dos próximos testes, de modo que a condição inicial da superfície de corte fosse sempre a mesma no início de cada ensaio. A programação CNC utilizada na impressão do perfil desgastado do rebolo é apresentada no Apêndice B - Programa para impressão do desgaste do rebolo.

3.3 Caracterização dos parâmetros de saída

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

3.3.1 Força tangencial de corte

A força tangencial de corte foi medida analisando a potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo. Para isso foi monitorado os valores de tensão e corrente elétrica do motor elétrico.

O LUA possui um módulo eletrônico, Curvopower, projetado e construído pelo grupo de pesquisa em usinagem e abrasão da Faculdade de Engenharia de Bauru. O Curvopower transforma os valores de tensão e corrente elétrica provenientes do motor em sinais de tensões adequados para serem enviados a uma placa de aquisição de dados e manipulados pelo programa de aquisição de dados, que foi desenvolvido, utilizando-se o software LabView 7.1®, da National Instruments®.

3.3.2 Emissão acústica (EA)

Para o monitoramento da emissão acústica gerada durante o processo de retificação, foi utilizado um sensor piezoelétrico conectado a uma unidade de tratamento de sinais, modelo DM 42, fabricados pela empresa SENSIS. Estes equipamentos são capazes de monitorar em tempo real o sinal de emissão acústica emitido através do seu valor quadrático médio - RMS (Root Mean Square). O sensor capta as variações das tensões de deformação provenientes da retificação e as envia para o módulo de tratamento de sinais, que as converte em sinais de tensões elétricas, que são então transmitidos à uma placa de aquisição de dados A/D, instalada em um notebook de maneira direta, sem a necessidade de nenhuma manipulação de dados.

Optou-se pelo posicionamento do sensor o mais próximo possível da peça, no cabeçote móvel da retificadora, próximo ao contraponto, minimizando possíveis interferências. Foram realizados diversos ensaios preliminares para determinar a melhor regulagem do sistema de medição da EA e obter boa resposta do nível do sinal RMS sem que este saturasse. Os parâmetros utilizados foram: ganho de sinal = 5; redução de ruído = 0; filtro passa alta frequência de corte = 10 K e constante de tempo = 1 ms. Finalmente, os sinais são tratados pelo software LabView® 7.1 (Laboratory Virtual Instrument), da empresa National Instruments, obtendo-se os valores de emissão acústica emitidos durante o ensaio.

3.3.3 Desvio de circularidade

O desvio de circularidade foi medido com o auxílio de um medidor de desvio de circularidade modelo Talyround 31C, marca Taylor Hobson conforme mostrado na Figura 22. A ponta do apalpador é de diamante, elemento que entra em contato com a peça para a medição do desvio de circularidade. O circularímetro é alimentado através de um sistema de ar comprimido, garantindo precisão e suavidade em seus movimentos.

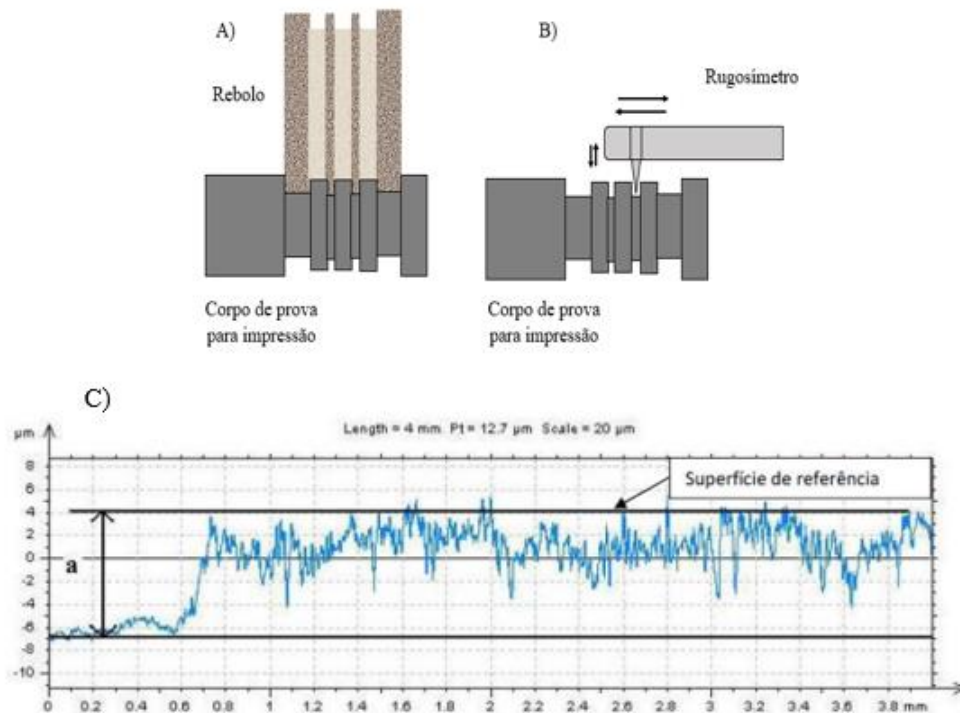
3.3.4 Rugosidade média aritmética (Ra)

Para a medição da rugosidade foi utilizado o rugosímetro Surtronic 3+, da marca Taylor Hobson. A rugosidade foi medida perpendicularmente às marcas da retificação, com um comprimento de medição (cut-off) de 0,25 mm e um percurso total (ln) de 1,25 mm. Para não haver erros na medição a rugosidade foi medida em três pontos em cada peça, distantes de 120° um do outro.

3.3.5 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 15a), e posteriormente, medindo os desníveis existentes entre as regiões gastas e não gastas do rebolo que foram repassadas à peça (Figura 15b). 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 15c.

Figura 15: Medição do desgaste diametral do rebolo.



Fonte: Autor, 2021.

3.3.6 Preparação das amostras para análise da microdureza e metalográfica

Para a realização das análises de microscopia óptica e de microdureza, foi necessária a preparação prévia dos corpos de prova. Para cada condição de lubrificação utilizada, uma peça foi escolhida, totalizando 12 amostras (convencional, MQL sem limpeza e MQL+WCJ). Todos os processos descritos a seguir foram realizados no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia – UNESP – Bauru/SP.

Inicialmente, as amostras foram cortadas dos corpos de prova, utilizando uma máquina de corte metalográfico da marca Struers. Em seguida, uma máquina de microcorte de precisão, modelo Mecatome 180, da empresa Presi, foi utilizada para acabamento das amostras, obtendo-se dimensões finais de 10 mm x 10 mm x 5 mm. Em ambos os equipamentos, foram utilizados discos de corte abrasivo de carbetto de silício (SiC), com aplicação de fluido de maneira abundante e baixa velocidade de avanço, a fim de evitar alterações microestruturais. Após os cortes, para facilitar sua manipulação, as amostras foram embutidas em baquelite, utilizando-se uma prensa para embutimento metalográfico, modelo EM30D, fabricado pela Teclago, com

temperatura de 180°C, pressão mínima de 9,81 MPa e resfriamento de 10 minutos, de modo a deixar a lateral da peça exposta, pois as medições de microdureza e análise de microscopia óptica foram realizadas nessa superfície.

Na sequência, foi realizado o lixamento das superfícies, utilizando-se lixadeira manual da marca Struers, com lixas de carbetto de silício (SiC) de granulometrias 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1000, 1200, 1500 e 2000 mesh, nesta sequência. Ao término do lixamento, as amostras foram. Após, foi realizado o polimento das amostras, em quatro etapas, duas utilizando pastas à base de diamante de 6 µm e 3 µm e duas com alumina em suspensão de 1 µm e 0,3 µm.

Entre cada etapa, a amostra era lavada com água e detergente neutro e seca com o soprador térmico. As operações com pasta de diamante foram realizadas em uma politriz metalográfica rotativa, modelo APL-4, da marca Arotec, enquanto uma politriz modelo AP 2, da marca Buehler, foi utilizada para as etapas com alumina, ambas com rotação do prato de 500 rpm, durante 3 minutos por etapa. Os panos de polimento eram da marca Arotec, modelo DBM para os de alumina e Gold para os de diamante. Ao término do polimento, os riscos oriundos do lixamento foram eliminados e as amostras ficaram espelhadas. Finalmente, para conclusão do processo de preparação, as amostras foram limpas utilizando-se uma cuba de ultrassom digital microprocessada para limpeza, modelo Clear Machine 3560, fornecida pela Yaxun. As amostras foram imersas em álcool isopropílico na temperatura de 25 °C e agitadas por 10 minutos, e na sequência foram secas com o soprador térmico.

3.3.7 Microscopia óptica das peças

Para visualização da microestrutura do material, foi necessário primeiramente realizar o ataque químico das amostras, utilizando-se uma solução de Nital 2% (álcool etílico P.A. com 2% de ácido nítrico P.A.) na temperatura de 25 °C por cinco segundos. Para neutralizar a ação do reagente químico, as amostras foram lavadas com água, detergente neutro e álcool etílico e secas com o soprador térmico. Na sequência, a análise foi realizada com um microscópio óptico, modelo BX51, fornecido pela Olympus, acoplado a uma câmera digital, modelo EC-3, e software fotográfico Leica Application Suite EZ - versão 2.0, ambos da marca Leica, com ampliação de 500x e, após o correto ajuste fino do foco, as imagens selecionadas foram salvas pelo software.

3.3.8 Microdureza Vickers

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 μm , 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 μm 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 μm , ficando assim distribuídas as indentações. 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

3.3.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para realização desta análise, as peças foram cortadas e as superfícies retificadas foram lixadas, polidas e limpas conforme procedimento descrito no item 3.3.6. As mesmas peças que já haviam sido cortadas para realização de microscopia óptica e microdureza foram novamente utilizadas para obtenção destas novas amostras. As superfícies retificadas, após esta preparação, foram analisadas com a utilização de um microscópio eletrônico de varredura, modelo EVO LS15, da marca Carl Zeiss, utilizando ampliação de 500x, acoplado a um computador equipado com o software fornecido pelo fabricante para processamento das imagens. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Faculdade de Ciências da Unesp, campus de Bauru.

3.3.10 Microscopia confocal

Na realização desta análise, foram utilizadas as mesmas amostras da microscopia eletrônica de varredura. Para obtenção de imagens tridimensionais das superfícies retificadas, as amostras foram analisadas com um microscópio confocal, modelo LEXT OLS4100, da marca Olympus, utilizando-se ampliação de 1.000x, acoplado a um computador equipado com o software fornecido pelo fabricante para processamento das imagens. Estas análises foram

realizadas no Núcleo de Manufatura Avançada – NUMA do Departamento de Engenharia de Produção da EESC/USP – São Carlos/SP.

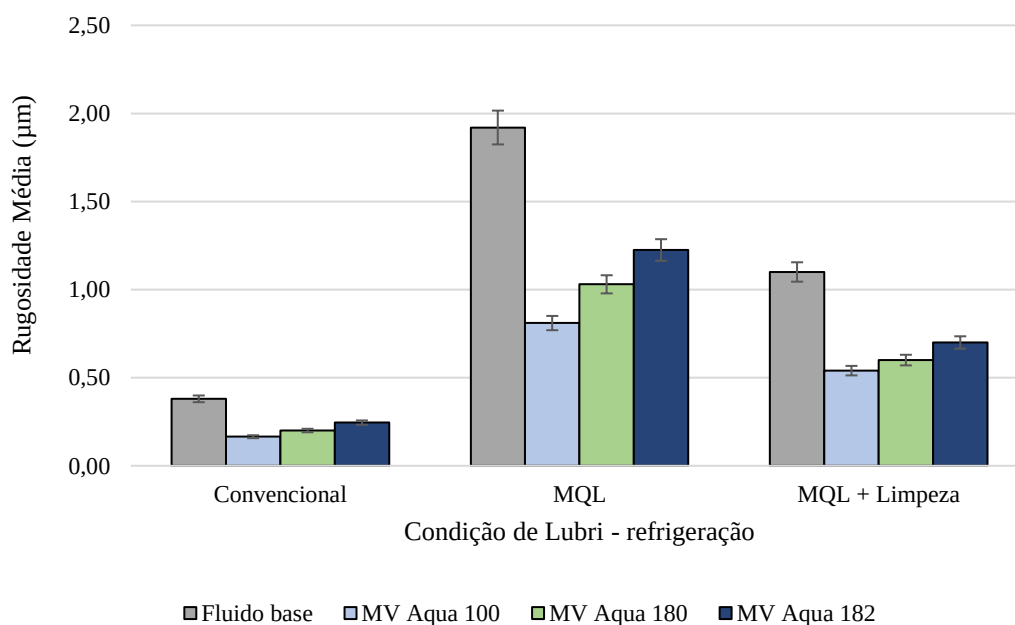
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, os resultados das variáveis de saída do processo foram apresentados e discutidos, com o intuito de avaliar de forma criteriosa o desempenho de cada fluido de corte e a influência dos diferentes métodos de lubrificação. Os gráficos apresentam os valores das variáveis de saída em função do fluido de corte e do método de lubrificação. As imagens apresentadas correspondem à microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e microscopia confocal. A primeira tem por objetivo analisar variações microestruturais da peça, enquanto as duas últimas são utilizadas para verificar de forma qualitativa a superfície retificada da peça.

4.1 Rugosidade média aritmética (Ra)

A Figura 16 apresenta os dados de rugosidade em função do método de lubrificação para cada um dos fluidos estudados, bem como os desvios-padrão para cada condição testada.

Figura 16: Resultado de rugosidade média Ra em função do método de lubrificação.



Comparando os quatro fluidos, nota-se que, nestas condições, os fluidos que apresentam V-active VCI em sua formulação se destacaram devido aos valores menores de rugosidade média, independentemente do método de lubrificação utilizado. De acordo com Talon et

al. (2019), isso se justifica pelo fato do V-active VCI apresentar em sua formulação um agente lubrificante, que tem como propriedade de formar uma película protetiva na superfície da peça. Portanto, durante o processo de usinagem ocorre um aumento da lubrificação desses fluidos, garantindo um melhor resultado que o fluido base.

Entretanto, sabendo-se da vantagem desses fluidos em relação ao fluido base, nota-se que o MV-Aqua 100 apresentou o melhor desempenho entre os três fluidos com V-active VCI. Contudo, os valores do MV-Aqua 180 foram próximos do fluido com melhor desempenho, o que justifica sua aplicação, devido ao custo de mercado reduzido. Já o MV-Aqua 182 demonstrou valores de rugosidade média maiores que os apresentados pelo MV-Aqua 180. Logo, a adição de um aditivo de extrema pressão não contribuiu para a melhora da rugosidade média da peça, como efetivamente teve uma queda de desempenho se comparado ao MV-Aqua 180, não justificando a adição desse aditivo para fins de acabamento.

Segundo Peña-Parás (2019), o aditivo de extrema pressão tem por função formar um filme de óleo protetivo que se mantenha mesmo sobre pressões elevadas, evitando o contato entre peças metálicas. Partindo desse conceito, o aditivo de extrema pressão atuou evitando que o rebolo tivesse o devido contato com a peça, uma vez que o fluido se manteve entre os dois, o que resultou uma piora na rugosidade média da peça. Deste modo, a adição do inibidor volátil de corrosão no fluido de corte se mostrou benéfica para a rugosidade, uma vez que essa variável apresentou melhores valores com a presença do V-active VCI, independentemente do método de lubrificação. Além disso, o MV-Aqua 180 se mostrou economicamente viável, levando em consideração sua proximidade com os valores obtidos pelo MV-Aqua 100 para essa variável. A adição do aditivo de extrema pressão, em contrapartida, se mostrou prejudicial à qualidade da peça, não justificando sua utilização.

Já comparando os métodos de lubrificação, nota-se que a menor rugosidade apresentada na Figura 16 foi utilizando o método convencional de lubrificação. Isso se deve a três características principais desse método de lubrificação: vazão do fluido, viscosidade do fluido e capacidade de remoção de cavacos da zona de corte. Ao empregar elevada vazão de fluido refrigerante, a capacidade de dissipação de calor da zona de corte é elevada uma vez que o mesmo apresenta elevado calor específico, possibilitando uma usinagem com temperaturas mais baixas, fator de extrema relevância na qualidade final da peça concebida. Além disso, por apresentar elevada capacidade de remoção de cavacos da zona de corte, o fenômeno do empastamento é evitado, proporcionando um maior intervalo entre dressagens e, portanto, uma melhor produtividade. Em contrapartida, o maior valor de rugosidade média é proveniente da técnica de MQL, na qual a remoção dos cavacos da zona de

corte é deficiente, colaborando para que parte dos cavacos sejam aderidos ao rebolo, ocasionando o fenômeno do empastamento. Mais além, os cavacos que permanecem na superfície de corte do rebolo aumentam o atrito entre os grãos abrasivos e a peça, ocasionando uma geração de calor nociva à qualidade da peça final. No estudo de Lopes et al. (2019), os autores atribuíram que, os piores valores de rugosidade utilizando o MQL, são consequência de sua baixa capacidade de refrigeração que, não só gera temperaturas de retificação mais altas, como também aumenta a ductilidade do material e suas deformações superficiais, o que prejudica a rugosidade da peça.

Ainda nesse contexto, é notável que, ao comparar os resultados obtidos utilizando o MQL e o MQL+WCJ, verifica-se que o sistema de limpeza do rebolo garantiu uma melhora nos resultados. Isso se deve ao fato de que o ar comprimido do sistema de limpeza possibilita a remoção de parte do empastamento, colaborando para que a ferramenta de corte tenha sua vida prolongada e mantenha sua habilidade de corte.

No estudo de Garcia et al. (2020), os autores utilizaram microscopia eletrônica de varredura, para comprovar a diminuição do efeito do empastamento quando utilizado a limpeza do rebolo. Deste modo, os autores obtiveram resultados semelhantes em sua pesquisa, mostrando que o uso da limpeza do rebolo é capaz de minimizar o empastamento do rebolo, reduzindo o alojamento de cavacos nos poros e, conseqüentemente, o atrito contra a peça, o que melhora a rugosidade da peça.

De acordo com o estudo de Bianchi et al. (2018), uma vez que o método de lubrificação convencional tenha suficiente capacidade de remoção de cavaco, a ocorrência de fenômeno de empastamento é insignificante para afetar a rugosidade da peça. Como resultado, o método de lubrificação convencional forneceu a superfície rugosidade entre as condições testadas.

É importante ressaltar que os fluidos com inibidores voláteis de corrosão na técnica de MQL+WCJ, garantiram resultados próximos ao fluido base na lubrificação convencional. Deste modo, combinar a nova tecnologia de fluidos de corte juntamente à técnica de limpeza da superfície do rebolo, pode garantir resultados satisfatórios para o MQL levando em consideração a qualidade da peça retificada.

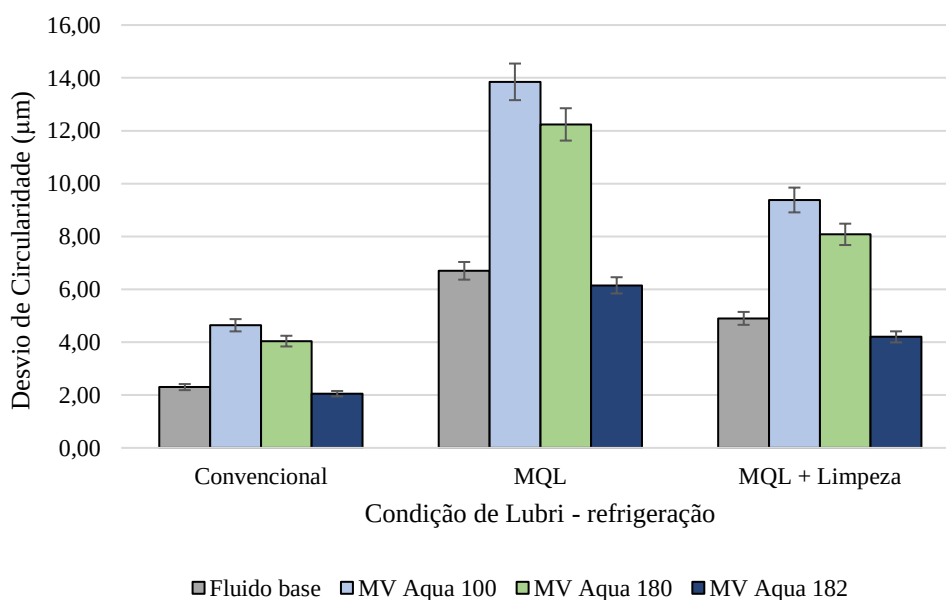
Portanto, a adição de inibidores voláteis de corrosão beneficiou a rugosidade da peça para os três métodos de lubrificação avaliados. Por sua vez, a lubrificação convencional apresentou os melhores resultados de rugosidade, porém, a utilização de MQL+WCJ com fluidos que contém V-active VCI se mostra uma alternativa viável, uma vez que apresenta bons

resultados (se comparado ao MQL sem limpeza) atrelados à redução do volume de fluido de corte utilizado, o que garante redução de custos, além de uma usinagem mais sustentável.

4.2 Desvio de circularidade

Na Figura 17 estão apresentados os valores de desvio de circularidade em função do método de lubrificação para cada fluido estudado.

Figura 17: Resultado de desvio de circularidade em função do método de lubrificação.



A partir da análise da Figura 17, é possível notar que o fluido base e o MV-Aqua 182 apresentaram os melhores valores de desvio de circularidade. Os outros dois fluidos com V-active VCI (MV-Aqua 100 e MV-Aqua 180) apresentaram um desempenho satisfatório para essa variável, entretanto, quando comparados com o MV-Aqua 182 é possível notar uma variação considerável nos valores de desvio de circularidade em todos os métodos de lubrificação. Averiguando esses resultados, percebe-se que a adição do V-active VCI nos fluidos não trouxe vantagens para os valores dessa variável de saída.

Silva et al. (2016) afirmam que a precisão do processo piora à medida que a temperatura do processo aumenta. Isso é justificado pela expansão térmica da peça de trabalho, logo, erros geométricos tendem a ocorrer quando a refrigeração não é suficiente. Atrelado a isso, Talon et al. (2019) afirmaram que o fluido com V-active VCI apresenta menor poder de refrigeração que o fluido base, o que justifica a redução da precisão geométrica do processo. Contudo, o aditivo

de extrema pressão adicionado no MV-Aqua 182 garantiu que o mesmo apresentasse desempenho superior ao fluido base. Esse resultado se contrasta com o obtido pelo MV-Aqua 180 (que se mostrou inferior ao fluido base) indicando realmente que o beneficiador do resultado obtido foi o aditivo de extrema pressão e não o V-active VCI.

De acordo com Marinescu et al. (2007), na retificação, há uma componente de força tangencial e outra componente de força normal ao rebolo. A componente normal tem grande influência no desvio de circularidade da peça pois é responsável por gerar deformações na peça. Dessa forma, o aditivo de extrema pressão atuou formando um filme protetor entre rebolo e peça, distribuindo melhor a componente normal da força, o que garantiu um menor valor de desvio de circularidade.

Já comparando os métodos de lubrificação, Belentani et al. (2013) ressaltam que o desvio de circularidade é fortemente influenciada pelo efeito do aumento da temperatura e da dilatação térmica durante o processo e que a água apresenta maior poder refrigerante em relação aos óleos. Portanto, considerando que o volume de água na lubrificação convencional é substancialmente superior do que no MQL, isso justifica os valores consideravelmente menores para o desvio de circularidade quando utilizada a lubrificação convencional.

A partir da Figura 17, é possível observar que os maiores desvios de circularidade ocorreram na condição em que a técnica MQL foi empregada. Isso se deve à dificuldade dessa técnica em refrigerar a zona de corte, pois a mesma utiliza-se apenas de ar à temperatura ambiente para refrigerar o processo. Além disso, a ocorrência do fenômeno do empastamento contribui para o aumento da temperatura da zona de corte, uma vez que os cavacos à alta temperatura se aderem à porosidade do rebolo, agregando calor ao mesmo, assim como aumentando o atrito na interface de contato entre rebolo e peça. Considerando a associação do sistema de limpeza ao método MQL, é notável que essa configuração garantiu melhores resultados em comparação ao MQL sem limpeza. A limpeza da superfície do rebolo possibilita a remoção dos cavacos aderidos ao rebolo, o que minimiza a geração de calor, além de garantir uma melhora da capacidade de corte do rebolo. Esses fatores combinados, reduzem o desvio de circularidade.

A mesma tendência foi observada no trabalho de Lopes et al. (2020), no qual o método de lubrificação convencional resultou em os menores erros de desvio de circularidade. Os autores ressaltam que o empastamento é prejudicial à retificação, uma vez que os cavacos alojados na superfície da ferramenta deformam a superfície de corte e aumentam o atrito, o que causa um aumento no desvio de circularidade, prejudicando o acabamento da superfície. Portanto, uma vez que a lubrificação convencional reduz os efeitos do entupimento e da

adesão de cavacos nos poros do rebolo, dada a excelente capacidade de resfriamento desse método, o mesmo tem a tendência de ter melhores resultados para essa variável de saída.

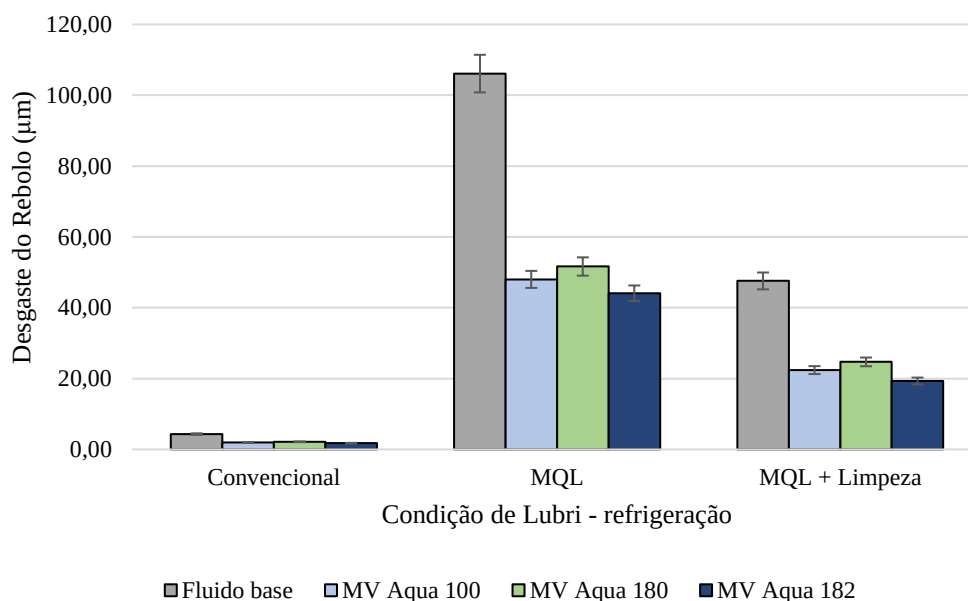
Os mesmos autores ainda verificaram que a aplicação do sistema de limpeza do rebolo melhora os resultados do MQL, em função da redução do empastamento do rebolo. A mesma tendência foi observada nos trabalhos de Bianchi et al. (2018b) e Lopes et al. (2019), nos quais a aplicação do sistema de limpeza do rebolo favoreceu os resultados de desvio de circularidade em comparação ao MQL sem limpeza. Especificamente na pesquisa de Talon et al. (2019), os autores relataram que, quanto menor o teor de água, mais necessário é a limpeza do rebolo, de modo a reduzir a geração de calor.

Portanto, no geral, nota-se que a combinação de MQL+WCI, utilizando um fluido de corte com aditivo de extrema pressão, garantiu resultados satisfatórios em comparação ao fluido base na lubrificação convencional. Em suma, o inibidor volátil de corrosão, independentemente no tipo de lubrificação, não beneficiou o desvio de circularidade. Para essa variável, o menor poder refrigerante dos fluidos com V-active VCI relatado por Talon et al. (2019), se sobressaiu em comparação à sua maior lubrificação, conferindo ao fluido base, melhores resultados. Mais além, a limpeza do rebolo beneficiou consideravelmente essa variável de saída, se mostrando essencial para o aprimoramento da técnica de MQL em busca de uma usinagem mais sustentável.

4.3 Desgaste diametral do rebolo

A Figura 18 expressa o desgaste diametral do rebolo para cada condição de usinagem estudada.

Figura 18: Resultado de desgaste diametral do rebolo em função do método de lubrificação.



Os mecanismos de desgaste do rebolo, estão associados ao desprendimento do grão do ligante, ao desgaste do grão (perda de eficiência de corte) e a degradação do ligante. Todos esses mecanismos que atuam no desgaste do rebolo, são beneficiados com a melhora da lubrificação e prejudicados com o aumento da taxa de remoção de cavaco. Uma vez mantida constante a taxa de remoção de cavaco, os resultados analisados na Figura 17 são resultados da influência específica de cada fluido de corte estudado e do método de lubrificação. A partir da Figura 18 é possível observar que o desgaste seguiu uma tendência semelhante da rugosidade, apresentada na Figura 16. De modo geral, os fluidos com V-active VCI foram melhores para essa variável de saída do que o fluido base. Como já mencionado, de acordo com Talon et al. (2019) a lubrificação tem influência direta no desgaste do rebolo, logo, devido ao fato do V-active VCI apresentar um agente lubrificante em sua composição, capaz de se polimerizar conforme a necessidade, a lubrificação dos fluidos com inibidores voláteis de corrosão se mostrou benéfica para o desgaste diametral do rebolo.

Entretanto, ao comparar os três fluidos com V-active VCI, nota-se que a adição do aditivo de extrema pressão no MV-aqua 182 se mostrou benéfica para o desgaste, uma vez que esse

fluido apresentou o menor valor de desgaste em todas as condições de lubrificação. Tal fato pode ser explicado com base no trabalho de Cambiella et al. (2007), no qual os autores afirmaram que uma formulação adequada de um fluido com aditivo de extrema pressão prolonga a vida da ferramenta e reduz o consumo de energia, uma vez que os fluidos com aditivos de extrema pressão têm o mesmo comportamento que os óleos base, garantindo que um filme lubrificante fique presente no contato entre ferramenta e a peça. De acordo com Peña-Parás et al. (2019), o aditivo de extrema pressão gera um filme de fluido entre os componentes que estão sob pressão (neste caso, o rebolo e a peça) alterando os mecanismos de desgaste entre eles. Por esse motivo, o mecanismo de remoção de cavaco atuou de forma diferente, uma vez o fluido de corte se manteve entre o rebolo e a peça, alterando a relação de contato. Isso justifica o pior valor de rugosidade apresentado na Figura 18 para o MV-aqua 182, enquanto o desgaste foi menor na Figura 16, pois houve um menor contato efetivo entre rebolo e peça.

Por outro lado, ao comparar os três métodos de lubrificação analisados, nota-se que a lubrificação convencional garantiu um desgaste substancialmente inferior que o MQL e o MQL+WCJ. De acordo com Lopes et al. (2019), o fluido de corte é uma maneira eficaz de limpar o rebolo, evitando o entupimento dos poros em função da alta vazão, o que permite que um alto volume de fluido entre em contato com a camada abrasiva por unidade de tempo, removendo as partículas aderidas do material da peça. Em contrapartida, o baixo volume de fluido no MQL dificulta a remoção do material aderido, o que promove temperaturas mais altas devido à sua baixa capacidade de remover o calor da zona de corte. Considerando que o ligante do rebolo é uma resina, o aumento da temperatura contribui para uma mais rápida degradação do rebolo, promovendo um maior desgaste diametral. Deste modo, a aplicação do sistema de limpeza está intimamente relacionada à magnitude do desgaste do rebolo. O material aderido no rebolo aumenta o atrito durante a retificação e obstrui os poros do ligante, o que dificulta a penetração do fluido na região de corte. Tais efeitos aumentam as cargas mecânicas e térmicas durante a retificação, causando alto desgaste do rebolo devido à fratura do ligante e à liberação de conjuntos de grãos abrasivos.

No estudo de Lopes et al. (2019c), os autores atribuíram o maior desgaste do rebolo na técnica de MQL à dois fatores: baixa capacidade de resfriamento dessa técnica em consonância com o maior empastamento. Esses dois fatores juntos reduzem a resistência dos grãos abrasivos e do ligante, enquanto aumentam a temperatura na zona de contato entre rebolo/peça e a energia necessária para o corte, o que corrobora o desgaste da ferramenta. No estudo, o MQL+WCJ produziu um menor desgaste do rebolo em comparação ao MQL sem Limpeza, o que demonstra

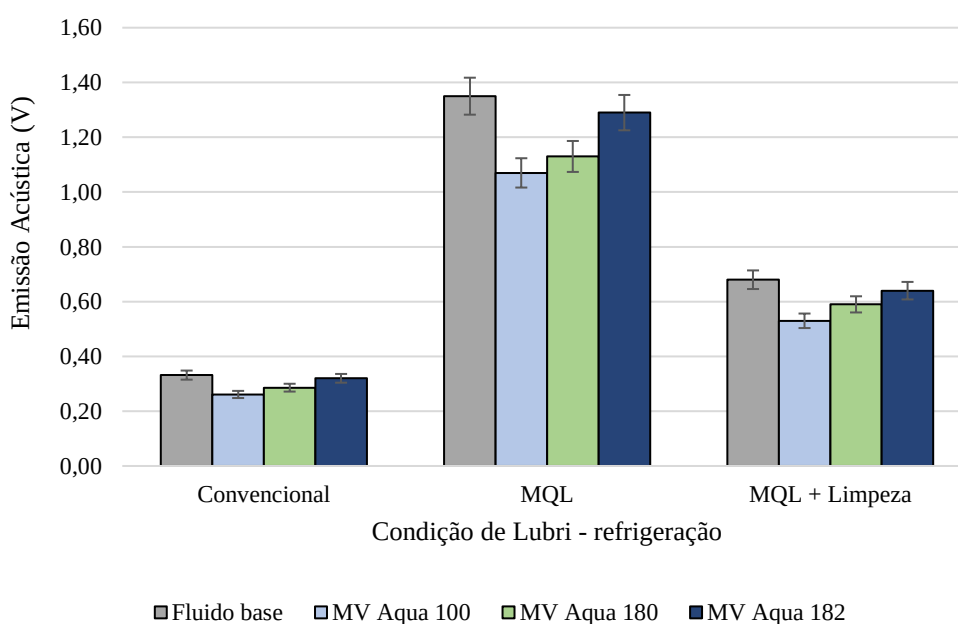
que a remoção dos cavacos dos poros é eficiente para reduzir o desgaste da ferramenta durante o processo.

A mesma tendência de desgaste para os métodos de lubrificação foi verificada nos estudos de Bianchi et al. (2018a) e Javaroni et al. (2020). Deste modo, é notável que a limpeza do rebolo contribui substancialmente para o aprimoramento da vida útil do rebolo, colaborando para uma usinagem mais sustentável. Mais além, é interessante notar que, tanto o inibidor volátil de corrosão como o aditivo de extrema pressão, são fatores que contribuem para a redução do desgaste do rebolo. O primeiro atua aumentando a lubricidade, enquanto o segundo atua reduzindo o contato direto entre rebolo e peça, em função da manutenção de um filme de fluido de corte na interface de corte. Deste modo, a aplicação do fluido com V-active VCI e aditivo de extrema pressão na técnica de MQL+WCI, se mostrou extremamente útil para o aumento da vida útil do rebolo.

4.4 Emissão acústica

Os dados de emissão acústica obtidos em cada método de lubrificação para os quatro fluidos estudados, estão dispostos na Figura 19.

Figura 19: Resultado de emissão acústica em função do método de lubrificação.



A Figura 19 seguiu a mesma tendência de rugosidade apresentada na Figura 16. Segundo Talon et al. (2019), uma vez que a emissão acústica é reduzida com uma melhor lubrificação

do processo, a capacidade de polimerização do agente de lubricidade presente no V-active VCI fez com que os fluidos apresentassem melhor desempenho que o fluido base para todas as condições de lubrificação. Ao comparar os desempenhos dos três fluidos com V-Active VCI, é possível observar que a adição do aditivo de extrema pressão no MV-Aqua 182 resultou em um decaimento de rendimento para a emissão acústica, não justificando a adição do mesmo a fim de aprimorar essa variável de saída. Como já foi discutido anteriormente, o aditivo de extrema pressão alterou o contato efetivo entre rebolo e peça devido ao fato de formar um filme de fluido entre eles. Portanto, a remoção de material gerou uma maior emissão acústica por consequência de um maior cisalhamento do cavaco, já que boa parte da habilidade de corte do rebolo não foi utilizada em função dessa camada de fluido sobre os grãos abrasivos. Essa remoção de cavaco de forma mais abrupta, resulta em um aumento da emissão acústica, o que justifica o resultado obtido na Figura 16.

Por outro lado, comparando-se os métodos de lubrificação, nota-se que o método convencional apresentou os melhores resultados, seguido pelo MQL+WCI. O mesmo resultado foi obtido no trabalho de Javaroni et al. (2020), no qual os autores afirmaram que o uso do sistema de limpeza reduz a ocorrência do fenômeno de empastamento, o que gera menores níveis de emissão acústica. Outrossim, a retificação com MQL sem limpeza acelera o empastamento do rebolo, fazendo com que os cavacos aderidos aos poros do rebolo riscuem a superfície da peça, o que, por consequência, aumenta a emissão acústica do processo.

Mais além, Lopes et al. (2020) relatam que, em função do fato de que a água contribui para a redução da temperatura durante o processo de retificação, ocorre uma minimização de deformações elásticas e plásticas na superfície da peça, o que geralmente é causado pela alta ductilidade da peça sob altas temperaturas. Como resultado, a peça teve menos distorções, o que facilitou o corte e reduziu a intensidade dos riscos na peça. Por outro lado, a aplicação do sistema limpeza no MQL minimiza os riscos da peça causado por cavacos alojados nos poros do rebolo e, portanto, também diminui o valor da emissão acústica.

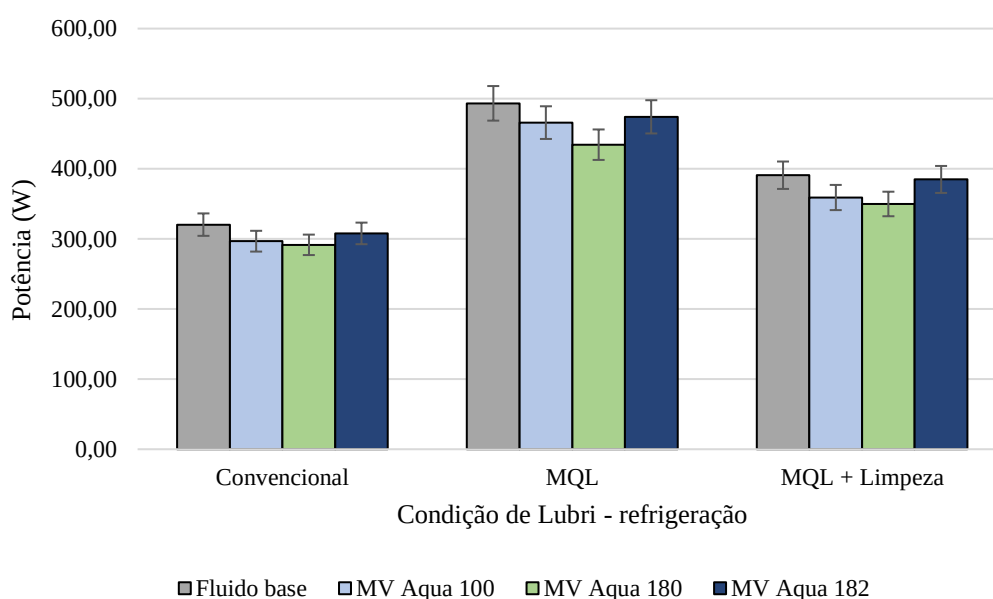
Os resultados obtidos pelo método de MQL+WCI não foram suficientes para que os resultados dessa técnica fossem semelhantes ao método convencional. No entanto, além do sistema de limpeza do rebolo, a adição de inibidores voláteis de corrosão nos fluidos de corte, favoreceram a redução da emissão acústica em função da redução do empastamento e aumento da lubricidade, respectivamente. Portanto, a combinação dessa técnica de lubrificação atrelada à fluidos com V-active VCI, traz bons resultados para a emissão acústica do processo. Tais resultados, mesmo não superando os obtidos pelo método convencional, são acompanhados de uma redução de custos em função da menor utilização de fluido de corte,

além de seguirem a linha de usinagem sustentável, o que faz com que a técnica de MQL+WCI com fluidos que apresentam V-active VCI seja uma excelente opção para essa variável de saída.

4.5 Potência de retificação

Na Figura 20 estão dispostos os valores de potência da retificação para todas as condições estudadas.

Figura 20: Resultado de potência em função do método de lubrificação.



A Figura 20 mostra que a potência se manteve semelhante entre os quatro fluidos em todas as condições, não apresentando uma variação significativa que justifique uma comparação do desempenho entre os fluidos. Entretanto, a potência passou a ter diferenças significativas quando se compara a técnica de mínima quantidade de lubrificante e a lubrificação convencional, como foi mostrado nos trabalhos de Lopes et al. (2019b) e Rodriguez et al. (2019b). Belentani (2013) afirmam que a lubrificação influencia diretamente na potência da retificação, uma vez que reduz as forças de atrito e com isso o rebolo desliza com maior facilidade sobre a peça.

Mais além, Oliveira et al. (2012) afirmam que, conforme aumenta o número de cavacos alojados nos poros do rebolo, aumenta-se o atrito no processo e com isso a potência consumida eleva-se. Portanto, a lubrificação convencional (que garante a melhor condição para evitar o alojamento de cavaco nos poros do rebolo e para lubrificar o processo) garantiu os menores

valores de potência de retificação. Outrossim, Lopes et al. (2019d) explicam que o maior empastamento do rebolo aumenta a área de contato entre o rebolo e peça que atrita e risca a peça sem cortá-la, o que, por consequência, aumenta a energia requerida para o corte. Deste modo, o método convencional reduz a ação desses mecanismos, o que justifica o melhor resultado dessa variável de saída para o método convencional.

De acordo com Bianchi et al. (2018b), quando a propriedade de lubrificação é reduzida, as forças de retificação aumentam, então é necessária mais energia para realizar o corte. Mais além, Javaroni et al. (2020) relatam que o método convencional apresenta o menor consumo de energia de retificação devido às suas capacidades de lubrificação, resfriamento e remoção de cavacos, o que reduz as forças de atrito e cisalhamento, reduzindo a potência consumida. Os mesmos autores ainda atribuíram que o efeito de limpeza na superfície do rebolo mantém a capacidade de corte do rebolo por um período mais prolongado, o que reduz as forças e a temperatura do processo, diminuindo, consequentemente, a potência necessária para realizar o corte.

Deste modo, a limpeza do rebolo se mostra uma alternativa viável para a redução da potência consumida quando utilizada a técnica de MQL. Por mais que o método convencional ainda apresente os melhores resultados, a técnica de MQL+WCJ está atrelada a redução de custos do processo e ao conceito de sustentabilidade, o que a torna a melhor opção para essa variável de saída. Nesse caso, o efeito do empastamento do rebolo se mostrou muito mais relevante para a potência de retificação do que a diferença entre cada um dos fluidos.

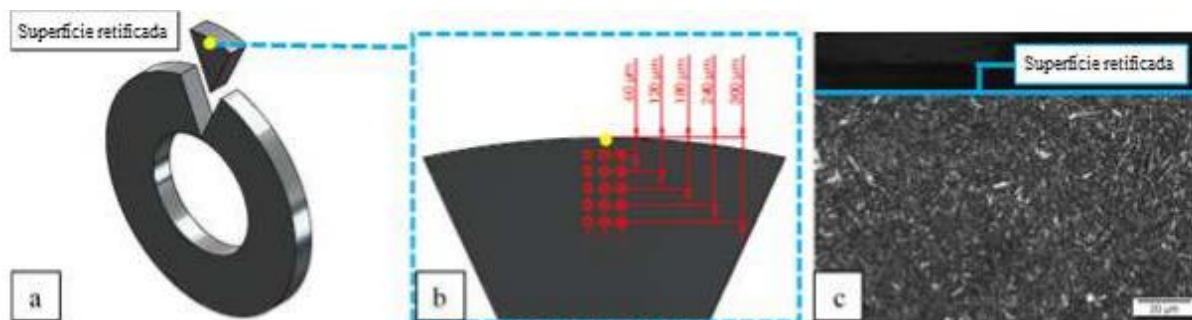
4.6 Microscopia óptica e Microdureza Vickers

A retificação é o último processo na cadeia de fabricação de peças usinadas, uma vez que é realizada após tratamento térmico, quando são necessárias qualidade da superfície e precisão geométrica. Assim, alterações microestruturais na peça durante a retificação podem comprometer o tratamento térmico e as características mecânicas da peça devido à expansão térmica durante o processo de retificação, o que pode contribuir para erros dimensionais e de forma do produto final. Além disso, alterações na microestrutura podem ocasionar tensões residuais de tração, transformação de fases, redução da resistência à fadiga, além de trincas em sua estrutura (LOPES et al., 2019c).

De acordo com Javaroni et al. (2020), a microscopia óptica e microdureza Vickers são usadas para verificar eventuais danos térmicos ou alterações da microestrutura nas peças devido ao processo de retificação. Os mesmos autores ainda fazem um esquemático para demonstrar

como é feita a análise por microscopia óptica e microdureza Vickers das peças retificadas, o qual está apresentado na Figura 21.

Figura 21: Esquema da análise de Microdureza Vickers e Microscopia óptica



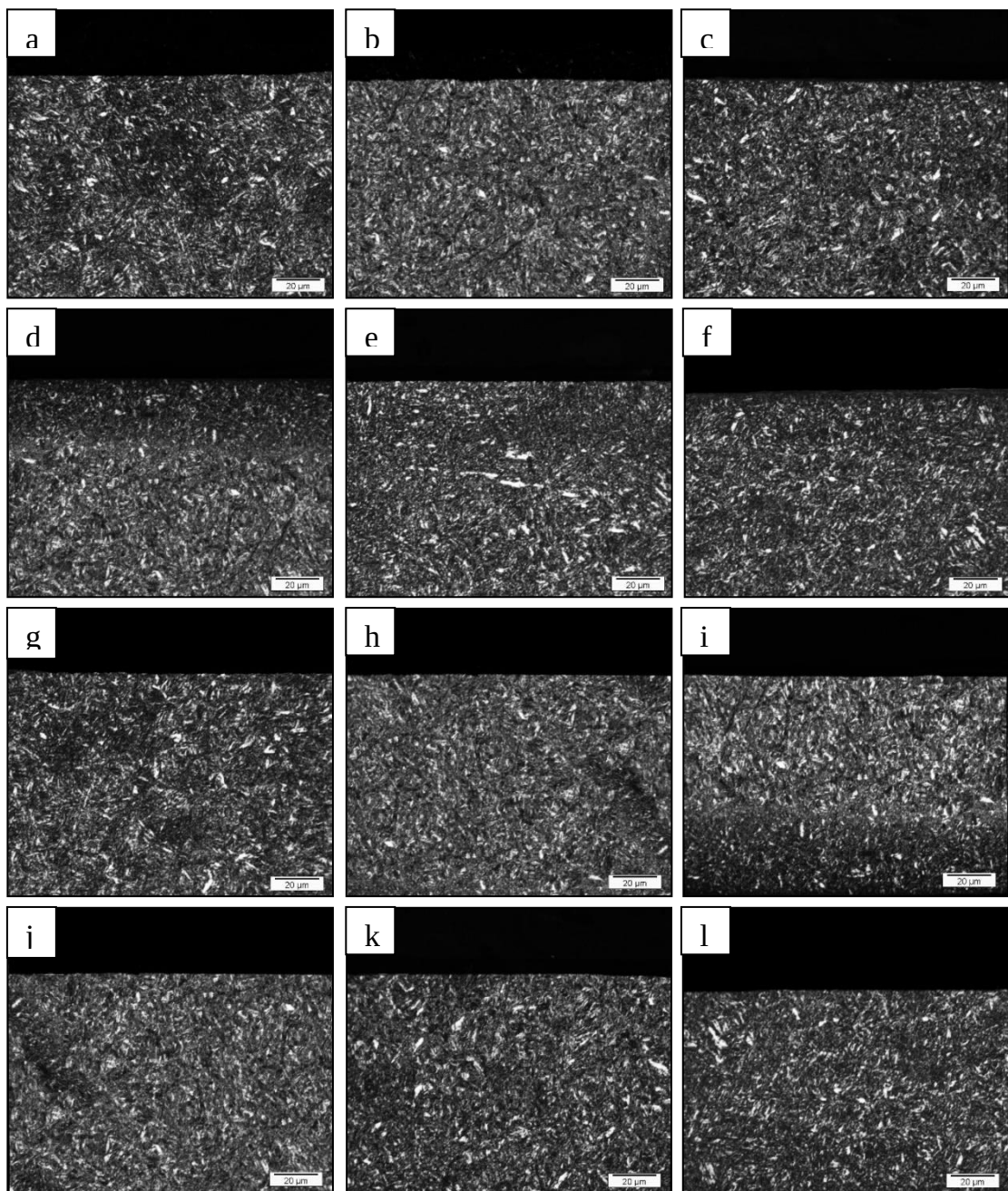
Fonte: Javaroni 2020. Adaptado.

As análises de micrografia óptica estão dispostas na Figura 31. Nessa pesquisa, utilizou-se uma ampliação de 500x. A microestrutura observada em todas as imagens, é referente ao aço ABNT 4340 temperado e revenido, o que apresenta martensita, microestrutura resultante da têmpera do aço (processo no qual ocorre aquecimento do aço acima da temperatura de austenitização, seguido de um resfriamento rápido, tornando sua microestrutura tetragonal de corpo centrado).

A região crítica da peça é sua superfície, região dotada da maior energia térmica em toda a peça. Essa região é caracterizada como a intersecção entre a baquelite e o metal nas microscopias apresentadas. De acordo com Oliveira et al. (2012), geralmente, o dano térmico será identificado nas análises de microscopia como uma camada branca ou escura na superfície retificada, ou na microdureza Vickers, onde será captada uma alteração de dureza na peça. Portanto, analisando-se a Figura 21, nota-se que em nenhuma condição houve a formação de camada branca ou escura, o que indica que não houve geração de calor suficiente na superfície da peça para gerar qualquer dano térmico. Segundo Garcia et al. (2020), a retificação com MQL é mais propícia para gerar danos térmicos a peça do que a técnica convencional ou a técnica de MQL+WCJ. Contudo, por mais que o MQL seja a técnica mais propícia a gerar alterações microestruturais na peça, essa técnica se mostrou eficiente e não gerou nenhuma camada branca ou escura na superfície retificada. O mesmo é válido para a condição convencional e MQL+WCJ. A mesma conclusão foi obtida nos trabalhos de (GARCIA et al., 2020), (LOPES et al., 2019c), (BIANCHI et al., 2018c) e (JAVARONI et al., 2020), nos quais tanto o MQL quanto o MQL com limpeza se mostraram eficientes na remoção de calor do processo, a fim de não gerar danos térmicos às peças. A seguir, a Figura 31 apresenta a micrografia óptica para as

diferentes condições, sendo (a) convencional, (b) MQL e (c) MQL+WCJ para fluido de corte base, (d) convencional, (e) MQL e (f) MQL+WCJ para MV-Aqua 100, (g) convencional, (h) MQL e (i) MQL+WCJ para MV-Aqua 180 e (j) convencional, (k) MQL e (l) MQL+WCJ para MV-Aqua 182.

Figura 22: Microscopia óptica para diferentes condições de lubrificação.



As Figuras 23, 24 e 25 indicam os valores de Microdureza Vickers em função da distância da superfície da peça para cada uma das condições estudadas.

Figura 23: Microdureza das peças retificadas com o método de lubrificação convencional.

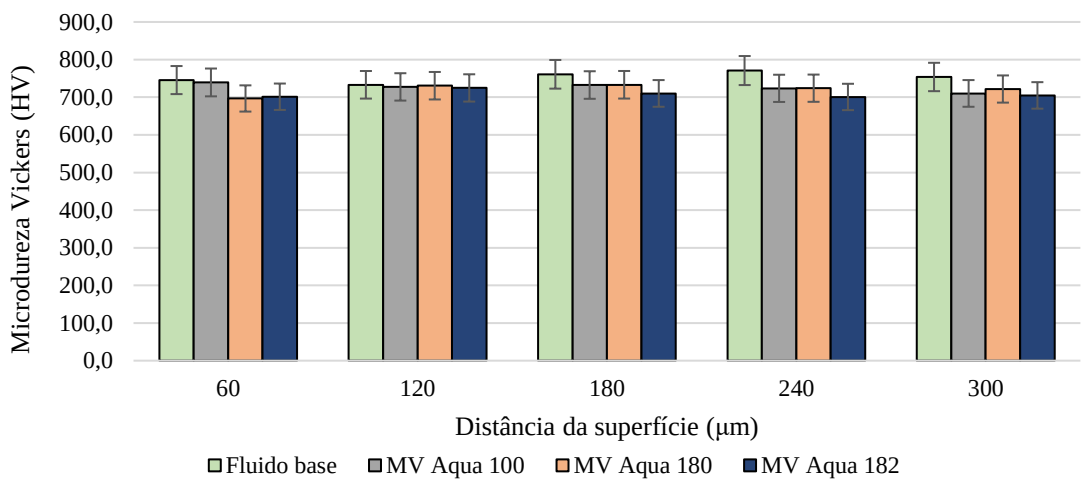


Figura 24: Microdureza das peças retificadas com o método de lubrificação MQL.

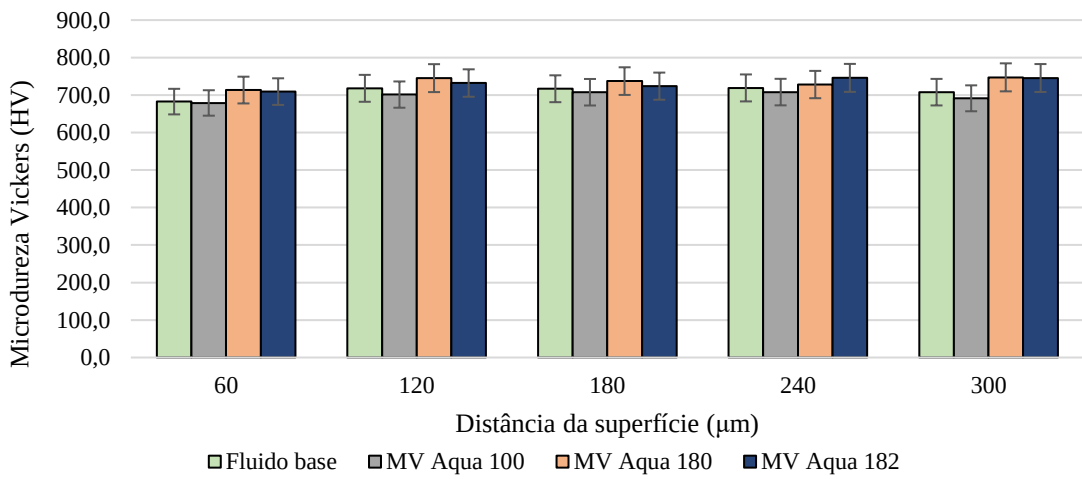
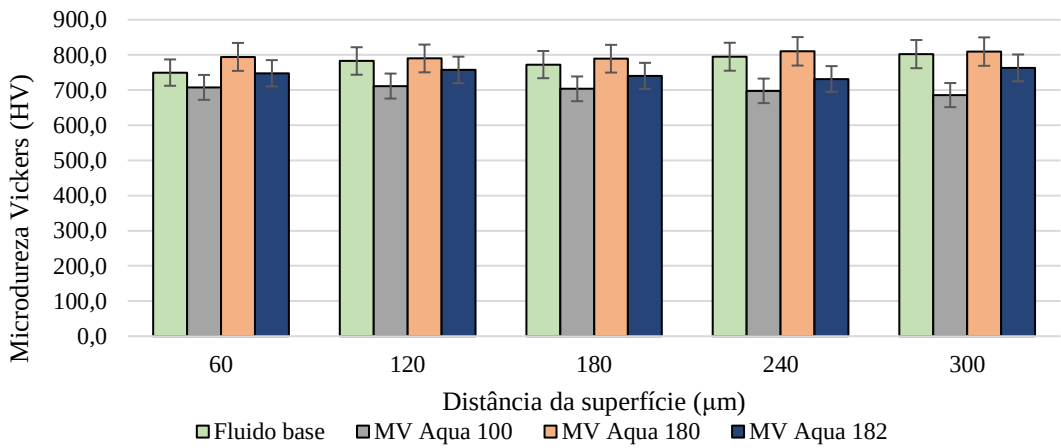


Figura 25: Microdureza das peças retificadas com o método MQL+WCI.



A análise de microdureza serve como um complemento para a microscopia óptica, pois tem a função de identificar danos térmicos de forma quantitativa, ou seja, verifica a existência de uma zona com dureza alterada na superfície retificada, o que indicaria uma alteração microestrutural devido a um dano térmico (SILVA et al., 2013). O estudo da microdureza Vickers foi analisando seguindo as especificações da norma ASTM E 384-16. A medição ocorreu em cinco pontos após a superfície retificada, iniciando-se com a profundidade de 60 µm até 300 µm. Essa metodologia permite verificar se houve algum dano térmico na superfície retificada, ao comparar a dureza da mesma com o centro da peça, o qual, de certo, não apresentará alteração microestrutural devido à distância da superfície usinada. Esse procedimento foi repetido 3 vezes para cada peça.

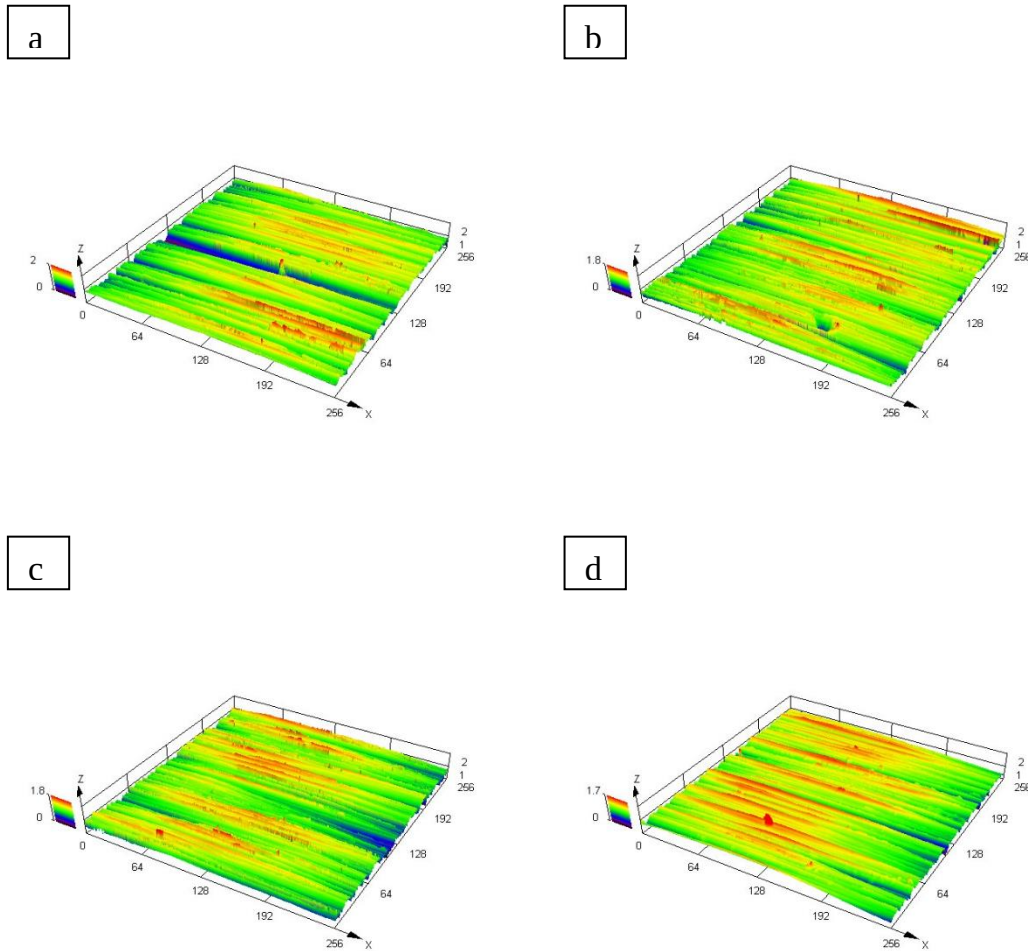
Nota-se, que as Figuras 23, 24 e 25, em nenhuma peça ocorreu uma alteração da dureza superficial. Devido a sensibilidade do equipamento de micro dureza Vickers, há variações significantes de micro dureza entre as peças, contudo, essas variações são desprezíveis, uma vez que um contorno de grão pode aumentar o valor de medição, assim como processos anteriores como têmpera e revenimento podem interferir nos resultados obtidos para microdureza. Deste modo, como a microdureza se mantém igual para uma mesma amostra conforme a medição avança da superfície para o interior da peça, comprova-se a ausência de mudanças microestruturais nos corpos de prova analisados.

Portanto, com a microdureza atrelada à microscopia óptica, é possível aferir que não houve nenhum tipo de dano térmico nas peças, uma vez que a dureza se manteve constante nas mesmas. As análises de microdureza Vickers dos trabalhos de (LOPES et al., 2019d), (JAVARONI et al., 2020), (LOPES et al., 2019c) e (GARCIA et al., 2020) demonstraram o mesmo resultado. Logo, nos trabalhos citados, os autores puderam concluir com a microdureza Vickers que as técnicas de MQL, MQL+WCJ e convencional garantiram que a suposta variação da temperatura de retificação causada pelos diferentes métodos de refrigeração não foi alta o suficiente para causar variação de dureza na superfície da peça. Portanto, isso demonstra e apoia a afirmação de que não houve alteração significativa na microestrutura do material, mantendo suas propriedades mecânicas.

4.7 Microscopia confocal

As Figuras 26, 27 e 28 apresentam imagens obtidas por microscopia confocal das peças através do método convencional, MQL e MQL+WCJ, respectivamente

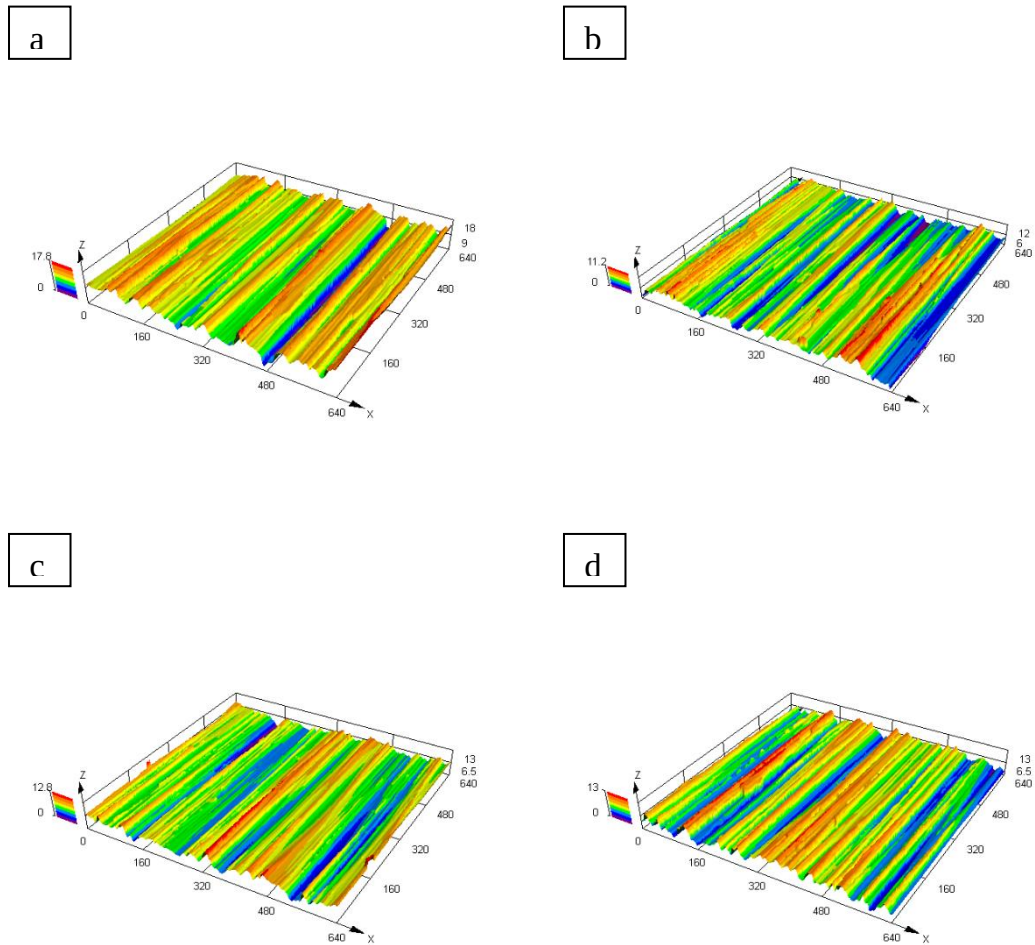
Figura 26: Microscopia confocal das peças retificadas através do método convencional utilizando (a) fluido base, (b) MV-Aqua 100, (c) MV-Aqua 180 e (d) MV-Aqua 182



As imagens mostradas nas Figuras 26, 27 e 28 complementam os resultados de rugosidade média apresentados na Figura 16. Maiores valores de rugosidade na Figura 16 resultam em mais irregularidades nas Figuras 26, 27 e 28.

Especificamente na Figura 26, a qual apresenta as peças retificadas sob lubrificação convencional, é possível verificar uma menor irregularidade da superfície quando comparada com as Figuras 27 e 28. Esse resultado foi o mesmo obtido por outros autores em (GARCIA et al., 2020; JAVARONI et al., 2020). De acordo com Garcia et al. (2020), o método convencional resulta em menores variações topográficas da superfície da peça quando analisada por microscopia confocal, uma vez que o método convencional fornece boa lubrificação, reduzindo a alta temperatura, atrito, expansão térmica, empastamento e seus efeitos, os quais afetam a qualidade da superfície e a precisão geométrica do processo de retificação

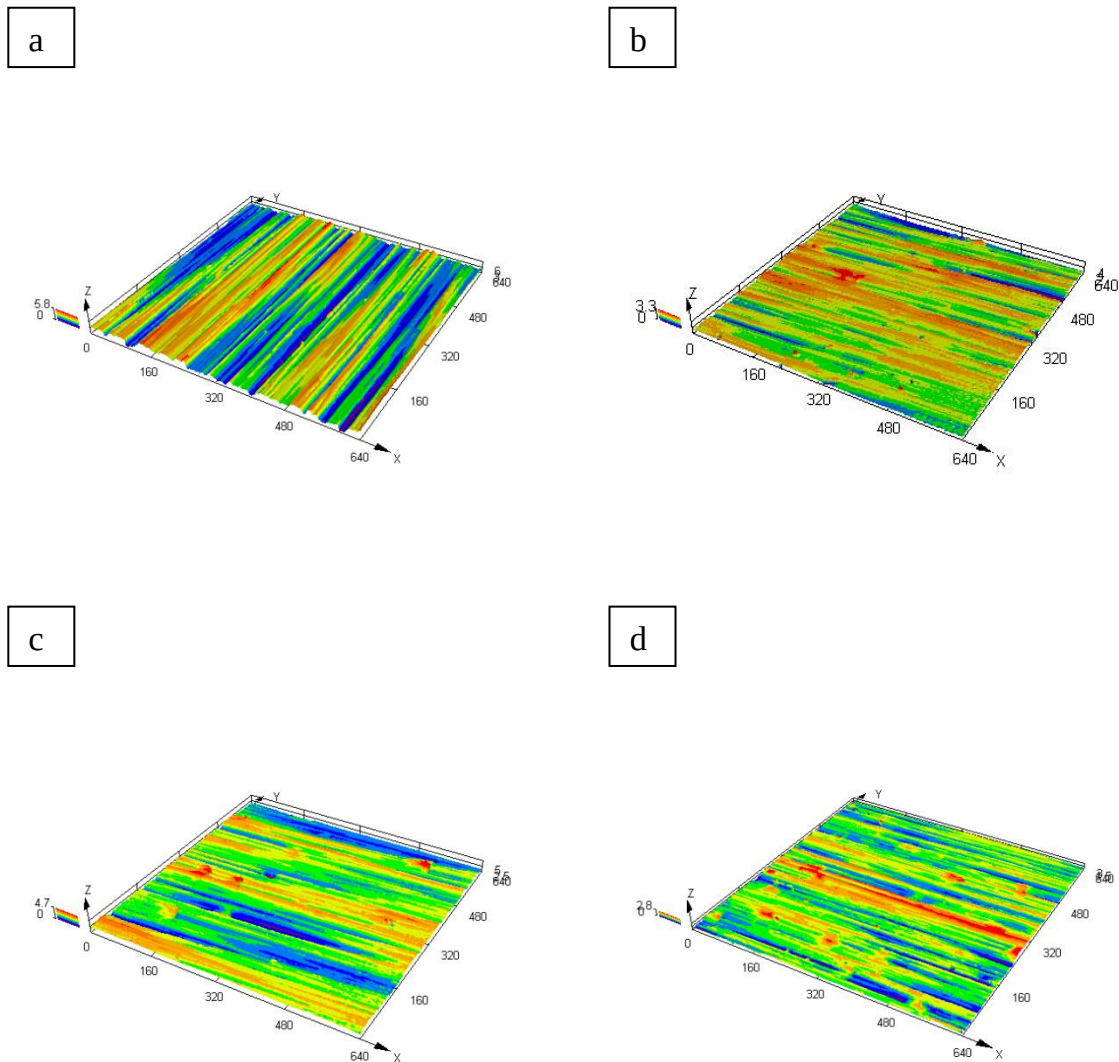
Figura 27: Microscopia confocal das peças retificadas através do método de MQL utilizando (a) fluido base, (b) MV-Aqua 100, (c) MV-Aqua 180 e (d) MV-Aqua 182.



Era esperado que o método convencional fosse responsável por melhores resultados devido à sua capacidade de resfriamento e remoção de cavacos mais significativas (JAVARONI et al., 2020).

A Figura 27, por sua vez, apresenta a microscopia confocal das peças retificadas sob a técnica de MQL. É possível notar que as imagens apresentam maior grau de irregularidade da topografia.

Figura 28: Microscopia confocal das peças retificadas através do método de MQL+WCI utilizando (a) fluido base, (b) MV-Aqua 100, (c) MV-Aqua 180 e (d) MV-Aqua 182.



A Figura 27 (a) indica maior irregularidade em comparação as Figuras 27 (b), 27 (c) e 27 (d). Portanto, o V-active VCI proporcionou um maior efeito de lubrificação quando comparado ao fluido base. Talon et al. (2019) relataram que as partículas V-active tem potencial para fornecer uma melhor lubrificação em condições mais severas de usinagem, o que explica a diferenciação na topografia entre as quatro imagens da Figura 26.

Por fim, a Figura 28 demonstra um nível de irregularidades intermediário entre as Figuras 26 e 27. Como discutido através da Figura 16, é notável que a adição do sistema de limpeza ao MQL traz excelentes avanços para essa técnica em função da redução do empastamento. Essa avaliação da microscopia confocal está de acordo com os resultados encontrados em estudos de outros autores (GARCIA et al., 2020; JAVARONI et al., 2020). De acordo com Javaroni et al.

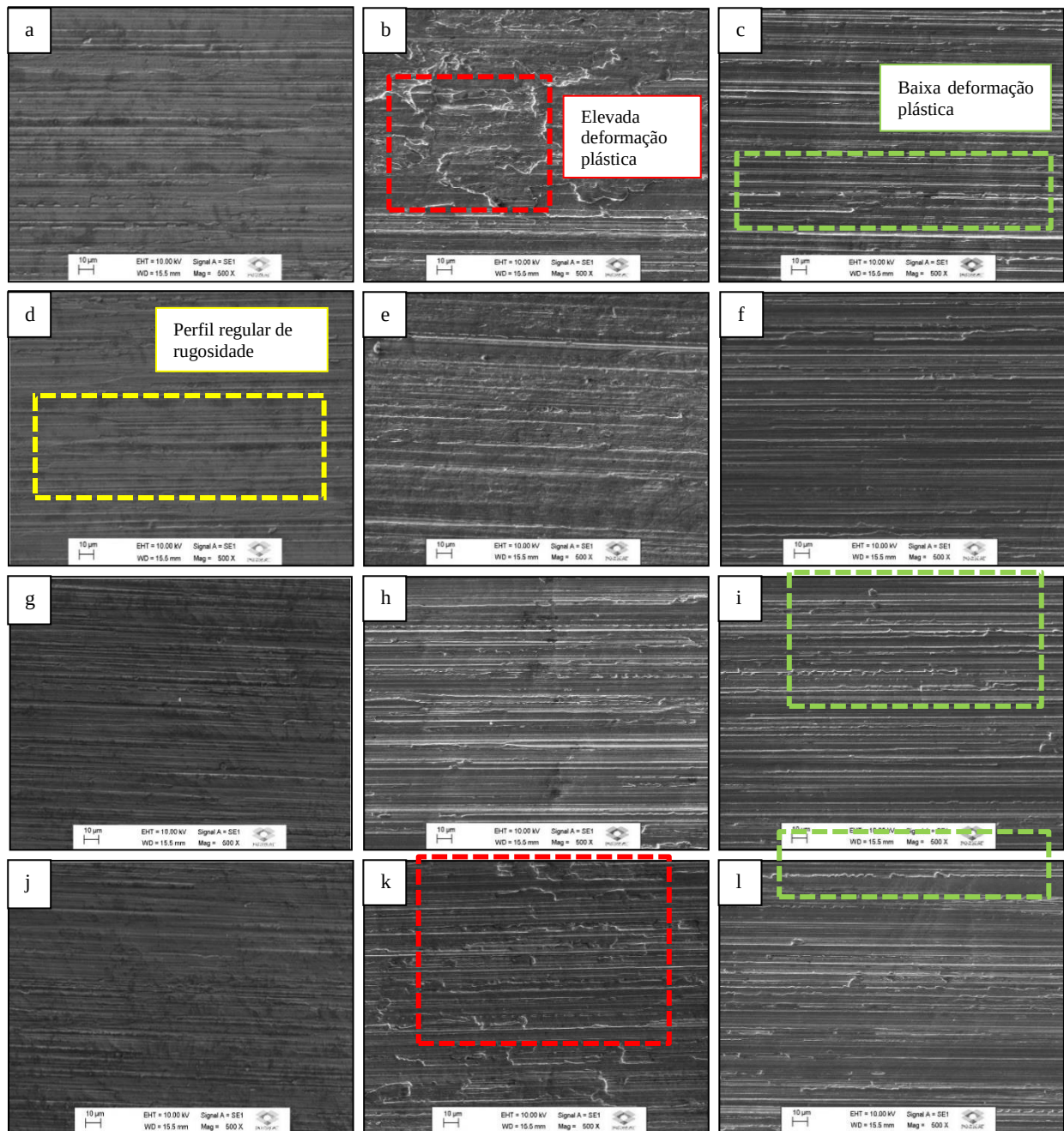
(2020), o uso do sistema de limpeza minimiza significativamente o empastamento do rebolo, reduzindo o atrito na zona de corte, mantendo o rebolo afiado por mais tempo e reduzindo os riscos na superfície da peça. Nesse sentido, o MQL+WCJ garante uma topografia menos irregular que o MQL. Além disso, a topografia obtida com a técnica de MQL+WCJ é próxima da obtida através da técnica convencional, com a vantagem substancial de usar uma quantidade drasticamente menor de fluido de corte.

Mais além, nas Figura 26, 27 e 28, o fluido base resultou na maior variação topográfica, indicando que o uso de fluidos com V-active VCI é benéfico a rugosidade média da peça em todas as técnicas de lubrificação estudadas.

4.8 Microscopia eletrônica de varredura

Assim como a microscopia confocal, a microscopia eletrônica de varredura nos permite avaliar qualitativamente a rugosidade da peça, complementando a análise dos resultados obtidos na Figura 16. Em seu trabalho, Rodriguez et al (2019a) utilizou o MEV para obter imagens da superfície retificada da peça e comparou o método de lubrificação convencional com o método de mínima quantidade de lubrificante. Os autores puderam aferir a adesão de cavacos na superfície da peça após a usinagem. Além disso, a análise no MEV, assim como no confocal, permite uma melhor compreensão dos mecanismos de remoção de cavaco presentes no processo. A Figura 29 mostra as imagens obtidas com o MEV para as diferentes condições, sendo (a) convencional, (b) MQL e (c) MQL+WCJ para fluido de corte base, (d) convencional, (e) MQL e (f) MQL+WCJ para MV-Aqua 100, (g) convencional, (h) MQL e (i) MQL+WCJ para MV-Aqua 180 e (j) convencional, (k) MQL e (l) MQL+WCJ para MV-Aqua 182.

Figura 29: Microscopia eletrônica de varredura para diferentes condições de lubrificação.



Segundo Sadeghi et al. (2010), quando danos na superfície, como deformação plástica, fluxo lateral e adesão estão presentes na superfície da peça, isso indica que a deformação plástica são o modo predominante de remoção de material. As superfícies que apresentaram esses defeitos de forma mais sutil, indicam que o cisalhamento foi o modo de remoção do material. De acordo com Sato et al. (2020), o fluxo lateral ocorre quando a penetração da aresta de corte é insuficiente para iniciar a formação de cavacos. Assim, em vez de cortar, o grão abrasivo causa o fluxo plástico do material.

Analizando a Figura 29, é possível verificar que o fluido base aumentou o mecanismo de remoção de cavacos, onde os grãos deformam plasticamente o material criando as cristas laterais (TAWAKOLI et al., 2009). Quando as marcas de deformações plásticas diminuem, significa que a qualidade da superfície da peça de trabalho foi aprimorada (JAVARONI et al., 2020). A pior condição é mostrada na Figura 29 b. Isso nos indica a maior facilitação do corte por fluidos com V-active VCI, devido à maior lubrificação explicada por Talon et al. (2019), como também demonstra que a limpeza do rebolo auxiliou a técnica de MQL. O MQL é a condição mais severa da usinagem do presente estudo. Portanto, é condizente que as peças usinadas por esse método apresentam o maior grau de deformação plástica. Além disso, no trabalho de Rodriguez et al. (2019b), os autores afirmam que, nas condições mais severas, iniciou-se um processo de fluxo lateral nas ranhuras formadas na peça de trabalho. Contudo, a segunda imagem com maior deformação plástica é a Figura 29 (k), peça usinada com o fluido que apresenta aditivo de extrema pressão em sua composição. Esse resultado condiz com os valores obtidos na Figura 16.

Segundo Peña-Parás et al. (2019), o aditivo de pressão extrema tem a função de formar uma película protetora que deve ser mantida mesmo sob altas pressões, evitando o contato adequado do rebolo e da peça, o que resultou em um acabamento superficial pior quando comparado ao MV-Aqua 100 e ao MV-Aqua 180. Basicamente, o fluido reduziu o contato direto entre o rebolo e a peça de trabalho. Assim, os grãos abrasivos não fizeram a remoção correta do material. O fluido formou um filme que permaneceu na zona de corte. Desse modo, a área de contato aumentou, o que reduziu a pressão, reduzindo o cisalhamento do cavaco. Nesse sentido, quanto menor a pressão, o fluxo lateral é favorecido. À medida que a área de contato aumenta, há uma diminuição na tensão no material. Essa redução na tensão de contato reduz o cisalhamento e aumenta a deformação plástica (JAVARONI et al., 2020).

Ao comparar as Figuras 29 (b), 29 (e), 29 (h) e 29 (k), é notável que a Figura 29 (b) apresenta uma porção maior de deformação plástica. Todas essas imagens correspondem ao método de MQL, o qual favorece a ocorrência de deformação plástica. Isso indica uma maior facilitação do corte pelos fluidos com V-active VCI, devido ao efeito da maior lubricidade explicado por Talon et al. (2019). Logo, os fluidos com V-active VCI tem potencial para fornecer o efeito lubrificante necessário para manter a eficiência de remoção de material mesmo durante a utilização do método de MQL. Contudo, o MV-Aqua 182 apresenta um comportamento excepcional em função do aditivo de extrema pressão, o que condiz com a tendência dos resultados apresentados na Figura 24.

Ao avaliar as Figuras 29 (c), 29 (f), 29 (i) e 29 (l) é notável um grau de deformação plástica inferior ao observado nas Figuras 29 (b), 29 (e), 29 (h) e 29 (k). Isso indica que o sistema auxiliar de limpeza contribuiu de forma valorosa para o aprimoramento da técnica de MQL. De acordo com Lopes et al. (2019c), unido os métodos de MQL e limpeza do rebolo, os resultados tendem a chegar próximos dos obtidos pelo método convencional. Nesse sentido, o sistema de limpeza reduziu significativamente o empastamento do rebolo a ponto de causar uma diferença significativa na qualidade da superfície da peça em comparação com o MQL tradicional. Mais além, Rodriguez et al. (2019c) relatam que nas análises por MEV, a superfície obtida com o método MQL tradicional apresentaram um perfil de rugosidade mais irregular do que os produzidos pelos métodos convencional e MQL+WCI.

5 CONCLUSÕES

Analizando os resultados obtidos após os ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340, temperado e revenido, com rebolo de Oxido de alumínio utilizando 4 tipos de óleo lubrificadorrefrigerantes diferentes ME 1, MVAqua 100, MVAqua 180 e Mvaqua 182 em 3 condições convencional, MQL e MQL + limpeza pode – se concluir que:

- Os fluidos com a nova formulação de inibidores de corrosão (V-active VCI) apresentaram melhores resultados para as variáveis de saída da retificação de forma geral, quando comparado com o fluido base. Esse resultado é válido para os três métodos de lubrificadorrefrigeração estudados.
- De forma específica, para a rugosidade média da peça, o MV-Aqua 180 se destacou pois apresentou valores próximos do MV-Aqua 100, porém o mesmo apresenta custo de mercado reduzido. De forma geral, é possível concluir que, para a rugosidade, a adição do V-active VCI foi consideravelmente favorável, em todos os métodos de lubrificadorrefrigeração. Quanto aos métodos de lubrificadorrefrigeração, o MQL apresentou o pior acabamento superficial, contudo, notou-se que o sistema de limpeza do rebolo atrelado ao MQL tende a melhorar substancialmente a qualidade superficial das peças. As análises qualitativas da superfície das peças através de microscopia confocal e microscopia eletrônica de varredura, geraram a mesma interpretação obtida a partir dos resultados de rugosidade média superficial.
- Já para o desgaste diametral do rebolo, o MV-Aqua 182 obteve o melhor desempenho devido a ação do aditivo de extrema pressão. Novamente, para esta variável de saída, o desempenho dos fluidos com V-active VCI se mostrou relevantemente superior ao fluido base independentemente do método de lubrificadorrefrigeração. Contudo, o MQL gerou um desgaste substancialmente superior ao método convencional. Esse desgaste foi reduzido com a aplicação do sistema de limpeza, porém, ainda consideravelmente superior ao método convencional.
- O desvio de circularidade não foi beneficiado pela adição do V-active VCI em nenhum dos métodos de lubrificadorrefrigeração avaliados, contudo, o aditivo de extrema pressão adicionado no MV-Aqua 182 reduziu os valores do desvio de circularidade. Logo, a perda de refrigeração do fluido com a adição do inibidor de corrosão, foi compensada pela adição do aditivo de extrema pressão, conferindo excelentes resultados para essa variável de saída. Novamente, o sistema auxiliar de limpeza contribuiu para garantir ao MQL melhores tolerâncias dimensionais, aproximando os resultados do MQL aos resultados do método convencional.
- A emissão acústica obteve melhores resultados com o MV-Aqua 100. Entretanto, dependendo da quantidade de máquinas operando simultaneamente em uma indústria, a utilização do MV-Aqua 180 ainda é justificável. Outrossim, o sistema auxiliar de limpeza reduziu o nível de

emissão acústica gerado pelo MQL, uma vez que o mesmo reduz o empastamento do rebolo. A potência não apresentou diferenças significativas entre os fluidos, contudo, a técnica de MQL apresentou o maior consumo de potência entre os três métodos de lubrificação.

- De forma geral, a combinação dos fluidos com V-active VCI ao MQL+WCJ, demonstrou que inserir o uso dessa nova tecnologia de fluidos de corte ao sistema auxiliar de limpeza, gera excelentes resultados ao MQL, deixando-os próximos dos resultados obtidos pela técnica convencional, considerando um consumo de fluido de corte substancialmente menor que a técnica convencional, além de outras vantagens que o V-active traz a cadeia de processos (considerando ainda ser um fluido biodegradável e não nocivo aos seres humanos).

- A partir das análises de microscopia óptica e microdureza Vickers, foi possível verificar que ambos os fluidos refrigeraram o processo de forma eficiente mesmo quando utilizados no MQL ou MQL+WCJ, garantindo que não houvesse qualquer tipo de queima ou danos térmicos às peças.

- Além dos fatores analisados nessa pesquisa, vale ressaltar ainda que essa nova classe de inibidores beneficia outras etapas do processo por ser um protetor de corrosão para máquina e peça, além de ser biodegradável e não é nocivo aos seres humanos.

Portanto, os resultados apresentados nesse trabalho contribuem para a escolha do fluido de corte com inibidor de corrosão atrelado a um determinado método de lubrificação, levando em consideração os resultados das variáveis de saída e o custo comercial dos fluidos. Tais resultados podem servir de referência para o meio industrial, além de possuir potencial de gerar grande impacto no meio acadêmico, através de publicações em periódicos internacionais.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de entender melhor os fenômenos de retificação, reforçar as evidências do aprimoramento da lubrificação MQL, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Verificar o desempenho do método proposto na retificação, utilizando rebolos de CBN em altas velocidades de corte neste mesmo material;
- Investigar o desempenho da lubrificação MQL e MQL + limpeza utilizando a nova classe de óleo refrigerante VCI Inibidor de corrosão volátil em outros tipos de matérias;
- Utilizar diferentes velocidades de mergulho no processo de retificação com a utilização utilizando a nova classe de óleo refrigerante VCI Inibidor de corrosão volátil
- Adicionar água no óleo refrigerante VCI Inibidor de corrosão volátil em proporções definidas e analisar as variáveis de saída utilizando o método de lubrificação MQL e MQL + limpeza

REFERÊNCIAS

ABDALLA, H. S., PATEL, S. “The performance and oxidation stability of sustainable metalworking fluid derived from vegetable extracts”, Proc. IMechE Vol. 220 Part B: **J. Engineering Manufacture**, 2006.

AHRENS, M. DAGEN, M. DENKENA, B. ORTMAIER, T. **An Active Damping Method for Chatter Vibration in Plunge Grinding using Electromagnetic Actuators (2016) Procedia CIRP 46 (2016) 197 – 200**

ALAGUMURTHI, N., PALANIRADJA, K., SOUNDARARAJAN, V. “Heat generation and heat transfer in cylindrical grinding process - a numerical study”, **Int J Adv Manuf Technol** (2007) 34:474–482.

ALBERDI, R., SANCHEZ, J. A., POMBO, I., ORTEGA, N., IZQUIERDO, B., PLAZA, S., BARRENETXEA, D. ” Strategies for optimal use of fluids in grinding”, **International Journal of Machine Tools e Manufacture** 51 (2011) 491–499.

ANDERSON, D., WARKENTIN, A., BAUER, R. “Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding”, **Journal of Materials Processing Technology** 204 (2008) 269–278.

AURICH, J. C., HERZENSTIEL, P., SUDERMANN, H., MAGG, T. “High-performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern”, **CIRP Annals - Manufacturing Technology** 57 (2008) 357–362.

AZARHOUSHANG, B.; DANESHI, A.; LEE, D. H. Evaluation of thermal damages and residual stresses in dry grinding by structured wheels. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 1922–1930, 2017.

AZIZI, A., REZAEI, S. M., RAHIMI, A. “Study on the rotary cup dressing of CBN grinding wheel and the grinding performance”, **Int J Adv Manuf Technol** (2010) 47:1053–1063.

BABEL, R., KOSH, P., WEISS, M. “Acoustic emission spikes at workpiece edges in grinding: Origin and applications”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 64 (2013) 96–101.

BARCZAK, L. M., BATAKO, A. D. L., MORGAN, N. M. “A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 50 (2010) 977–985.

BELENTANI, R. DE M. et al. Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 88–96, 2013.

BIANCHI, E. C. et al. Evaluating the effect of the compressed air wheel cleaning in grinding the ABNT 4340 steel with CBN and MQL with water. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 2855–2864, 2018a.

BIANCHI, E. C. et al. Evaluating the effect of the compressed air wheel cleaning in grinding the AISI 4340 steel with CBN and MQL with water. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 2855–2864, 2018c.

BIANCHI, E. C. et al. Plunge cylindrical grinding with the minimum quantity lubrication coolant technique assisted with wheel cleaning system. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 2907–2916, 2018b.

CAGGIANO, A., TETI, R. “CBN Grinding Performance Improvement in by controllable voltage with force feed back”, **Int J Adv Manuf Technol** (2010) 46:123–130.

CAMBIELLA, A. et al. Formulation of emulsifiable cutting fluids and extreme pressure behaviour. **Journal of Materials Processing Technology**, 2007.

CHO, M., TU, J. “Roundness modeling of machined parts for tolerance analysis”, **Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology** 25 (2001) 35–47.

DEBNATH, S., REDDY, M. M., YI, Q. S. “Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review”, **Journal of Cleaner Production** 83 (2014) 33–47.

DHAR, N. R., ISLAM, S., KAMRUZZAMAN, M. “Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness and Dimensional Deviation in Turning AISI-4340 Steel”, **G.U. Journal of Science** 20(2): 23-32 (2007).

DONGKUN, Z., CHANGHE, L., DONGZHOU, J., YANBIN, Z., XIAOWEI, Z. “Specific grinding energy and surface roughness of nanoparticle jet minimum quantity lubrication in grinding”, **Chinese Journal of Aeronautics** (2015),28(2): 570–581.

EBBRELL, S., WOOLLEY, N. H., TRIDIMAS, Y. D., ALLANSON, D. R., ROWE, W. B. “The effects of cutting fluid application methods on the grinding process”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 40 (2000) 209–223.

EMAMI, M., SADEGHI, M. H., SARHAN, A. A. D., HASANI, F. “Investigating the Minimum Quantity Lubrication in grinding of Al₂O₃ engineering ceramic”, **Journal of Cleaner Production** 66 (2014) 632-643.

GARCIA, M. V. et al. Grinding performance of bearing steel using MQL under different dilutions and wheel cleaning for green manufacture. **Journal of Cleaner Production**, p. 120376, 3 fev. 2020.

GINTING, Y. R., BOSWELL, B., BISWAS, W., ISLAM, M. N., “Investigation into alternative cooling methods for achieving environmentally friendly machining process”, **Procedia CIRP** 29 (2015) 645 – 650.

GRAF, W., “**Handbook Cylindrical Grinding**”, Winterthur Schleiftechnik AG, Switzerland, 2010.

GUO, C., SHI, Z., ATTIA, H., MCINTOSH, D. “Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated CBN Wheels”, **Annals of the CIRP** Vol. 56/1/2007.

HADAD, M. “An experimental investigation of the effects of machining parameters on environmentally friendly grinding process”, **Journal of Cleaner Production** 108 (2015) 217-231.

HADAD, M., SHARBATI, A. “Thermal Aspects of Environmentally Friendly-MQL grinding Process”, **Procedia CIRP** 40 (2016) 509 – 515.

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

HOLESOVSKY, F., HRALA, M. “Integrity of ground cylindrical surfasse”, **Journal of Materials Processing Technology** 153–154 (2004) 714–721.

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

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

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** 185 (2007) 17–23.

JACKSON, M. J., MILLS, B. “Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding wheels”, **Journal of Materials Processing Technology** 108 (2000) 114-124.

JAVARONI, R. L. et al. Grinding hardened steel using MQL associated with cleaning system and cBN wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 13 mar. 2020.

KAMATA, Y., OBIKAWA, T. “High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools”, **Journal of Materials Processing Technology** 192–193 (2007) 281–286.

KIM, H. Y., KIM, S. R., AHN, J. H., KIM, S. H., “Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission”, **Journal of Materials Processing Technology** 111 (2001) 273-278.

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

KLOCKE, F. “**Manufacturing Processes 2, Grinding, Honing, Lapping**” Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.

LAVISSE, B. et al. The effects of the flow rate and speed of lubricoolant jets on heat transfer in the contact zone when grinding a nitrided steel. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 35, n. February, p. 233–243, 2018.

LIU, Q., CHEN, X., GINDY, N.” Robust design and optimisation of aerospace alloy grinding by different abrasive wheels”, *Int J Adv Manuf Technol* (2008) 39:1125–1135.

LOPES, J. C. et al. Application of a wheel cleaning system during grinding of alumina with minimum quantity lubrication. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2019a.

LOPES, J. C. et al. Application of a wheel cleaning system during grinding of alumina with minimum quantity lubrication. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 1–4, p. 333–341, 2019b.

LOPES, J. C. et al. Behavior of hardened steel grinding using MQL under cold air and MQL CBN wheel cleaning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 10, p. 4373–4387, 1 dez. 2019c.

LOPES, J. C. et al. Grinding performance using variants of the MQL technique: MQL with cooled air and MQL simultaneous to the wheel cleaning jet. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 10, p. 4429–4442, 1 dez. 2019d.

LOPES, J. C. et al. Performance of austempered ductile iron (ADI) grinding using diluted oil in MQL combined with wheel cleaning jet and different CBN grains friability. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 9 mar. 2020.

MALKIN, S., GUO, C. “**Grinding Technology: Theory And Applications Of Machining With Abrasives**”, 2^a ed. Industrial Press Inc., New York, 2008.

MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. 1. ed. New York: CRC Press, 2007.

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

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

MARUDA, R. W., KROLCHYK, G. M., FELDSHTEIN, E., PUSAVEC, F., SZYDLOWSKI, M., LEGUTKO, S., SOBCZAK-KUPIEC, A. “A study on droplets sizes, their distribution and heat exchange for minimum quantity cooling lubrication (MQCL)”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 100 (2016) 81–92.

NÉMETH, S. NESLUSAN, M. **Vibration in grinding operations** 7th international multidisciplinary conference Baia Mare, Romania, May 17-18, 2007 ISSN-1224-3264

OLIVEIRA, D. D. J. et al. 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.

OLIVEIRA, 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** 212 (2012) 2559– 2568.

OLIVEIRA, J. F. G., SILVA, E. J., COELHO, R. T., BROZEK, L., BOTTENE, A. C., MARCOS, G. P. “Dry grinding process with workpiece precooling”, **CIRP Annals - Manufacturing Technology** 64 (2015) 329–332.

PARK, K., OLORTEGUI-YUME, J., YOON, M., KWON P. “A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication (MQL)”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 50 (2010) 824–833.

PEÑA-PARÁS, L. et al. Novel carbon nanotube additives for lubricants with superior anti-wear and extreme pressure properties. **Tribology International**, 2019.

PUSAVEC, F., KENDA, J. “The transition to a clean, dry, and energy efficient polishing process: an innovative upgrade of abrasive flow machining for simultaneous generation of micro-geometry and polishing in the tooling industry”, **Journal of Cleaner Production** 76 (2014) 180-189.

PUSAVEC, F., KRAMAR, D., KRAJNIK, P., KOPAC, J. “Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining Technologies”, **Journal of Cleaner Production** 18 (2010) 1211–1221.

RABIEI, F., RAHIMI, A. R., HADAD, M. J., ASHRAFIJOU, M. “Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization”, **Journal of Cleaner Production** 86 (2015) 447-460.

RAHIM, E. A., IBRAHIM, M. R., RAHIM, A. A., AZIZ, S., MOHID, Z. “Experimental Investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) as a Sustainable Cooling Technique”, **Procedia CIRP** 26 (2015) 351 – 354.

RASIM, M., MATTFELD, P., KLOCKE, F. “Analysis of the grain shape influence on the chip formation in grinding”, **Journal of Materials Processing Technology** 226 (2015) 60–68.

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

RODRIGUEZ, R. L. et al. Contribution for minimization the usage of cutting fluids in CFRP grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2019b.

RODRIGUEZ, R. L. et al. Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface. **Journal of Materials Processing Technology**, v.

271, n. October 2018, p. 357–367, 2019a.

RODRIGUEZ, R. L. et al. Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 271, p. 357–367, 2019c.

ROWE, W. B. “**Principles of Modern Grinding Technology**”, 2^a ed., Waltham, William Andrew, 2014.

SADEGHI, M. H. et al. An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique. **International Journal of Material Forming**, v. 3, n. 4, p. 241–251, dez. 2010.

SADEGHI, M. H., HADAD, M. J., TAWAKOLI, T., VESALI, A., VESALI, E. “An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique”, **Int J Mater Form** (2010) 3:241–251.

SADEGHI, M. H., HADDAD, M. J., TAWAKOLI, T., EMAMI, M. “Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–6Al–4V titanium alloy”, **Int J Adv Manuf Technol** (2009) 44:487–500.

SALMON, S. C. “**Modern Grinding Process Technology**”. MacGraw-Hill, 1992.

SALONITIS, K. “On surface grind hardening induced residual stresses”, **Procedia CIRP** 13 (2014) 264 – 269.

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

SATO, B. K. et al. Toward sustainable grinding using minimum quantity lubrication technique with diluted oil and simultaneous wheel cleaning. **Tribology International**, v. 147, 1 jul. 2020.

SHOKRANI, A., DHOKIA, V., NEWMAN, S. T. “Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 57 (2012) 83–101.

SIENIAWSKI, J., NADOLNY, K. “The effect upon grinding fluid demand and workpiece quality when an innovative zonal centrifugal provision method is implemented in the surface grinding of steel CrV12”, **Journal of Cleaner Production** 113 (2016) 960-972.

SILVA, L. R. et al. Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **Journal of Cleaner Production**, jan. 2013.

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 & Manufacture** 47 (2007) 412–418.

SILVA, L. R., CORRÊA, E. C. S., BRANDÃO, J. R., ÁVILA, R. F. “Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process”, **Journal of Cleaner Production** 2013.

SILVA, V. F. et al. Thermal and rheological behavior of ecofriendly metal cutting fluids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2016.

SINHA, M., SETTI, D., GHOSH, S., RAO, V. “An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718”, **Journal of Manufacturing Processes** 21 (2016) 124–133.

SOARES, D. D. e OLIVEIRA, J. F. G. Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais. *Revista Máquina & Metais*, nº 436, p.140-157, 2002.

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

SOUZA, C. N., CATAI, R. E., AGUIAR, P. R., SALGADO, M. H., BIANCHI, E. C. “Analysis of Diametrical Wear of Grinding Wheel and Roundness Errors in the Machining of Steel VC 131”, **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.** 2004, Vol. XXVI, No. 2 / 209.

STEPHENSON, D. J., SUN, X., ZERVOS, C. “A study on ELID ultra precision grinding of optical glass with acoustic emission”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 46 (2006) 1053–1063.

TALON, A. G. et al. “Effect of hardened steel grinding using aluminum oxide wheel under application of cutting fluid with corrosion inhibitors”, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 104, (2019) 1437–1448.

TAWAKOLI, T. et al. 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., AZARHOUSHANG, B. “Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 48 (2008) 1585–1591.

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 & Manufacture** 50 (2010) 698–708.

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

TAWAKOLI, T., HADAD, M., SADEGHI, M. H., DANESHI, A., SADEGHI, B. “Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolantelubricant types”, **Journal of Cleaner Production** 19 (2011) 2088-2099.

TAWAKOLI, T., HADAD, M., SADEGHI, M. H., DANESHI, A., SADEGHI, B., “Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant-lubricant types”, **Journal of Cleaner Production** 19 (2011) 2088-2099.

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** 1 (2012) 399 – 403.

TAWAKOLI, T., WESTKAMPER, E., RABIEY, M., RASIFARD, A. “Influence of the type of coolant lubricant in grinding with CBN tools”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 47 (2007) 734–739.

TONSHOFF, H. K., FRIEMUTH, T., BECKER, J.C. “Process Monitoring in Grinding”, 2002.

VERNHET, L., MINFRAY, C., DELWAULLE, C., MOGNE, T. L., KAPSA, P. “Metal adhesion issues in dry grinding: The role of active fillers”, **Wear** 346-347(2016) 46–55.

WALKER, T. “**The MQL Handbook – A guide to machining with Minimum Quantity Lubrication**”, Copyright © 2013 Unist, Inc. V1.0.3.

WEBSTER, J., TRICARD, M. “**Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding**”, 2004.

WINTER, M., IBBOTSON, S., KARA, S., HERRMANN, C., “Life cycle assessment of cubic boron nitride grinding wheels”, **Journal of Cleaner Production** 107 (2015) 707-721.

WINTER, M., LI. W., KARA, S., HERRMANN, C. “Determining optimal process parameters to increase the eco-efficiency of grinding processes”, **Journal of Cleaner Production** 66 (2014) 644-654.

XUN, L., SHUANG, M., FANJUN, M. “Surface integrity of GH4169 affected by cantilever finish grinding and the application in aero-engine blades”, **Chinese Journal of Aeronautics** (2015) 28(5): 1539–1545.

YANG, Z., YU, Z., XIE, C., HUANG, Y. “Application of Hilbert–Huang Transform to acoustic emission signal for burn feature extraction in surface grinding process”, **Measurement** 47 (2014) 14–21.

ZHANG, Y., LI, C., JIA, D., ZHANG, D., ZHANG, X. “Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil”, **Journal of Cleaner Production** 87 (2015) 930-940.

ZHOU, N., PENG, R., PETTERSSON, R. “Surface integrity of 2304 duplex stainless steel after different grinding operations”, **Journal of Materials Processing Technology** 229 (2016) 294–304.