



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

MATHEUS DE SOUZA RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS INIBIDORES VOLÁTEIS DE CORROSÃO NA
EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**

BAURU

2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



MATHEUS DE SOUZA RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS INIBIDORES VOLÁTEIS DE CORROSÃO NA
EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Claudio Lopes

BAURU

2025

Rodrigues, Matheus de Souza.

Avaliação do impacto dos inibidores voláteis de
corrosão na eficiência do processo de retificação
/ Matheus de Souza Rodrigues, - Bauru, 2025

87 f.


Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia-FEB, Bauru
Orientador: José Claudio Lopes

1. Retificação. 2. MQL. 3. Inibidores voláteis de
corrosão. 4. Poluição. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia-FEB. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE MATHEUS DE SOUZA RODRIGUES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 13 dias do mês de maio do ano de 2025, às 9h, no(a) , realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE Mestrado de MATHEUS DE SOUZA RODRIGUES, intitulada **AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS INIBIDORES VOLÁTEIS DE CORROSÃO NA EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual Paulista UNESP Faculdade de Engenharia Câmpus de Bauru, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Bauru , Prof. Dr. GILSON EDUARDO TARRENTO (Participação Presencial) do(a) Departamento de Sistemas de Produção / Faculdade de Tecnologia de Botucatu. Após a exposição pelo mestrando 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

Documento assinado digitalmente
 JOSÉ CLAUDIO LOPES
Data: 13/05/2025 11:24:56 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

DEDICATÓRIA

A minha família e aos meus pais Wanderlei e Simeia por sempre me apoiarem e me incentivarem nos estudos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela oportunidade que me foi concedida de estar nesse universo e pela força que me foi dada para superar os desafios que enfrentei.

Agradeço imensamente aos meus irmãos, Guilherme e Beatriz, por me incentivarem a seguir nessa jornada.

Agradeço profundamente aos meus pais, Wanderlei e Simeia, por sempre me incentivarem nos estudos e me ensinarem que conhecimento nunca é demais. Serei eternamente grato pelo esforço que fizeram para garantir minha educação.

Expresso profunda gratidão ao meu orientador Professor Doutor José Claudio Lopes, por todas as oportunidades que me foram concedidas e por confiarem em mim desde o início da graduação. Agradeço também pela amizade e ensinamentos que levarei por toda vida.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Bauru, e a todos os professores que contribuíram para minha formação, especialmente aos Professores Titular Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, Titular Eduardo Carlos Bianchi, pelo apoio, amizade e pelos conhecimentos que foram passados ao longo desses anos.

Agradeço aos servidores Dr. Hamilton José de Mello e Hélio Aparecido de Souza por todo suporte e todos os momentos de amizade durante esta pesquisa. Sem o apoio dos senhores, não seria possível desenvolver essa pesquisa.

Agradeço a oportunidade de desenvolvimento profissional concedido pelo Laboratório de Usinagem por Abrasão e por todas as amizades que levarei para a vida toda, em especial aos meus companheiros: Anthony Gaspar Talon, Benício Nacif Ávila e Rafael Liberatti Iavarone. Vocês foram essenciais na minha vida.

Ademais, ficam meus sinceros agradecimentos a todos que de forma direta ou indireta tenham contribuído com esta pesquisa.

“Tudo posso naquele que me fortalece.”
(Filipenses 4:13)

RESUMO

O processo de retificação é uma técnica essencial na indústria de manufatura, valorizada por sua capacidade de fornecer acabamento superficial, bem como tolerâncias dimensionais e geométricas precisas. No entanto, o método convencional de lubrificação-refrigeração, empregado para atingir esses resultados, apresenta desafios ambientais e de saúde. O uso excessivo de fluidos de lubrificação pode levar a efeitos adversos na saúde do operador devido à exposição a produtos químicos nocivos e contribuir para a degradação ambiental por meio de problemas de descarte dos fluidos. Em resposta a essas preocupações, métodos alternativos, como a mínima quantidade de lubrificação (MQL), ganharam atenção como soluções potenciais. As técnicas de MQL reduzem a quantidade de fluido lubrificante necessária, mitigando o impacto ambiental e os riscos à saúde associados aos métodos tradicionais. Apesar da promessa do MQL, esses métodos alternativos geralmente ficam aquém devido à falta de sistemas auxiliares, como o jato de limpeza do rebolo (WCJ) e o jato de limpeza do rebolo resfriado (CWCJ). Esses sistemas são cruciais para manter a eficiência e eficácia do processo de retificação, pois ajudam a remover cavacos do rebolo durante a retificação, atenuam o fenômeno de empastamento e gerenciam a carga térmica na interface de corte. A ausência de tais sistemas em aplicações MQL pode levar a um desempenho abaixo do ideal, incluindo maior desgaste do rebolo, maior consumo de energia e qualidade de superfície comprometida. Para abordar esses desafios, este estudo investiga a retificação de aço AISI 4340 endurecido usando quatro fluidos de lubrificação e resfriamento sob diferentes condições, Convencional, MQL, MQL+WCJ e MQL+CWCJ: fluido base, inibidor de corrosão volátil (VCI), VCI de baixo custo (VCI LC) e VCI de extrema pressão (VCI EP). O estudo visa aumentar a eficácia do MQL analisando os parâmetros de desempenho, incluindo rugosidade, desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, potência de retificação, análise de poluição e custo. Os resultados deste estudo revelam que o uso de inibidores voláteis de corrosão pode melhorar significativamente a qualidade superficial da peça produzida. No entanto, o impacto desses inibidores varia em diferentes parâmetros, embora possam melhorar certos aspectos do processo de retificação, sua eficácia geral depende de condições específicas da aplicação.

Palavras-chave: Retificação. MQL. Inibidores voláteis de corrosão. Poluição.

ABSTRACT

Grinding is an essential technique in the manufacturing industry, highly valued for its ability to deliver surface finishes and precise dimensional and geometric tolerances. However, the conventional method of lubrication-cooling, widely used to achieve these results, presents significant environmental and health challenges. Excessive use of lubrication fluids can adversely affect operator health due to prolonged exposure to harmful chemicals and contribute to environmental degradation through fluid disposal issues. In response to these concerns, alternative methods such as minimum quantity lubrication (MQL) have gained attention as potential solutions. MQL techniques significantly reduce the amount of lubricating fluid required, mitigating the environmental impact and health risks associated with traditional methods. Despite the promise of MQL, these alternative methods often fall short due to the lack of ancillary systems such as wheel cleaning jets (WCJ) and cooled wheel cleaning jets (CWCJ). These systems are crucial to maintaining the efficiency and effectiveness of the grinding process as they help remove chips from the grinding wheel during grinding, mitigate clogging, and manage the thermal load at the cutting interface. The absence of such systems in MQL applications can lead to suboptimal performance, including increased grinding wheel wear, higher energy consumption, and compromised surface quality. To address these challenges, this study investigates the grinding of hardened AISI 4340 steel using four lubrication and cooling fluids under different conditions: Conventional MQL, MQL+WCJ, and MQL+CWCJ: base fluid, volatile corrosion inhibitor (VCI), low-cost VCI (VCI LC) and extreme pressure VCI (VCI EP). The study aims to enhance the effectiveness of MQL by analyzing key performance parameters, including surface roughness, out-of-roundness, diametrical grinding wheel wear, grinding power, pollution analysis, and cost. A profilometer assesses the quality of machined surfaces and the grinding wheel's clumping condition. This study's results reveal that including volatile corrosion inhibitors in lubricating fluids can significantly improve the surface quality of the produced part. However, the impact of these inhibitors varies across different parameters, indicating that while they can improve certain aspects of the grinding process, their overall effectiveness depends on the specific application conditions and requirements.

Keywords: Grinding. MQL. Volatile corrosion inhibitors. Pollution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da cinemática na retificação.....	19
Figura 2: Retificação Cilíndrica externa de mergulho.....	22
Figura 3: Formação de cavaco por um grão abrasivo.....	24
Figura 4: Ciclo de uma retificação cilíndrica.	25
Figura 5: Ciclo de variação da potência.	49
Figura 6: Configuração utilizada durante a retificação com dispositivos auxiliares. (A) Tubo Vortex. (B) Bico MQL. (C) Bicos WCJ e CWCJ. (D) Peça de trabalho.	52
Figura 7: Esquema de medição indireta do desgaste diametral do rebolo.....	55
Figura 8: Rugosidade média (Ra) para cada condição de usinagem.	58
Figura 9: Caracterização Superficial do rebolo pós-usinagem.	59
Figura 10: Análise da média de picos e vales: (a) Região virgem, (b) Região empastada.....	60
Figura 11: Perspectiva 3D da superfície do rebolo.....	61
Figura 12: Análise de ilhas, da superfície utilizada do rebolo.....	61
Figura 13: Topografia da superfície usinada: (a) MQL + CWCJ + VCI EP (b) MQL + fluido base.	62
Figura 14: Microscopia eletrônica de varredura da superfície usinada com MQL + CWCJ: (a) Fluido base, (b) VCI, (c) VCI LC e (d) VCI EP.....	63
Figura 15: Desvios de circularidade para cada condição de usinagem.	64
Figura 16: Desgaste diametral do rebolo para cada condição de usinagem.	66
Figura 17: Potência de retificação para cada condição de usinagem.	67
Figura 18: Custo e Poluição para cada condição de usinagem.....	69

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Coefficiente de atrito	[-]
A	Área média no topo dos grãos abrasivos	[mm ²]
a	Profundidade de corte real	[mm]
a _p	Profundidade de corte	[mm]
b	Largura do rebolo	[mm]
c _d	Profundidade radial de corte	[mm]
d _s	Diâmetro do rebolo	[mm]
d _w	Diâmetro da peça	[mm]
e _c	Energia específica	[J/mm ³]
F _a	Força axial	[N]
F _n	Força normal	[N]
F _{tc}	Força tangencial	[N]
G	Relação G	[-]
h _{eq}	Espessura equivalente de corte	[μm]
K	Força de corte unitária	[N]
l _c	Comprimento de contato	[mm]
n _s	Rotação do rebolo	[rpm]
n _w	Rotação da peça	[rpm]
P	Potência de corte	[W]
p	Pressão unitária	[N/mm ²]
Q _w	Taxa de remoção de material no tempo	[mm ³ /s]
Q' _w	Taxa específica de remoção de material no tempo	[mm ³ /mm.s]
R _a	Rugosidade média aritmética	[μm]
R _z	Rugosidade total	[μm]
v _f	Velocidade de avanço do rebolo	[mm/min]
v _s	Velocidade tangencial do rebolo ou velocidade de corte	[m/s]
v _w	Velocidade da peça ou velocidade de trabalho	[m/s]
Z _s	Volume de rebolo gasto	[mm ³]
Z _w	Volume de material removido	[mm ³]
CBN	Nitreto de boro cúbico	[-]
MLQ	Mínima quantidade de lubrificação	[-]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Motivação	16
1.2. Objetivo geral	17
1.3. Objetivos específicos	17
2. REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1. Processo de retificação	18
2.2. Cinemática da retificação	19
2.3. Mecanismos de desgaste e geração de calor na retificação	19
2.5.1. Força tangencial de corte	23
2.5.2. Mecanismos de formação de cavaco	24
2.5.3. Ciclo da retificação externa de mergulho	25
2.6. Parâmetros no processo de retificação	26
2.6.1. Profundidade de corte (a)	26
2.6.2. Comprimento de contato (lc)	27
2.6.3. Taxa de remoção de material (Qw)	28
2.6.4. Velocidade de corte (Vs)	29
2.6.5. Velocidade da peça (vw)	29
2.6.6. Velocidade de mergulho (Vf)	30
2.6.7. Espessura equivalente de corte (heq)	30
2.7. Rebolo	31
2.7.1. Rebolo de óxido de alumínio	32
2.8. Fluido de corte	35
2.8.4. Problemas na utilização do fluido de corte	39
2.8.5. Custos dos fluidos de corte	40
2.8.6. Manutenção e descarte	41
2.8.7. Mínima quantidade de lubrificante – MQL	42
2.10. Variáveis de saída do processo	45
2.10.1. Rugosidade	45
2.10.2. Desgaste diametral do rebolo	46
2.10.3. Desvio de circularidade	47
2.10.4. Microscopias óticas e Eletrônica de varredura	47
2.10.5. Potência de retificação	48

2.10.6. Análise de custos e poluição na retificação.....	49
2.11. Aço SAE 4340.....	50
3. MATERIAL E MÉTODOS	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1. Rugosidade	57
4.2. Desvios de circularidade	63
4.3. Desgaste diametral do rebolo	65
4.4. Potência de retificação.....	67
4.5. Análise de custo e poluição	68
5. CONCLUSÕES.....	70
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação é uma das técnicas mais utilizadas nas indústrias metalmeccânicas. É conhecido por seu acabamento superficial excelente e tolerâncias geométricas precisas (Cameron; Bauer; Warkentin, 2010; Lopes *et al.*, 2019b). A retificação é amplamente empregada para processar os materiais mais desafiadores, particularmente componentes de alta precisão. Como etapa final na sequência de usinagem, a retificação atua em peças com alto valor agregado (de Martini Fernandes *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2016; Lopes *et al.*, 2019a). A ferramenta de retificação, composta por grãos com geometria indefinida, é responsável pela remoção de material (Malkin; Guo, 2008a). Durante a operação, o contato das várias arestas de corte com a peça deforma e risca sua superfície, dissipando grande parte da energia do processo em forma de calor e, conseqüentemente, aumentando a temperatura na zona de corte (da Silva *et al.*, 2021; de Martini Fernandes *et al.*, 2019; de Moraes *et al.*, 2019).

O calor se acumula no perfil superficial da peça, elevando a temperatura a cerca de 1000°C. Sob essa perspectiva, o dano térmico tem grande influência na qualidade superficial do processo, principalmente quando a temperatura atinge níveis críticos. O dano térmico pode se manifestar na forma de queima superficial, oxidação, tensões residuais e trincas. Todos esses problemas reduzem a resistência ao desgaste, aumentam a suscetibilidade à corrosão e diminuem a resistência à fadiga, propriedades importantes para componentes mecânicos (Yang *et al.*, 2023).

Fluidos de corte são aplicados para lubrificar a interface de corte a fim de mitigar os problemas decorrentes das altas temperaturas, reduzindo a geração de calor e minimizando a dissipação de energia por atrito (Marinescu *et al.*, 2016a). Melhorando as taxas de remoção de cavacos, esses fluidos são cruciais para aumentar a produtividade e a qualidade da fabricação, além de melhorar a resistência à fadiga e à corrosão da peça (Debnath; Reddy; Yi, 2014b; Rabiei *et al.*, 2015a). Além da lubrificação e do resfriamento, os fluidos de corte protegem a máquina contra a corrosão e reduzem o empastamento da superfície do rebolo (Alberdi *et al.*, 2011a; Barmouz *et al.*, 2024).

Sem fluidos de corte, a deficiência na capacidade de resfriamento pode levar a vários problemas, como o empastamento, danos microestruturais à peça e o desgaste acelerado do rebolo devido ao enfraquecimento do ligante (Sadeghi *et al.*, 2009; Sanchez *et al.*, 2010). Em 2016, a indústria global utilizou 13,726 milhões de toneladas de fluidos de corte, com uma taxa de crescimento anual de 1,2% (Said *et al.*, 2019). No entanto, sua aplicação está sujeita a diversas restrições devido ao seu alto nível de poluição ambiental e natureza tóxica, levando a

doenças ocupacionais (Demirbas; Kobya, 2017). Para mitigar esses problemas ambientais e sociais, a filtração e o descarte de fluidos impactam significativamente nos custos do processo de retificação, variando de US\$ 28-56/m³ para grandes empresas a 56-113/m³ para pequenas empresas (Debnath; Reddy; Yi, 2014a). Como sua composição é baseada em petróleo e vários aditivos químicos, os óleos não são biodegradáveis, e o descarte inadequado pode levar à contaminação ambiental por meio da proliferação de microrganismos devido ao acúmulo de pequenos materiais, como cavacos e grãos provenientes do desgaste (Choudhary; Paul, 2020; Hewstone, 1994). Em resposta às crescentes preocupações ambientais e de saúde, a indústria global busca novas tecnologias para reduzir custos e a pegada de carbono associada ao processo de retificação (Javaroni *et al.*, 2019a; Qian *et al.*, 2024).

Entre as alternativas, a quantidade mínima de lubrificante (MQL) está surgindo com grande potencial. Essa técnica aplica uma pequena quantidade de fluido de corte na zona de retificação usando um jato de ar comprimido, com uma taxa de fluxo de 30 mL/h a 100 mL/h (Hadad *et al.*, 2012a; Song *et al.*, 2024). Apesar dos benefícios ambientais e econômicos, a redução do volume aplicado reduz a capacidade de resfriamento do sistema, aumentando a rugosidade, o desvio de circularidade, a potência de retificação e o fenômeno de empastamento, o que impacta o desgaste acelerado da ferramenta devido ao acúmulo de cavacos nos poros (Oliveira *et al.*, 2012a; Sinha *et al.*, 2024).

Para melhorar a capacidade de troca térmica da técnica MQL, pesquisadores buscam adicionar nanopartículas à base de carbono e óxidos metálicos. Elas reduzem o atrito e facilitam a dissipação térmica quando presentes na interface de corte. Os trabalhos fornecem diferentes formatos de nanopartículas com outras propriedades; por exemplo, nanotubos de carbono têm excelentes propriedades de transferência térmica, enquanto alumina e zircônias esféricas são facilidade para reduzir o atrito e o desgaste nos rebolos. Entre essas possibilidades, também é possível trabalhar com a adição de inibidores de corrosão (Liang *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2022).

A aplicação de sistemas auxiliares é outra alternativa interessante para reduzir os problemas da MQL. O jato de limpeza para rebolo (WCJ) direciona um jato de ar comprimido para a superfície da ferramenta, removendo os cavacos presos e, conseqüentemente, atenuando o fenômeno de empastamento (Domingues *et al.*, 2023a; Lopes *et al.*, 2021a). Garcia *et al.* (2020) descobriram que o uso do sistema WCJ reduz em 70% a rugosidade e em 80% o desgaste da ferramenta durante a retificação do aço SAE 52100.

Para melhorar o WCJ, de Moraes *et al.*, (2021a) combinaram essa técnica com ar resfriado (CA), resultando no jato de limpeza de ferramentas resfriado (CWCJ). Durante a retificação do aço AISI 4340, a MQL+CWCJ alcança uma melhor relação G – a razão entre o

volume de material removido da peça e o volume de desgaste da ferramenta – até mesmo em comparação ao método convencional, mostrando o potencial desse método.

Nessa mesma linha, a aplicação de inibidores voláteis de corrosão (VCIs) surge como um método eficaz e relativamente barato para controlar a corrosão em ambientes internos. Usando a água como meio de propagação, o V-active® VCI pode vaporizar e condensar na superfície metálica, criando uma película protetora através de interações químicas entre o metal da peça e o fluido inibidor, protegendo assim a peça e a máquina contra a corrosão (S.B. *et al.*, 2006). Na fórmula comercial, os VCIs são compostos por sais de ácidos orgânicos e inorgânicos com amina (Fodor, 1985; Zhu *et al.*, 2019). As aminas, bases orgânicas, formam uma película uniforme e invisível ao depositar o íon volatilizado na superfície metálica (D.M.; E.; E.M., 2005; Skinner, 1993).

Diferente de tintas e revestimentos metálicos, que são outros sistemas permanentes de prevenção à corrosão, os VCIs podem ser removidos da superfície. Além disso, como uma fase vapor, as moléculas voláteis podem alcançar geometrias de difícil acesso, enquanto a condensação ocorre em qualquer parte da superfície metálica (De Oliveira; Da Silva; Gelamo, 2019; Genovez *et al.*, 2015).

Em seu trabalho, Talon *et al.*, (2019a) mostraram a influência positiva do V-Active VCI 1 adicionado aos fluidos de corte nos parâmetros de saída na retificação do aço AISI 4340. Essa classe de inibidores químicos se propaga usando a umidade da água presente no fluido, prevenindo a corrosão nas fases líquida e vapor. Os resultados apresentaram reduções na rugosidade e no desgaste da ferramenta, embora um aumento nos desvios de circularidade indique que a eficiência da refrigeração continua limitada.

Seguindo o desenvolvimento do conhecimento na área, Talon *et al.*, (2020a) introduziram duas novas composições de fluidos de corte com a mesma tecnologia de inibidor de corrosão – VCI 2 e VCI EP – que apresentaram menores custos e maior estabilidade química devido à redução de compostos químicos. A diferença entre ambos é a adição de aditivos de extrema pressão no VCI EP, facilitando o efeito de lubrificação em zonas de esforços extremos. Na usinagem do AISI 4340, os novos fluidos apresentaram melhorias nos parâmetros de saída, destacando que o VCI EP atinge menor desgaste diametral da ferramenta devido ao efeito do aditivo de extrema pressão (Ruzzi *et al.*, 2021).

Mesmo com os avanços nos trabalhos mencionados anteriormente, ainda são observadas diferenças entre técnicas alternativas e convencionais. Portanto, este estudo combinará os métodos anteriormente utilizados, quantidade mínima de lubrificante (MQL), e os sistemas auxiliares jato de limpeza de ferramentas (WCJ), com ar comprimido em temperatura ambiente

e ar comprimido refrigerado, Jato de Limpeza de Ferramentas Resfriado (CWCJ). O estudo comparará três inibidores voláteis de corrosão: VCI, VCI LC e VCI EP, para compreender a influência desses inibidores de corrosão no processo de retificação bem como as possíveis vantagens sobre os métodos convencionais.

1.1. Motivação

Os aços endurecidos, como o aço AISI 4340, são amplamente utilizados na indústria devido às suas excelentes propriedades mecânicas, como resistência ao desgaste, tenacidade e durabilidade. No entanto, o processo de retificação de materiais endurecidos apresenta desafios consideráveis, principalmente devido ao acúmulo de calor na zona de corte, que pode causar danos térmicos à peça, como queima superficial, trincas e mudanças microestruturais indesejadas. Para mitigar esses efeitos, o uso de fluidos de corte convencionais tem sido amplamente adotado para lubrificação e resfriamento durante o processo de retificação.

O uso intensivo de fluidos de corte, entretanto, está diretamente relacionado a preocupações ambientais graves, como a poluição da água e do solo, além de impactos à saúde humana devido à exposição prolongada a compostos tóxicos. Com a crescente conscientização sobre as mudanças climáticas e o aquecimento global, as indústrias têm sido pressionadas a buscar processos de fabricação mais sustentáveis. Nesse contexto, as práticas de usinagem que utilizam grandes volumes de fluidos de corte são vistas com ressalvas, especialmente por seu impacto negativo na pegada de carbono.

De acordo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, em particular os ODS 12 (Consumo e Produção Sustentáveis) e 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), as empresas estão sendo incentivadas a adotar tecnologias mais limpas e sustentáveis que reduzam os resíduos industriais e contribuam para a mitigação do aquecimento global. Uma dessas soluções é a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), que busca reduzir drasticamente o volume de fluido de corte necessário no processo de usinagem, promovendo uma redução significativa das emissões de carbono e do impacto ambiental.

Apesar das vantagens do MQL, como a redução de custos e menor impacto ambiental, a técnica possui limitações relacionadas à sua capacidade de resfriamento, o que pode levar a um aumento do desgaste do rebolo e piorar a rugosidade da peça. Para resolver essas limitações, tecnologias auxiliares como o uso de jatos de ar comprimido para limpeza do rebolo (Wheel Cleaning Jet - WCJ) e jatos de ar comprimido resfriado (Cooled Wheel Cleaning Jet - CWCJ)

têm se mostrado eficazes em melhorar a eficiência do processo ao atenuar o empastamento do rebolo e auxiliar no controle térmico da zona de corte.

Além disso, a introdução de inibidores de corrosão voláteis (VCIs) nos fluidos de corte traz um novo paradigma para a retificação sustentável. Esses inibidores não apenas reduzem o desgaste das peças e do rebolo, mas também oferecem proteção contra a corrosão, aumentando a durabilidade dos componentes e da ferramenta. Esse avanço é especialmente relevante em um cenário onde a sustentabilidade é prioridade, visto que o uso de VCIs também pode contribuir para a redução da emissão de poluentes e o prolongamento da vida útil dos equipamentos, diminuindo a necessidade de substituições frequentes e, conseqüentemente, reduzindo o impacto ambiental.

Apesar desses avanços, a literatura acadêmica carece de estudos aprofundados sobre a combinação de técnicas sustentáveis, como o MQL, com sistemas auxiliares e inibidores de corrosão na retificação de aços endurecidos. Assim, a presente pesquisa visa preencher essa lacuna, investigando o uso de diferentes inibidores de corrosão voláteis em conjunto com as técnicas de MQL, WCJ e CWCJ na retificação de aço AISI 4340 endurecido. O objetivo é contribuir tanto para o avanço do conhecimento acadêmico quanto para a prática industrial, promovendo processos mais sustentáveis, eficientes e alinhados com os ODS e as necessidades globais de mitigação das mudanças climáticas.

1.2. Objetivo geral

Aprimorar o conhecimento científico sobre a retificação do aço AISI 4340 temperado e revenido, de forma a alinhar a busca por um processo de fabricação verde e seguro, aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODSs) da ONU.

1.3. Objetivos específicos

- Analisar o desempenho entre quatro técnicas de lubrificação no processo de retificação do aço AISI 4340;
- Averiguar a influência de diferentes inibidores voláteis de corrosão e o quanto isso impacta na qualidade superficial e geométrica da peça, relacionando com a potência consumida no processo;
- Relacionar os resultados obtidos para as variáveis de saída do processo com o custo de produção para verificar se os resultados do MQL podem ser justificados pela redução de custos e poluição do processo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentado uma revisão da literatura sobre os principais assuntos abordados neste trabalho.

2.1. Processo de retificação

A retificação consolida-se como um dos processos mais críticos na manufatura de precisão, destacando-se pela capacidade de produzir acabamentos superficiais excepcionais (rugosidade média $R_a < 0,2 \mu\text{m}$) e tolerâncias geométricas na ordem de micrômetros (Marinescu et al., 2016b). Segundo Malkin e Guo, (2008b), esse processo abrasivo é frequentemente a etapa final na cadeia de usinagem, atuando sobre materiais de alta dureza ($> 50 \text{ HRC}$) ou componentes que exigem perfeição dimensional, como eixos de transmissão aeronáuticos e implantes médicos de titânio (Klocke *et al.*, 2015). A relevância industrial da retificação é quantificável: em setores como o automotivo e aeroespacial, responde por 15-20% dos custos de fabricação de componentes críticos (Guba *et al.*, 2020), com projeções de mercado global atingindo US\$ 6,5 bilhões até 2027 (Grand View Research, 2023).

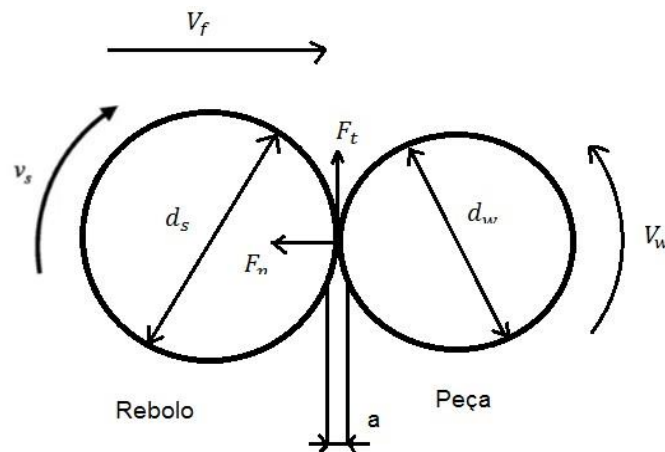
O mecanismo de ação baseia-se na remoção de material por grãos abrasivos (Al_2O_3 , CBN ou diamante) de geometria indefinida, que geram micro cortes na superfície da peça. Esse processo, contudo, não é isento de desafios. Estudos como os de Kruszyński e Wójcik, (2001) demonstram que até 80% da energia consumida é convertida em calor, elevando temperaturas locais acima de 1000°C e induzindo tensões residuais compressivas (até -800 MPa) que, embora benéficas para resistência à fadiga, podem levar a trincas superficiais se não controladas (Klocke; Brinksmeier; Weinert, 2005). Comparado a processos como o torneamento, a retificação oferece vantagens distintas: enquanto o primeiro atinge rugosidades médias de $\approx 0,8 \mu\text{m}$ em aços temperados, a retificação alcança valores inferiores a $0,1 \mu\text{m}$ com repetibilidade superior (König; Berktold; Koch, 1993). Essa precisão justifica sua adoção em aplicações onde a confiabilidade é primordial, como em discos de turbinas de motores a jato.

Apesar das vantagens, a retificação enfrenta obstáculos tecnológicos significativos. O desgaste acelerado do rebolo em materiais como Inconel 718 e cerâmicas avançadas reduz a vida útil das ferramentas em até 40% (Xi *et al.*, 2018). Enquanto a geração de calor exige sistemas de refrigeração complexos para evitar danos térmicos à microestrutura da peça. Esses fatores elevam os custos operacionais e motivam a busca por técnicas inovadoras, como o uso de fluidos de corte ecológicos ou sistemas de ar comprimido resfriado, temas que serão explorados adiante nesta revisão.

2.2. Cinemática da retificação

A Figura 1 exemplifica as variáveis do processo de retificação, onde d_s e d_w são respectivamente o diâmetro do rebolo e o diâmetro da peça, sendo que o rebolo gira com uma velocidade tangencial V_s e a peça gira com uma velocidade tangencial V_w . V_f é a velocidade de avanço do rebolo em relação a peça, a é a profundidade de penetração do rebolo na peça, e a força tangencial F_t e a força normal F_n são as resultantes do processo.

Figura 1: Representação da cinemática na retificação.



Fonte: Adaptado de (Rowe, 2013)

Além disso, a retificação pode ser concordante (como na Figura 1), onde rebolo e peça giram em sentidos opostos, ou discordante, onde rebolo e peça giram no mesmo sentido. Na forma concordante, o grão abrasivo penetra na maior profundidade de corte quando entra em contato com a peça e vai reduzindo gradativamente a penetração, o que gera forças de corte menores, além de melhoria superficial e redução do desgaste do rebolo (Rowe, 2014). Já de maneira discordante, ocorre o oposto e o grão penetra na menor profundidade de corte e vai aumentando gradativamente.

2.3. Mecanismos de desgaste e geração de calor na retificação

A retificação configura-se como um processo de usinagem singular, caracterizado por condições operacionais extremas que envolvem altas velocidades periféricas e geometria complexa dos grãos abrasivos. Conforme elucidado por Malkin e Guo, (2008b), o mecanismo fundamental de remoção de material neste processo decorre de fenômenos tribológicos complexos que merecem análise detalhada. Os autores destacam que cada grão abrasivo atua como uma micro-ferramenta de corte, promovendo a remoção de material através da formação de cavacos extremamente finos, tipicamente na faixa de 0,1 a 10 micrômetros de espessura.

Esta característica explica em parte a capacidade do processo em alcançar tolerâncias dimensionais tão restritas e acabamentos superficiais de excepcional qualidade.

A natureza estocástica da distribuição dos grãos abrasivos na superfície do rebolo introduz uma complexidade adicional ao processo. Como observado por Marinescu et al., (2016b), a disposição aleatória e a geometria variável dos grãos resultam em uma distribuição não uniforme das forças de corte, gerando padrões de tensão mecânica e térmica altamente heterogêneos. Esta condição operacional peculiar leva à geração intensa de calor, fenômeno que representa um dos maiores desafios tecnológicos no processo de retificação. Estudos termodinâmicos detalhados apresentados por Malkin e Guo, (2008b) revelam que entre 60% e 90% da energia total consumida no processo é convertida em calor na zona de contato entre o rebolo e a peça.

A análise termográfica do processo, conforme documentado por Marinescu et al., (2016b), demonstra que os picos de temperatura na interface de corte podem facilmente ultrapassar a marca de 1000°C em condições operacionais típicas. Estes gradientes térmicos extremos provocam fenômenos metalúrgicos significativos na camada superficial da peça, incluindo o amolecimento térmico do material, a formação de tensões residuais e, em casos mais severos, o aparecimento de trincas superficiais. Malkin e Guo, (2008b) ressaltam que a magnitude destes efeitos está diretamente relacionada com os parâmetros operacionais do processo, particularmente com a velocidade periférica do rebolo e a taxa de remoção de material adotada.

O desgaste do rebolo constitui outro aspecto crítico do processo, conforme detalhado por Marinescu et al., (2016b). Os mecanismos de desgaste predominantes incluem a abrasão progressiva dos grãos, a fratura dos ligantes e o fenômeno de empastamento, caracterizado pelo acúmulo de partículas de material usinado nos poros da estrutura do rebolo. Malkin e Guo, (2008b) quantificam que em operações com materiais de alta dureza, como as superligas à base de níquel, a vida útil do rebolo pode ser reduzida em 30% a 50% em comparação com operações em aços convencionais, impactando significativamente a eficiência econômica do processo.

A interação entre estes fenômenos de desgaste e a geração de calor cria um cenário operacional complexo. Como demonstrado por Marinescu et al., (2016b), o aumento do desgaste do rebolo leva a uma elevação progressiva das forças de corte e, conseqüentemente, a um incremento na geração de calor. Esta relação sinérgica entre desgaste e efeitos térmicos explica em grande parte as limitações tecnológicas encontradas na retificação de materiais de alta resistência ao desgaste. Malkin e Guo, (2008b) destacam que o controle eficiente destes fenômenos exige não apenas a seleção adequada dos parâmetros operacionais, mas também o

desenvolvimento de estratégias avançadas de refrigeração e lubrificação, tema que será explorado em detalhes nos capítulos subsequentes desta revisão bibliográfica.

A compreensão aprofundada destes mecanismos fundamentais, conforme apresentado nas obras de referência de Malkin e Guo, (2008b) e Marinescu et al., (2016b), constitui base essencial para o desenvolvimento de estratégias de otimização do processo de retificação. Particularmente quando se considera a aplicação do processo em materiais de difícil usinagem ou em componentes que exigem extrema precisão dimensional e integridade superficial. Os desafios aqui descritos estabelecem o contexto necessário para a discussão sobre as técnicas convencionais e inovadoras de refrigeração e lubrificação, que serão abordadas nas seções seguintes desta revisão bibliográfica.

2.4. Impactos termodinâmicos na qualidade superficial na retificação

A análise dos impactos termomecânicos na qualidade superficial constitui um aspecto fundamental para a compreensão do processo de retificação, conforme destacado por Rowe, (2013) em sua obra *Principles of Modern Grinding Technology*. O autor demonstra que a interação complexa entre calor e forças mecânicas durante o processo gera alterações significativas nas propriedades da camada superficial trabalhada. Esses efeitos manifestam-se principalmente através da formação de tensões residuais, que podem variar desde valores compressivos benéficos até tensões trativas potencialmente prejudiciais, dependendo das condições operacionais estabelecidas.

Rowe, (2013) explica que a natureza transitória do processo de retificação cria gradientes térmicos extremamente acentuados na interface rebolo-peça. Esses gradientes são responsáveis por fenômenos metalúrgicos importantes, particularmente em materiais endurecidos, onde temperaturas excessivas podem levar ao revenimento não intencional da estrutura martensítica. O autor quantifica que em aços temperados submetidos a retificação sob condições inadequadas, a dureza superficial pode sofrer reduções da ordem de 15% em relação ao valor original, comprometendo significativamente o desempenho do componente em serviço.

Um dos aspectos mais críticos abordados por Rowe, (2013) refere-se à formação de trincas superficiais, especialmente em materiais com baixa tenacidade à fratura. O autor estabelece uma relação direta entre a energia específica de retificação e a propensão à formação dessas discontinuidades, destacando que o controle adequado dos parâmetros operacionais pode mitigar substancialmente esse problema. Essa análise é particularmente relevante para

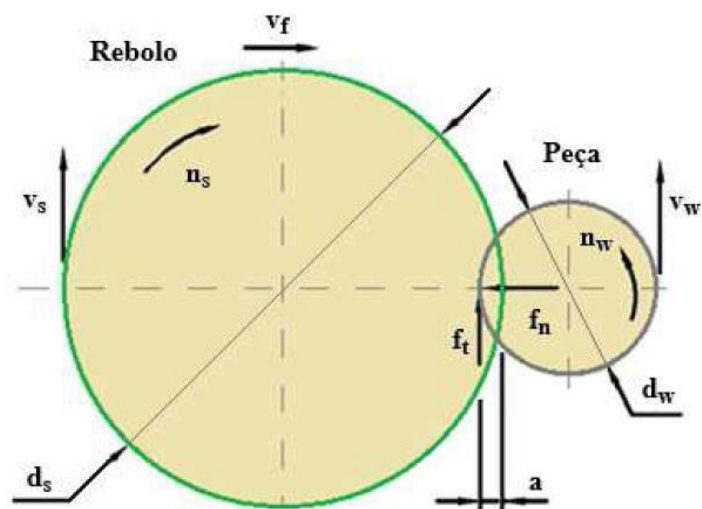
aplicações onde a integridade superficial é crucial, como no caso de componentes aeronáuticos ou implantes médicos.

O trabalho de Rowe, (2013) apresenta ainda modelos preditivos que relacionam as condições de processo com os parâmetros de qualidade superficial, enfatizando a importância do balanço entre produtividade e integridade do material. O autor demonstra que a otimização da velocidade do rebolo em conjunto com estratégias eficientes de refrigeração permite alcançar níveis adequados de rugosidade sem comprometer a microestrutura do material.

2.5. Retificação cilíndrica externa de mergulho

Segundo Diniz e Oliveira (2008) na retificação cilíndrica externa do tipo mergulho, o rebolo avança perpendicularmente à superfície a ser usinada. Nessa configuração, o rebolo normalmente possui maior largura do que a peça, permitindo a usinagem simultânea de várias superfícies. Durante o processo, o avanço do rebolo em direção à peça ocorre com uma velocidade de mergulho (V_f), consideravelmente inferior à velocidade tangencial da peça (V_w), que, por sua vez, é geralmente menor do que a velocidade periférica do rebolo (V_s) conforme apontado por (Marinescu *et al.*, 2013). A figura 2 mostra por meio de um diagrama a disposição do processo.

Figura 2: Retificação Cilíndrica externa de mergulho



Fonte: Adaptado de (Malkin; Guo, 2008b)

2.5.1. Força tangencial de corte

Durante a retificação cilíndrica externa de mergulho, o vetor resultante da força exercida na peça pelo rebolo (F_a), pode ser decomposto em um vetor da força normal e um vetor da força tangencial (Malkin; Bitter, 1989).

Segundo Marinescu et al. (2007) a força tangencial de corte é dada pela equação (1):

$$F_t = b \cdot h_{m\acute{a}x} \cdot k_s + \frac{\mu \cdot b^2 \cdot \pi \cdot k_n}{4} \quad (1)$$

Onde:

b - Largura média no topo dos grãos;

$h_{m\acute{a}x}$ - Espessura máxima do cavaco;

k_s - Pressão específica de corte;

μ - Coeficiente de atrito entre grão e peça;

k_n - Tensão de escoamento do material;

A partir dessa equação, observa-se que a força tangencial de corte é fortemente influenciada pela espessura máxima do cavaco e pela largura média dos grãos abrasivos. Assim, tanto o tamanho do grão quanto a resistência do ligante do rebolo desempenham papel fundamental no aumento das forças de corte durante a retificação (LI et al., 2002).

À medida que o processo avança, os grãos abrasivos do rebolo tendem a perder sua forma original e sua capacidade de corte, resultando em maiores esforços para remoção de material e, conseqüentemente, no aumento da força tangencial de corte. Schwarz et al. (2015), observam que rebolos desgastados podem até proporcionar um acabamento superficial mais suave, mas também aumentam a probabilidade de danos térmicos, vibrações e formação de lóbulos.

A força tangencial de corte é uma importante variável para a avaliação do desempenho dos rebolos, pois permite a detecção de desgastes macro e micro, a análise da eficiência de fixação dos grãos pelo ligante, o monitoramento do aumento de temperatura na zona de corte e a verificação do estado de tensões residuais (Bianchi *et al.*, 2011)

As forças de corte exercem papel fundamental na retificação, uma vez que influenciam diretamente a geometria final da peça, suas dimensões, rugosidade, a vida útil do rebolo (por meio do desgaste volumétrico), bem como o tempo de usinagem. Além disso, os valores médios

dessas forças impactam na potência exigida pela retificadora e nas exigências estruturais da máquina (King; Hahn, 2012).

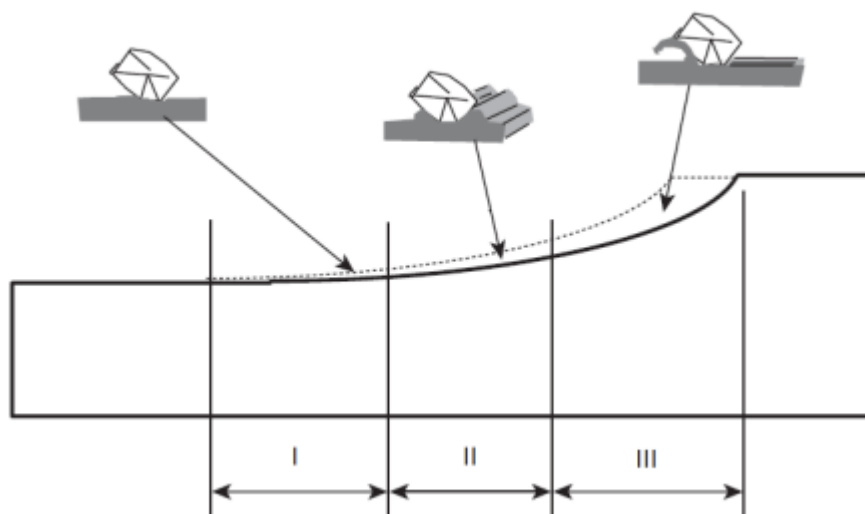
2.5.2. Mecanismos de formação de cavaco

A remoção de material ocorre em três etapas sequenciais, conforme ilustrado na Figura 3. Na primeira fase, o material sofre apenas deformação elástica, onde a energia aplicada é dissipada principalmente por atrito, geração de calor e deformação reversível, sem que ocorra remoção efetiva de material.

À medida que os grãos abrasivos penetram mais profundamente, inicia-se a segunda fase, caracterizada por deformações plásticas, escoamento lateral do material e recuperação parcial das deformações elásticas anteriores. Neste estágio, a força de atrito aumenta proporcionalmente à profundidade de penetração, mantendo a maior parte da energia sendo convertida em calor e deformação permanente.

Finalmente, na terceira fase, a penetração atinge um valor crítico que desencadeia a formação de cavacos. Neste momento, o mecanismo predominante passa a ser o cisalhamento do material, com a maior parte da energia sendo consumida nesse processo de remoção efetiva. Esta sequência evidencia a transição progressiva de um regime dominado por dissipação energética para um mecanismo eficiente de usinagem por cisalhamento.

Figura 3: Formação de cavaco por um grão abrasivo.

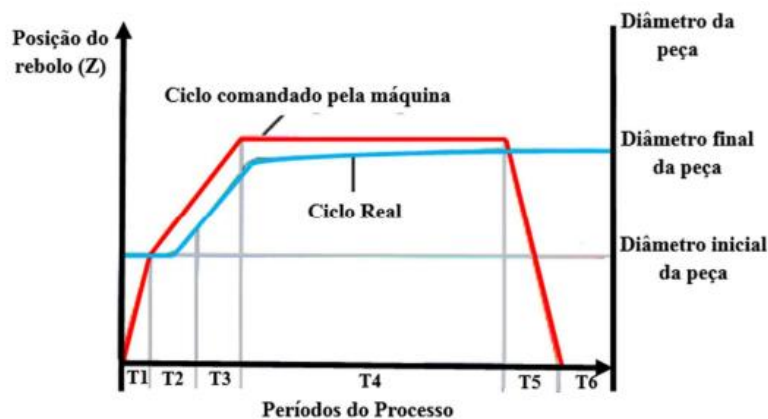


Fonte: Adaptado (Malkin; Bitter, 1989)

2.5.3. Ciclo da retificação externa de mergulho

Na retificação, quando ocorre o avanço do rebolo na peça, existe uma diferença entre o avanço real e o programado. Isso ocorre devido as deformações elásticas sofridas tanto pela ferramenta, quanto pela peça, mas principalmente pela máquina. Essas deformações se devem à falta da rigidez. A Figura 4 demonstra essa diferença entre o avanço teórico e o avanço real. Para combater esse problema, a solução é um período chama *Spark-out*, ou tempo de faiscamento, onde não há avanços, mas a peça e o rebolo continuam em contato, fazendo que as deformações elásticas sejam eliminadas enquanto o rebolo remove o material, gerando as dimensões necessárias da peça (Hassui; Diniz, 2003).

Figura 4: Ciclo de uma retificação cilíndrica.



Fonte: Adaptado de (Hassui; Diniz, 2003)

Hassui e Diniz, (2003) definem cada intervalo da Figura 4 como:

T1: o rebolo apenas avança em direção à peça. Não há contato entre o rebolo e a peça.

T2: início do contato entre o rebolo e a peça, aumento da força de corte gerando deformações elásticas. Com as deformações elásticas, o avanço é menor do que o programado, que gera uma diferença entre a posição real e a teórica.

T3: atinge-se a profundidade de corte definida para um ciclo.

T4: período de *spark-out*, onde não há avanço para que haja uma recuperação da deformação elástica sofrida no T2. As tolerâncias dimensionais e geométricas e superficiais da peça são atingidas após esse processo.

T5: recuo da ferramenta.

T6: remoção da peça e realização da operação de dressamento e preparação de setup para um novo ciclo.

2.6. Parâmetros no processo de retificação

Para se atingir uma boa qualidade superficial, uma solução é diminuir a profundidade de corte, porém, uma baixa profundidade de corte aumenta o tempo do processo gerando mais custos financeiros e aumentando os impactos ambientais, além de aumentar a demanda pela energia. Portanto, deve-se ajustar os parâmetros para uma usinagem correta (Winter *et al.*, 2015).

Além disso, Winter et al. (2015) afirmam que os resultados são classificados em tecnológico (como rugosidade e precisão geométrica), econômico (custo e tempo) e ambiental (poluição e saúde humana).

A Figura 2 mostra os principais parâmetros da operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.

Onde:

a - profundidade de corte;

d_s - diâmetro do rebolo;

d_w - diâmetro da peça;

F_n - força normal de corte;

F_t - força tangencial de corte;

V_f - velocidade de mergulho (avanço) do rebolo;

V_s - velocidade de corte ou periférica do rebolo;

V_w - velocidade periférica da peça;

n_s - rotação do rebolo;

n_w - rotação da peça.

Neste item, serão detalhados os principais parâmetros de influência neste trabalho.

2.6.1. Profundidade de corte (a)

Marinescu et al. (2007) definem a profundidade de corte como a profundidade de material removido para cada revolução. Segundo Malkin (1989), a profundidade de corte é a profundidade que o rebolo entra na peça, estando a certa velocidade durante uma revolução completa da peça. Logo, a profundidade de corte pode ser expressa matematicamente pela seguinte equação.

$$a = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \quad (2)$$

Onde a é a profundidade de corte; (v_f) é a velocidade de avanço; (v_w) é a velocidade da peça e (d_w) é o diâmetro da peça.

Todavia, (Rowe, 2013) ressalta que a Equação (2) é válida apenas quando se desconsidera o desgaste do rebolo, o qual reduz progressivamente seu diâmetro e afeta a profundidade de corte.

Para casos com desgaste acentuado (como em materiais de difícil usinagem), o autor propõe a Equação (3) para cálculo da profundidade de corte (a), incorporando:

$$a = \frac{\pi \cdot d_w}{1 + \left(\frac{1}{G}\right) \cdot \left(\frac{d_w}{d_s}\right)} \cdot (v_f/v_w) \quad (3)$$

Onde: (G) é a relação entre o volume de material removido e o volume de rebolo gasto. A profundidade real de corte (a_e) difere da programada (a) devido a fatores como desgaste do rebolo, deflexões do sistema, dilatação térmica e propriedades da peça, conforme a Equação (4):

$$a_e = a - x - a_s + x_{exp} \quad (4)$$

Onde: (x) é a deflexão do sistema, (a_s) o desgaste do rebolo e (x_{exp}) a expansão térmica da peça e elementos da máquina. (Diniz; de Oliveira, 2008).

A espessura de corte representa um parâmetro crítico no processo, pois estabelece uma relação direta com a espessura equivalente do cavaco. Quando aumentada, eleva proporcionalmente a área de contato efetiva entre os grãos abrasivos e a superfície da peça. Esse maior engajamento resulta em forças de corte mais intensas, que por sua vez geram maior rugosidade e aceleram significativamente o desgaste da ferramenta abrasiva (Marinescu *et al.*, 2007)

2.6.2. Comprimento de contato (l_c)

De acordo com Marinescu *et al.* (2016) o comprimento de contato é definido como sendo a extensão de contato entre o rebolo e a peça. O comprimento de contato pode ser expresso pela equação (5):

$$I_c = \sqrt{a_e \cdot d_s} \quad (5)$$

Essa equação é uma boa aproximação quando a operação de retificação envolve uma grande profundidade de corte, porém, os mesmos autores afirmam que o comprimento de contato real pode ser muito maior que o comprimento de corte calculado pela equação. Isso ocorre uma vez que a equação 4 não considera as deformações ocorridas no processo. Esse parâmetro é chamado de comprimento de corte estático por alguns autores, como Malkin e Guo (2008a)

A geração de calor, bem como a retirada de material ocorrem ao longo do comprimento de contato, e esse parâmetro depende dos contatos mecânicos que ocorrem durante a retificação e de toda a cinemática do processo (Anderson; Warkentin; Bauer, 2008)

2.6.3. Taxa de remoção de material (Q_w)

Segundo Klock (2009) a taxa de remoção representa o volume de material removido por unidade de tempo durante o processo de usinagem. Conforme Marinescu et al. (2007) esse parâmetro fundamental pode ser quantificado pela seguinte expressão matemática:

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

Onde: (b) é a largura da retificação;

A taxa de remoção de material ocorre através da ação individual de cada grão abrasivo que, ao penetrar na superfície da peça, remove o material em sua trajetória durante o movimento relativo. Segundo Rowe, (2014), o aumento da velocidade de avanço constitui o principal método para elevar essa taxa de remoção. Contudo, esta estratégia apresenta importantes limitações técnicas: provoca o crescimento das forças de retificação, compromete a qualidade superficial (aumentando a rugosidade), reduz significativamente a vida útil do rebolo e diminui a eficiência energética do processo (energia específica). Este comportamento característico estabelece uma relação de compromisso fundamental entre produtividade e qualidade na operação de retificação.

De acordo com o mesmo autor, dividindo a taxa de remoção pela largura de retificação, é possível obter a taxa específica de remoção do material (Q'_w), que é a taxa de remoção do material pela largura da retificação. Portanto, é possível definir a equação (7):

$$Q'_w = a_e \times V_w \quad (7)$$

O aumento da temperatura, o aparecimento de danos térmicos, o desgaste dos grãos abrasivos e todos os aspectos do comportamento abrasivo sofrem influência da taxa de remoção do material Rowe, (2014).

2.6.4. Velocidade de corte (V_s)

Marinescu et al. (2007) define a velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo (V_s) como o deslocamento de um ponto na superfície de corte do rebolo em um determinado espaço de tempo. Portanto, esse parâmetro influencia a vida do rebolo e a capacidade de remoção de grãos abrasivos, o que gera consequências ao acabamento superficial do componente, tensão residual, vibrações, entre outros.

A equação (8) representa essa variável:

$$V_s = \frac{\pi \times d_s \times n_s}{60 \times 1000} \quad (8)$$

Onde: (n_s) é a rotação do rebolo e (d_s) o diâmetro do rebolo.

O aumento na velocidade de corte, gera uma melhor qualidade superficial da peça e menor desgaste do rebolo, porém um aumento na temperatura. Além disso, o aumento da velocidade de corte proporciona uma diminuição nas forças envolvidas no processo, e consequentemente aumenta a qualidade da peça e melhora a produtividade (Jackson et al., 2007).

Além disso, ao aumentar a velocidade de corte a espessura do cavaco diminui assim como o número de arestas ativas de corte (Marinescu et al., 2007).

2.6.5. Velocidade da peça (v_w)

Silva Neto (2012) define a velocidade da peça como a velocidade periférica da peça, a qual pode ser determinada em função do diâmetro e rotação da mesma, sendo definida pela equação a seguir:

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60000} \quad (9)$$

Onde: n_w é a RPM da peça e d_w é o diâmetro dela.

Aumentando a velocidade da peça, ocorre o aumento da taxa de remoção de material, causando um aumento do esforço em cada grão, o que eleva a força tangencial de corte.

2.6.6. Velocidade de mergulho (V_f)

Segundo Marinescu et al. (2007) a velocidade de mergulho - também conhecida como velocidade de avanço - corresponde à velocidade com que o rebolo avança sobre a peça durante o processo de retificação. Este parâmetro exerce influência direta tanto na rugosidade resultante quanto nas forças de retificação, apresentando relação proporcional com ambas as variáveis.

No contexto operacional, a fase de desbaste, responsável pela remoção de aproximadamente 95% do material, emprega velocidades de mergulho na faixa de 0,4 a 2,0 mm/min. Já para operações de acabamento, recomenda-se velocidades significativamente menores, entre 0,1 e 0,3 mm/min, visando obter melhores características superficiais.

Neste estudo, adotou-se como metodologia a variação sistemática da velocidade de mergulho para avaliar o desempenho comparativo de diferentes técnicas de lubrificação. A escolha deste parâmetro como variável experimental justifica-se por seu impacto direto na espessura equivalente de corte, conforme será detalhado na sequência deste trabalho. Essa abordagem permite correlacionar as condições de processo com os resultados obtidos, fornecendo insights valiosos para a otimização do sistema como um todo.

2.6.7. Espessura equivalente de corte (h_{eq})

A espessura equivalente de corte (h_{eq}) é definida como a relação entre taxa de remoção específica de material (Q'_w) e a velocidade de corte (V_s) (Malkin; Guo, 2008b). Segundo o mesmo autor, pode ser expressa pela seguinte equação:

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{v_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{60000 \cdot v_s} \quad (10)$$

Onde, V_f é a velocidade de mergulho e d_w é o diâmetro da peça. A espessura equivalente (h_{eq}) é dada em mm.

O parâmetro de espessura equivalente é o que melhor caracteriza o processo de retificação, uma vez que engloba as três importantes características do processo (V_s , V_f , d_w) (SILVA NETO, 2012)

Marinescu et al. (2007) afirmam que esse parâmetro não considera o espaçamento dos grãos do rebolo, ficando evidente que o comportamento da retificação está intimamente relacionado com a combinação da espessura equivalente de corte e a densidade das arestas de corte.

Além disso, segundo Malkin e Guo (2008a), a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada a variáveis envolvidas no processo de retificação, como a rugosidade e desgaste do rebolo, Marinescu *et al.* (2007) afirmam que a espessura equivalente é um fator importante já que determina a espessura dos cavacos na retificação.

2.7. Rebolo

A ferramenta de corte característica dos processos de retificação, conhecida como rebolo, apresenta uma arquitetura complexa que determina seu desempenho operacional. De acordo com Malkin e Guo, (2008b), os rebolos são sistemas multifuncionais compostos por três elementos fundamentais em interação dinâmica: grãos abrasivos, material ligante e porosidade controlada. Esta concepção básica foi ampliada por Webster e Tricard, (2004), que incorporaram um quarto elemento crucial - o projeto integrado do rebolo - considerando aspectos como resistência mecânica, estabilidade química e propriedades térmicas da ferramenta.

A seleção e disposição dos grãos abrasivos constituem um parâmetro crítico no desempenho do rebolo. Como detalhado por Marinescu et al., (2016b), os grãos de materiais como óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de boro cúbico (CBN) ou diamante industrial são estrategicamente distribuídos na estrutura do rebolo, com suas características geométricas e de dureza determinando a capacidade de corte. Rowe, (2013) complementa que o tamanho e a concentração dos grãos devem ser cuidadosamente selecionados conforme a aplicação, variando tipicamente entre 8 e 500 μm de diâmetro médio.

O material ligante, conforme Winter e Herrmann, (2014), desempenha a função essencial de manter os grãos abrasivos em posição durante as severas condições de operação. Os ligantes podem ser resinoides, vitrificados ou metálicos, cada um apresentando vantagens específicas em termos de resistência ao impacto, capacidade de retenção dos grãos e comportamento térmico. Malkin e Guo, (2008b) destacam que a porosidade do rebolo, frequentemente negligenciada em análises simplistas, é na verdade um parâmetro projetual crítico que influencia tanto a capacidade de transporte de fluido de corte quanto a eficiência na evacuação de cavacos.

A preparação adequada do rebolo, conforme enfatizado por (Rowe, 2013), envolve dois processos fundamentais: balanceamento e dressagem. O balanceamento dinâmico é essencial para minimizar vibrações prejudiciais que comprometem a qualidade dimensional e o acabamento superficial. Winter et al., (2015) demonstra que desbalanceamentos residuais superiores a 0,1 g.mm podem levar a aumentos de até 30% nas forças de corte em operações de alta precisão.

A operação de dressagem, conforme detalhado por Marinescu et al., (2016b), possui dupla finalidade: macrogeometria (restauração do perfil do rebolo) e microgeometria (exposição de novos grãos abrasivos). Webster e Tricard, (2004) destacam que os parâmetros de dressagem - incluindo profundidade de passe, velocidade de avanço e geometria do dressador - influenciam diretamente a topografia resultante da superfície do rebolo e, conseqüentemente, seu comportamento operacional. Estudos sistemáticos realizados por Malkin e Guo, (2008b) demonstram que condições inadequadas de dressagem podem reduzir em até 40% a vida útil do rebolo.

A interação sinérgica entre estes elementos - grãos abrasivos, ligante, porosidade e projeto global - determina a eficácia do rebolo como ferramenta de corte. Como sintetizado por (Rowe, 2013), a otimização deste sistema complexo requer consideração simultânea de fatores mecânicos, térmicos e tribológicos, sendo este equilíbrio delicado que permite alcançar os altos padrões de precisão e qualidade superficial característicos dos processos de retificação modernos.

2.7.1. Rebolo de óxido de alumínio

Nesta seção, o rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3) com ligante vitrificado, escolhido para a realização da pesquisa, será o foco da revisão bibliográfica.

2.7.1.1. Ligantes vitrificados

As características dos rebolos exercem influência determinante na produtividade e qualidade do processo de retificação, sendo o tipo, tamanho e concentração dos grãos abrasivos, juntamente com as propriedades do material ligante, os fatores críticos que governam o comportamento da ferramenta (Machado *et al.*, 2015). Embora os estudos sobre abrasivos tenham recebido significativa atenção da comunidade científica, as pesquisas sobre os ligantes ainda representam uma área com consideráveis lacunas de conhecimento.

O papel do material ligante no desempenho do rebolo é particularmente crucial. Ligantes de elevada dureza promovem maior retenção dos grãos abrasivos, resultando em maior tempo de vida da ferramenta. Contudo, como observado por Klocke, (2009a), esta característica pode levar à planificação progressiva das arestas de corte, aumentando a área de contato e, conseqüentemente, elevando os níveis de atrito e temperatura na interface de corte. Por outro lado, ligantes menos resistentes favorecem a liberação controlada dos grãos, expondo continuamente novas arestas de corte, embora à custa de um desgaste mais acelerado da ferramenta.

Na prática industrial, Javaroni et al., (2019b), destacam cinco principais categorias de ligantes: vitrificados, resinoides, metálicos, à base de borracha e poliméricos. O ligante vitrificado, objeto deste estudo, apresenta um conjunto singular de propriedades que o tornam particularmente vantajoso para diversas aplicações. Como destacam Herman e Krzos, (2009), este tipo de ligante combina adequada resistência ao desgaste com relativa facilidade de dressagem, características que o diferenciam positivamente de outras alternativas.

A versatilidade dos ligantes vitrificados é ainda ampliada pela possibilidade de controle preciso de sua estrutura e porosidade durante o processo de fabricação. Kopac e Krajnik, (2006) ressaltam que esta capacidade permite o desenvolvimento de ferramentas com características específicas, otimizadas para diferentes condições operacionais, taxas de remoção de material e requisitos de acabamento superficial.

As vantagens dos ligantes vitrificados estendem-se também à sua estabilidade térmica e propriedades tribológicas. Ribeiro et al., (2020) destacam que sua natureza frágil, combinada com elevada resistência ao desgaste e boa condutividade térmica, torna estes ligantes particularmente adequados tanto para rebolos convencionais quanto para aqueles equipados com grãos de CBN. A estrutura porosa característica destes ligantes não apenas facilita o transporte de fluidos de corte e a remoção de cavacos, mas também simplifica significativamente o processo de condicionamento da ferramenta.

Estas propriedades coletivas explicam a predominância dos ligantes vitrificados na fabricação de rebolos para aplicações industriais, especialmente em operações que demandam precisão dimensional e controle térmico rigoroso. A capacidade de auto-afiação intrínseca a estes ligantes contribui para a manutenção da eficiência do processo ao longo do tempo, reduzindo a frequência de intervenções para dressagem e, conseqüentemente, aumentando a produtividade global do sistema de usinagem.

2.7.1.2. Grãos abrasivos de óxido de alumínio (Al_2O_3)

O óxido de alumínio branco (Al_2O_3) destaca-se como um dos abrasivos mais versáteis para retificação, especialmente em aplicações que exigem alta qualidade superficial e controle térmico. Com pureza superior a 99%, esse material apresenta propriedades distintas em relação às variedades convencionais de óxido de alumínio, sendo especialmente valorizado em operações de acabamento fino e retificação de materiais sensíveis ao (Malkin; Guo, 2008b). Sua estrutura cristalina mais homogênea e livre de impurezas metálicas resulta em maior friabilidade, permitindo que os grãos se fragmentem de maneira controlada durante o processo, expondo continuamente novas arestas de corte e mantendo a eficiência do rebolo por mais tempo (Marinescu *et al.*, 2016b)

Uma das principais vantagens do óxido de alumínio branco reside em sua capacidade de reduzir significativamente o calor gerado durante a retificação. Em seu trabalho Rowe, (2013) demonstra que, em comparação com abrasivos marrons convencionais, essa variedade pode diminuir a temperatura na zona de corte em até 20%, graças à sua maior condutividade térmica e menor atrito intrínseco. Essa característica é particularmente crítica na usinagem de aços temperados e ferramentas, onde o superaquecimento pode levar ao revenimento indesejado ou ao surgimento de trincas superficiais (Lauer-Schmaltz; König, 1980). Além disso, sua natureza quimicamente inerte minimiza reações adversas com o material da peça, evitando fenômenos como empastamento ou adesão de cavacos à superfície do rebolo.

Aplicações típicas do óxido de alumínio branco incluem a retificação de componentes que demandam tolerâncias dimensionais rigorosas e acabamento superficial de alta qualidade, como eixos de transmissão, rolamentos de precisão e ferramentas de corte. Seu desempenho é especialmente notável em aços de baixa e média liga, onde combina eficiência de remoção de material com baixo risco de danos térmicos. No entanto, em materiais com dureza excessivamente elevada (acima de 60 HRC) ou em operações que exigem vida útil extremamente longa do rebolo, abrasivos como CBN ou diamante podem ser mais adequados (Malkin; Guo, 2008b).

Os grãos abrasivos de óxido de alumínio (Al_2O_3) configuram-se como os materiais mais empregados na fabricação de rebolos convencionais, especialmente para a usinagem de aços de média e alta resistência. Sua predominância no mercado deve-se principalmente à relação custo-benefício favorável, sendo significativamente mais econômicos que alternativas como nitreto de boro cúbico (CBN) ou diamante (Miao *et al.*, 2019). No entanto, essa vantagem econômica é acompanhada por limitações técnicas importantes, particularmente no que diz respeito ao comportamento térmico durante o processo de retificação.

Estudos termodinâmicos comparativos revelam que a baixa condutividade térmica intrínseca do Al_2O_3 resulta em uma partição energética desfavorável durante a retificação. (Hadam *et al.*, 2012b) demonstraram que, em condições de lubrificação abundante, aproximadamente 36% da energia total do processo é dissipada na peça quando se utiliza rebolos de óxido de alumínio, contra apenas 14% no caso de rebolos com CBN. Essa diferença torna-se ainda mais pronunciada em sistemas de quantidade mínima de lubrificante (MQL), onde a parcela de energia transferida para a peça atinge 77% com Al_2O_3 , comparados a 46% com CBN.

Essa característica térmica do óxido de alumínio representa um desafio operacional significativo, especialmente em aplicações que envolvem materiais sensíveis ao calor ou em processos que empregam técnicas de refrigeração limitada. A maior retenção de calor na interface de corte pode levar a efeitos indesejáveis como alterações microestruturais na peça, aumento das tensões residuais e aceleração do desgaste do rebolo. Tais limitações devem ser cuidadosamente consideradas no planejamento de operações de retificação, particularmente quando se trabalha com componentes de alta precisão ou materiais termossensíveis.

Apesar dessas restrições, a combinação entre custo acessível e desempenho satisfatório em diversas aplicações industriais mantém o óxido de alumínio como abrasivo preferencial para a maioria das operações convencionais de retificação. Contudo, em cenários onde o controle térmico é crítico ou em materiais de maior dureza, a utilização de superabrasivos como CBN pode se justificar, apesar do investimento inicial mais elevado.

2.8. Fluido de corte

Fluidos de corte são substâncias utilizadas durante as operações de usinagem, com o principal objetivo de aumentar a produtividade dos processos, através da redução do desgaste da ferramenta e da melhoria da qualidade das peças fabricadas. Eles podem ser classificados de inúmeras maneiras, porém essa revisão terá como foco fluidos de base aquosa, comumente aplicados na indústria.

2.8.1. Emulsões

2.8.1.1. Fluidos emulsionáveis

As emulsões consistem em sistemas bifásicos formados por partículas de óleo mineral dispersas em água na proporção de 1:10 a 1:100, mantidas homogêneas através de agentes

emulsificantes. Estas formulações são complementadas com aditivos anticorrosivos e de extrema pressão para melhorar seu desempenho. Sua composição predominantemente aquosa confere vantagens significativas, incluindo maior capacidade de resfriamento, menor custo operacional, eliminação de riscos de inflamabilidade e lubrificação satisfatória - fatores que consolidaram seu uso como principal fluido de corte na indústria moderna.

Contudo, a natureza aquosa desses fluidos os torna particularmente vulneráveis à contaminação microbiana, que podem degradar suas propriedades físico-químicas e levar à necessidade de descarte precoce. Para combater este efeito, a adição de biocidas se faz necessária, porém introduz potenciais riscos à saúde dos operadores. Esta dualidade entre eficiência técnica e segurança ocupacional representa um dos principais desafios no emprego desses fluidos, exigindo protocolos rigorosos de monitoramento e manutenção para garantir seu desempenho ideal ao longo do tempo de uso.

2.8.1.2. Fluidos semissintéticos

Quando a quantidade de óleo mineral no fluido concentrado é menor do que 50%, estes são chamados de semissintéticos.

2.8.2. Soluções

Os fluidos sintéticos, também chamados de soluções, consistem em compostos monofásicos produzidos a partir da dissolução completa de sais orgânicos e inorgânicos, aditivos lubrificantes, biocidas e inibidores de corrosão em água, formando um sistema homogêneo. Diferentemente das emulsões, esses fluidos não contêm óleos minerais em sua composição, o que lhes confere maior resistência à contaminação microbiana e características biodegradáveis. Sua aparência transparente facilita a visualização do processo pelo operador.

Do ponto de vista funcional, os fluidos sintéticos apresentam desempenho distinto: enquanto possuem capacidade de refrigeração superior, oferecem menor poder de lubrificação em comparação com outros tipos de fluidos de corte. Apesar de suas vantagens técnicas, o custo mais elevado ainda limita sua aplicação em larga escala, sendo normalmente empregados em situações específicas como usinagem de materiais de difícil processamento ou produção em grandes lotes, onde a eficiência no resfriamento é prioritária. Na presente investigação, optou-se por utilizar exclusivamente fluidos sintéticos em todos os testes realizados.

2.8.3. Aditivos

Os fluidos de corte incorporam diversos aditivos específicos em sua formulação, cada um desempenhando funções críticas no processo de usinagem. Entre os principais destacam-se os antiespumantes, que previnem a formação de espuma para manter a visibilidade do processo e eficiência de refrigeração; os detergentes, responsáveis por evitar acúmulo de resíduos na zona de corte; e os emulsificantes e surfactantes, que garantem a estabilidade das emulsões óleo-água. Adicionalmente, os biocidas controlam o crescimento microbiano, enquanto os anticorrosivos protegem tanto o equipamento quanto a peça contra danos por oxidação. Particularmente importantes são os aditivos de extrema pressão (EP), que mantêm as propriedades do fluido mesmo sob condições severas de temperatura e pressão durante operações de usinagem agressiva.

Neste estudo, os fluidos analisados contêm formulações específicas com três tipos de aditivos: inibidores voláteis de corrosão (VCI) e (VCI LC) de baixo custo, que formam uma película protetora contra oxidação, e aditivos EP, cujo mecanismo de ação será detalhado posteriormente. Esta combinação visa otimizar tanto a proteção contra corrosão quanto o desempenho sob condições extremas de usinagem.

2.8.3.1. Aditivo anticorrosivo do tipo inibidor volátil de corrosão - VCI

Os inibidores voláteis de corrosão (VCIs) são compostos químicos formados principalmente por sais orgânicos e inorgânicos que, quando aplicados, vaporizam e se adsorvem nas superfícies metálicas, formando uma camada protetora monomolecular que inibe a corrosão em ambientes fechados. Suas propriedades hidrofóbicas ajudam a manter o pH alcalino na interface metal-inibidor, reduzindo significativamente o risco de corrosão. Estes compostos, também conhecidos como inibidores de fase de vapor (VPIs), diferem dos métodos permanentes de proteção como tintas e revestimentos metálicos por serem temporários e removíveis. Esta característica única os torna particularmente adequados para proteção durante o armazenamento e transporte de peças metálicas, mantendo sua eficácia enquanto o ambiente permanecer fechado. Entre as principais vantagens dos VCIs está a ausência de resíduos visíveis ou oleosos nas peças protegidas, eliminando a necessidade de limpeza com solventes tóxicos antes de processos subsequentes como pintura ou revestimento. Além disso, sua natureza volátil permite alcançar áreas de difícil acesso que seriam problemáticas para outras técnicas de proteção como graxas ou óleos. No entanto, os VCIs tradicionais apresentam desvantagens importantes: sua eficácia depende criticamente de ambientes hermeticamente fechados, têm

durabilidade limitada em condições úmidas ou na presença direta de água, e alguns tipos podem apresentar problemas ambientais e de saúde, conforme demonstrado por (Bastidas; Cano; Mora, 2005; Vorobyova; Skiba; Chygyrynets', 2019) . Estas limitações tornam os VCIs convencionais inadequados para uso como aditivos em fluidos de corte, que contêm grande quantidade de água e são aplicados em ambientes abertos.

Neste contexto, a pesquisa de doutorado de Genovez, (2016) desenvolveu um novo conceito de inibidor volátil de corrosão chamado V-active VCI, composto por uma combinação especial de sais orgânicos, particularmente aminas graxas e ácidos carboxílicos, que utiliza a água em suas fases líquida e de vapor como meio de transporte e ativação. Diferentemente dos VCIs tradicionais, o V-active VCI aproveita a presença da água para promover a dissociação dos sais inibidores, gerando componentes eletricamente ativos que se adsorvem na superfície metálica. Este processo forma uma camada protetora que interfere na corrente de polarização e reduz o potencial de corrosão, mantendo sua eficácia mesmo em condições adversas. Testes extensivos em laboratório e em campo, utilizando água nas fases líquida e de vapor, demonstraram que o V-active VCI oferece excelente proteção contra corrosão mesmo em condições críticas, incluindo ambientes com alta umidade e salinidade. Um dos testes mais significativos envolveu um tanque de 200 litros contendo diesel com 0,5% de V-active VCI, que permaneceu livre de corrosão por quatro anos, enquanto um tanque controle sem o inibidor apresentou oxidação intensa e formação de massa orgânica devido à presença de água e bactérias. A pesquisa também avaliou a influência da camada protetora em processos posteriores como pintura e revestimentos, constatando que o V-active VCI não interfere na aderência de camadas de tinta, atendendo inclusive aos rigorosos padrões industriais da Petrobras. Outro aspecto importante é que o V-active VCI, por não conter sais inorgânicos, é biodegradável e não tóxico, representando uma alternativa mais sustentável.

As características excepcionais do V-active VCI revelam seu grande potencial para aplicação em fluidos de corte sintéticos, cuja baixa proteção contra corrosão tem sido um dos principais obstáculos para sua adoção mais ampla. Baseando-se nesta tecnologia, a empresa brasileira VCI Brasil, sediada em Bauru/SP, desenvolveu uma linha de fluidos de corte sintéticos chamada MV Aqua, que incorpora os inibidores V-active VCI. Segundo a empresa, estes fluidos proporcionam proteção anticorrosiva eficaz para peças e máquinas, eliminando a necessidade de etapas posteriores de aplicação de óleo protetivo e limpeza. Além disso, oferecem refrigeração adequada, lubricidade e adstringência, sendo biodegradáveis e não tóxicos, características que os tornam candidatos promissores para substituir os óleos integrais (VCI BRASIL, 2024). No entanto, como discutido anteriormente, a composição do fluido de

corte influencia diretamente o processo de usinagem, afetando tanto a qualidade da peça usinada quanto o desgaste da ferramenta, o que torna essencial sua avaliação experimental. Reconhecendo esta necessidade, em 2018 foi estabelecida uma parceria estratégica entre a VCI Brasil e o Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) para conduzir pesquisas científicas sobre o desempenho dos fluidos desenvolvidos com esta tecnologia em processos de retificação. Esta colaboração, que continua em andamento, tem como objetivo avaliar sistematicamente os benefícios e limitações desta inovação, sendo o presente trabalho uma parte integrante deste esforço de pesquisa mais amplo.

2.8.3.2. Aditivo de extrema pressão - EP

Os aditivos de extrema pressão (EP) são compostos químicos incorporados aos fluidos de corte para melhorar seu desempenho em condições severas de usinagem, onde altas pressões e temperaturas são comuns. Esses aditivos atuam formando uma fina camada lubrificante (com cerca de 1 μm de espessura) sobre as superfícies metálicas através de reações químicas específicas. Esta película reduz significativamente o atrito e o desgaste, previne a soldagem entre as superfícies em contato e aumenta a vida útil das ferramentas.

Os principais tipos incluem aditivos à base de enxofre, que formam sulfeto de ferro; compostos clorados, que produzem cloreto de ferro; e formulações com fósforo, que geram fosfato de ferro. No entanto, esses aditivos tradicionais, especialmente os contendo cloro, apresentam preocupações ambientais e de saúde, o que tem motivado o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis. Pesquisas recentes, como as de Li et al., (2022), exploram novas formulações, incluindo o uso de nanopartículas, que buscam manter a eficácia lubrificante enquanto minimizam os impactos negativos associados aos compostos convencionais.

2.8.4. Problemas na utilização do fluido de corte

Mesmo com os benefícios econômicos do uso de fluido refrigerante, seu mau uso e métodos errados de sua eliminação podem afetar gravemente a saúde humana e o meio ambiente. Além disso, ele representa 16% a 20% do custo total de fabricação na indústria de produção (Sharma; Tiwari; Dixit, 2016)

As várias substâncias presentes nos fluidos afetam os operadores de máquinas, seja pelo contato com a pele, pela ingestão da substância, como também pela respiração e pela irritação gerada por uma névoa de fluido que pode se formar devido à evaporação do mesmo. Os fluidos

de corte podem ser eliminados após o uso dentro da empresa ou externamente, através de uma empresa de eliminação de resíduos. (Soković; Mijanović, 2001)

Segundo Bruni et al. (2006), a qualidade e o modo como esse fluido é eliminado pode resultar na poluição da água, solo e/ou ar. Porém, a resolução 430/11 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) define como zero a quantidade de óleo mineral, animal e vegetal presente na água, o que obriga as indústrias a buscarem a adequada eliminação dos fluidos. Porém, a eliminação correta significa um considerável aumento dos custos para as empresas.

Durante seu uso, o fluido se altera, pois novas substâncias se formam ou acabam se aderindo a eles, como também, corpos estranhos e microorganismos. Originalmente, o fluido apresenta um risco à saúde, mas isso se agrava no decorrer da sua vida útil (Soković; Mijanović, 2001)

Considerando todos os efeitos negativos dos fluidos ao meio ambiente e ao ser humano, cada vez mais há um rigor maior na escolha do fluido de corte, para que o mesmo seja eficaz, favorável ao meio ambiente e respeite a normas de regulamentação. Normalmente, os parâmetros ecológicos dos fluidos de corte estão estabelecendo novas restrições nos parâmetros de usinabilidade. Sendo assim, a busca por fluidos de qualidade e ecologicamente corretos, são do interesse comum (Soković; Mijanović, 2001)

Nestas condições, cada vez mais a indústria tenta se adequar aos padrões de sustentabilidade, mais conscientes do ponto de vista ambiental (Umeda *et al.*, 2012), e, portanto, seguindo essa tendência, as pesquisas científicas se esforçam para estudar a sustentabilidade dos processos abrasivos (Aurich *et al.*, 2008).

2.8.5. Custos dos fluidos de corte

Os custos totais da usinagem dependem do custo da máquina (desgaste, funcionários, fluidos de corte e manutenção), do local e da energia (Winter; Herrmann, 2014)

Assim como afirma Walker (2013), o custo com fluido de corte utilizando o método convencional é alto se comparado a outras despesas. Deve-se levar em conta, que o valor gasto com esses refrigerantes se dá na aquisição, na manutenção e também no descarte dos mesmos. Estima-se que essas despesas variem entre 8% e 16% dos custos totais de produção, chegando a ser maior do que os gastos relacionados a ferramentas de corte (Dhar; Kamruzzaman; Ahmed, 2006). Logo, torna-se justificável a redução do uso de fluidos de corte (WALKER, 2013).

Segundo Alberdi et al. (2011), não só os fatores mencionados anteriormente, mas também a reciclagem, medidas de segurança e outros aspectos acarretam custos na utilização

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

2.8.6. Manutenção e descarte

Ao se utilizar fluidos de corte em operações de usinagem é evidente que os mesmos comecem a acumular pequenas quantidades de materiais (como pedaços de rebolo e cavacos). Em função disso, inicia-se a proliferação de microrganismos devido à elevada quantidade de compostos orgânicos em sua composição. Assim, há mudança na composição química, a qual altera as propriedades base do fluido, ocasionando um aumento do desgaste da ferramenta e a produção de peças defeituosas (Oliveira *et al.*, 2012).

O monitoramento e a manutenção da qualidade do fluido são dois elementos de extrema importância para o êxito do processo de redução do consumo de fluidos de corte na fonte. Os aspectos mais relevantes que envolvem o monitoramento são: inspeções do sistema, medidas e ajustes periódicos dos parâmetros (como a concentração, o pH e o crescimento microbológico), a correção apropriada de biocidas, a remoção de óleo contaminante e dos cavacos.

No que diz respeito a sua estocagem, o controle de qualidade dos fluidos de corte se inicia com boas condições de estocagem, tendo como parâmetro a ser observado, a temperatura. Deve-se evitar temperaturas extremas. Ademais, os fluidos de corte solúveis em água requerem mais cuidados na estocagem se comparados aos óleos integrais em razão da complexidade da composição química dos fluidos emulsificáveis, os quais são mais suscetíveis às mudanças físicas resultantes das temperaturas extremas de estocagem.

Existem normas para o manuseio correto de fluidos de corte. A portaria MT 204/97 regulariza o transporte de fluidos contaminados enquanto a Resolução ANTT N° 420, de 12 de fevereiro de 2004 apresenta instruções complementares ao Regulamento de transporte terrestre de produtos perigosos.

O descarte de fluidos de corte tem ganhado uma importância crescente no meio industrial. Isso se deve a fortes pressões exercidas pelas leis ecológicas, as quais exigem procedimentos específicos para o descarte de diferentes tipos de fluido (Lauer-Schmaltz; König, 1980). Sokovic & Mijanovic (2001) apresentam alguns desses procedimentos, os quais serão mencionados a seguir.

Em relação aos óleos integrais, os mesmos podem ser vendidos para uma nova refinação ou reciclados pelo fabricante do fluido, assim como por empresas especializadas. Ainda assim, esse tipo de óleo refrigerante pode ser incinerado em caldeiras, desde que respeitando a

legislação ambiental, ou seja, isento de impurezas, no estado seco, apresentando baixa concentração de enxofre e cloro.

Nos fluidos de corte solúveis em água deve ser realizada a separação do óleo e de outros produtos químicos dissolvidos na água. Mesmo após essa separação, esses fluidos não podem ser descartados diretamente no sistema de esgoto.

Já os processos de descarte de emulsões podem ser divididos em: químicos, físicos e físico-químicos. A seleção do procedimento dependerá do estado da emulsão, de sua composição e do custo associado ao processo. Todos esses procedimentos possuem em comum os seguintes estágios: quebra da emulsão, separação do óleo e tratamento da água. A fase aquosa resultante deve estar de acordo com a legislação para seu descarte posterior.

Dentre os processos físicos mais utilizados encontram-se a ultra filtração e a quebra térmica. No primeiro, a emulsão circula através de permeadores, os quais possuem membranas tubulares cujos poros impedem a passagem de moléculas de óleo, efetuando, portanto, a quebra da emulsão. Já no segundo processo, a separação da fase oleosa da aquosa ocorre por meio do aquecimento da emulsão e, dessa forma, pela evaporação da mesma.

Portanto, a reciclagem pode ser uma boa alternativa para um fluido refrigerante, pois os resíduos poluentes são separados e retirados do mesmo, e então, esse fluido pode voltar a ser utilizado juntamente com um refrigerante limpo. Isso reduz a frequência de descarte, impactando diretamente nos custos do processo.

Por fim, compreende-se que processos necessários ao se utilizar de óleos de corte tornam seu uso extremamente oneroso. Isso se deve principalmente aos produtos que não são biodegradáveis, gerando, portanto, custos com tratamentos e descarte (Shokrani; Dhokia; Newman, 2012). Além disso, o descarte incorreto de fluidos de corte a base de óleo é problemático, pode causar contaminação da água superficial e subterrânea, poluição no ar e no solo (Hadad, 2015).

Levando em conta que o descarte do fluido de corte é um fator que eleva muito o custo do processo, utilizar técnicas alternativas de lubrificação se faz extremamente interessante.

2.8.7. Mínima quantidade de lubrificante – MQL

Bianchi et al. (2012) explica que a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) consiste basicamente na aplicação um jato de ar comprimido com uma quantidade mínima de fluido de corte de forma direta na zona de corte. Porém, é de suma importância que a mínima

quantidade de fluido de corte seja suficiente para a redução do atrito e para que a aderência de materiais seja evitada.

Segundo os mesmos autores, essa técnica envolve uma pequena quantidade de óleo lubrificante e um fluxo de ar comprimido. Dessa forma, uma névoa é formada de modo a ser direcionada à região de contato entre a peça e o rebolo. Uma vez que o atrito na zona de contato entre rebolo e peça é reduzido com a aplicação direcionada da névoa de lubrificante, o calor gerado no processo de retificação é menor, o que garante que não haja prejuízos à integridade da ferramenta e da peça em razão de altas temperaturas.

De acordo com Malkin e Guo, (2008c), a utilização de lubrificação convencional na retificação não é muito eficiente, pois o fluido não consegue penetrar adequadamente na zona de contato entre peça e rebolo. Além disso, o alto volume de fluido pode gerar efeitos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente.

Segundo Emami; Sadeghi e Sarhan, (2013), a técnica de aplicação MQL reduz o custo de produção devido ao menor volume de fluido de corte, podendo alcançar uma redução de até 20% do custo total do processo. Além disso, problemas respiratórios e dermatológicos são erradicados e reduz-se a contaminação de solos e águas em virtude do descarte inadequado. A partir desse contexto, é evidente a importância da busca por técnicas alternativas de lubrificação.

No trabalho de Lopes et al. (2018a) os autores concluíram que a técnica MQL atrelada com a limpeza do rebolo é uma alternativa viável à aplicação convencional de fluidos de corte para a retificação. Os autores avaliaram diversas variáveis de saída, e ainda que haja uma redução de desempenho em algumas delas, a técnica de MQL está atrelada a uma redução de custo considerável.

No estudo de Ruzzi et al., (2020), os autores realizaram a retificação do aço AISI 4340 utilizando o rebolo de óxido de alumínio. Nesse estudo, os autores relataram que a utilização do MQL favoreceu a rugosidade média em maiores velocidades de mergulho, apresentando menores valores para essa variável quando comparado com a lubrificação convencional. Segundo os autores, esse comportamento pode ser explicado pelos efeitos do jato de ar comprimido usado na técnica MQL para romper a barreira de ar formada ao redor do rebolo durante a retificação. Ao retificar com a técnica de lubrificação convencional, uma barreira de ar ao redor do rebolo pode estar presente devido à menor pressão do fluido de corte em comparação com o ar comprimido usado na técnica MQL, a menos que a velocidade do jato do fluido de corte seja maior que a velocidade de corte. O MQL ainda se mostrou vantajoso no desgaste diametral do rebolo, tendo apresentado melhor desempenho que o método de

lubrificação convencional em todas as velocidades de mergulho, o que os autores atribuíram à melhor capacidade de lubrificação desse sistema quando comparado com a lubrificação convencional. Outrossim, valores mais baixos de potência de retificação foram registrados após a usinagem com o a técnica de MQL em comparação com a técnica convencional devido à melhor lubrificação fornecida pelo MQL.

2.9. Sistemas Auxiliares de limpeza do rebolo

2.9.1. Jato de limpeza (WCJ)

O WCJ (Wheel Cleaning Jet) é um sistema auxiliar que utiliza um jato de ar comprimido direcionado à superfície do rebolo durante o processo de retificação. Sua principal função é remover os cavacos aderidos e reduzir o empastamento, um fenômeno que ocorre quando partículas de material usinado e grãos de rebolo desgastados obstruem os vãos da ferramenta abrasiva, prejudicando sua eficiência. Estudos como os de (Domingues *et al.*, 2023b; Lopes *et al.*, 2021b) demonstram que o WCJ melhora significativamente o desempenho do processo, especialmente quando combinado com a técnica MQL (Minimum Quantity Lubrication). Garcia *et al.* (2020) observaram que, na retificação do aço SAE 52100, o WCJ reduziu a rugosidade em 70% e o desgaste da ferramenta em 80%, comprovando sua eficácia na manutenção da qualidade da usinagem e na vida útil do rebolo.

2.9.2. Jato resfriado de limpeza (CWCJ)

O CWCJ (Cooled Wheel Cleaning Jet) é uma evolução do WCJ, que combina o jato de ar comprimido com ar resfriado (CA – Cooled Air) para potencializar seus efeitos. Desenvolvido por de Moraes *et al.*, (2021b), esse sistema não apenas remove os cavacos presos no rebolo, mas também auxilia no controle térmico do processo, reduzindo o aquecimento excessivo da zona de usinagem. Em testes com a retificação do aço AISI 4340, a aplicação do CWCJ junto com MQL apresentou um desempenho superior até mesmo em comparação com métodos convencionais de lubrificação, alcançando uma melhor relação **G** (razão entre volume de material removido e volume de desgaste da ferramenta). Essa melhoria se deve à combinação da limpeza eficiente do rebolo com o resfriamento adicional, que reduz o desgaste abrasivo e mantém a estabilidade dimensional da peça. O CWCJ representa, portanto, uma solução avançada para processos de retificação que demandam alta precisão e durabilidade da ferramenta.

2.10. Variáveis de saída do processo

Segundo Winter *et al.*, (2015), os resultados do processo de retificação podem ser categorizados em três dimensões principais: (1) as características geométricas e superficiais da peça usinada, que devem atender às especificações de forma e acabamento; (2) os aspectos energéticos e ambientais, incluindo consumo de energia, custos operacionais e impactos ecológicos; e (3) os indicadores de desempenho do próprio processo de retificação.

No presente estudo, focaremos nossa análise nas variáveis de saída mais relevantes para a investigação proposta, considerando especialmente aquelas que apresentam maior correlação com os parâmetros operacionais em avaliação.

2.10.1. Rugosidade

A rugosidade compreende as micro irregularidades geométricas presentes na superfície do material após o processo de usinagem, resultantes principalmente da ação da ferramenta de corte, mas que também incorporam outras variações morfológicas características do processo de fabricação. No contexto específico da retificação, a rugosidade apresenta particular complexidade em sua formação e análise, sendo influenciada por múltiplos fatores inter-relacionados que atuam de forma combinada (Malkin; Guo, 2008b).

As características finais da rugosidade dependem fundamentalmente das propriedades intrínsecas tanto do material da peça quanto do rebolo abrasivo utilizado. A dressagem do rebolo, com seus parâmetros específicos, exerce influência direta no padrão de rugosidade gerado. O fluido de corte aplicado e o sistema de lubri-refrigeração adotado também se mostram determinantes, assim como a rigidez dinâmica do conjunto máquina-ferramenta. Entre os parâmetros operacionais que afetam significativamente o resultado destacam-se as velocidades de corte e avanço, a profundidade de corte e a granulometria do rebolo. Todos esses elementos atuam sinergicamente, influenciando as forças de corte geradas durante o processo e, conseqüentemente, determinando as características finais da rugosidade obtida (Marinescu *et al.*, 2013).

A quantificação da rugosidade baseia-se na análise sistemática de dois aspectos fundamentais das irregularidades superficiais: sua amplitude vertical (altura) e seu espaçamento horizontal (largura). Entre os parâmetros métricos mais utilizados encontra-se o Ra (Rugosidade média aritmética), que representa o valor médio absoluto das irregularidades, e o Rq (Rugosidade média quadrática), correspondente à raiz quadrada da média dos quadrados das irregularidades. O Rt (Rugosidade total) indica a distância máxima entre picos e vales no perfil

avaliado, enquanto o S_m (Passo médio das irregularidades) refere-se à média dos espaçamentos entre asperezas. A t_p (Taxa de suporte do perfil) representa a porcentagem de contato real da superfície, e o Δa (Ângulo médio das asperezas) descreve a inclinação média das irregularidades.

A medição precisa desses parâmetros é realizada por meio de rugosímetros de contato, ou perfilômetros equipamentos especializados que utilizam um apalpador de alta sensibilidade. Este dispositivo percorre a superfície registrando as variações micrométricas do perfil superficial, convertendo o movimento vertical do apalpador em sinais elétricos que permitem a construção de um perfil detalhado e o cálculo automático dos parâmetros característicos da rugosidade. A escolha do método e parâmetros de medição deve considerar as especificidades do processo de retificação e as exigências do produto (Hobson, 2011).

2.10.2. Desgaste diametral do rebolo

Durante a retificação, o desgaste do rebolo ocorre através de três mecanismos principais: (1) desgaste por atrito entre grão abrasivo e peça, (2) fratura dos grãos abrasivos, e (3) fratura do material ligante. Esses mecanismos resultam das intensas solicitações mecânicas e térmicas durante o processo, sendo a deterioração térmica do ligante particularmente relevante.

A eficiência do rebolo é quantificada pelo parâmetro (G), definido por Lauer-Schmaltz e König (1980), pela equação a seguir:

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} = \frac{a \cdot v_w \cdot t}{\pi \cdot D_s \cdot \delta} \quad (11)$$

Onde (Z_w) e (Z_s) correspondem ao volume do material removido e volume gasto do rebolo, respectivamente, (t) é o tempo de retificação, (D_s) é o diâmetro do rebolo e (δ) é o desgaste radial do rebolo.

Rebolos com maior relação G apresentam melhor desempenho econômico, removendo mais material com menos desgaste. O desgaste do rebolo afeta múltiplos aspectos do processo:

- Precisão dimensional (profundidade de corte e dimensões finais)
- Forças de retificação
- Rugosidade
- Número de arestas de corte ativas
- Frequência necessária de dressagem

Fatores como a espessura equivalente de corte (relação inversa com G), velocidade de corte e eficácia da lubri-refrigeração influenciam significativamente a taxa de desgaste. A otimização desses parâmetros permite melhorar a eficiência do processo como um todo (Malkin; Guo, 2008b).

2.10.3. Desvio de circularidade

O desvio de circularidade corresponde às variações entre a geometria real da peça usinada e suas especificações projetadas, particularmente em componentes cilíndricos, onde tolerâncias de forma são críticas. Esses desvios surgem devido a múltiplos fatores inerentes ao processo de fabricação (Oliveira *et al.*, 2012b).

Estudos demonstram que a precisão dimensional final em operações de retificação é influenciada por aspectos como a exatidão geométrica da máquina-ferramenta, o grau de desgaste do rebolo abrasivo, a estabilidade dinâmica do sistema (incluindo vibrações) e os parâmetros de usinagem, como taxa de remoção de material e energia específica aplicada.

Um fator particularmente relevante é o atrito na interface peça-ferramenta, que contribui significativamente para o surgimento de imperfeições geométricas, incluindo desvios de circularidade. Neste contexto, a seleção adequada do fluido de corte assume papel fundamental, pois sua ação lubrificante reduz as forças de atrito, minimizando distorções e melhorando a qualidade dimensional final da peça. A eficácia do fluido está diretamente relacionada à sua capacidade de formar uma película lubrificante estável sob as condições severas de pressão e temperatura características do processo de retificação (Lin *et al.*, 2018).

2.10.4. Microscopias óticas e Eletrônica de varredura

As técnicas de microscopia constituem ferramentas essenciais para avaliação da integridade superficial em peças retificadas, permitindo a identificação de danos térmicos como queimas superficiais e microtrincas induzidas pelo processo. Entre os métodos mais consolidados, a microscopia óptica oferece a possibilidade de análise microestrutural do material, enquanto a microscopia eletrônica de varredura (MEV) proporciona imagens de alta resolução com percepção tridimensional da topografia superficial. Nos últimos anos, a microscopia confocal tem ganhado destaque nas pesquisas em usinagem abrasiva, particularmente por sua capacidade de fornecer reconstruções tridimensionais precisas da superfície, o que permite uma análise mais detalhada dos mecanismos de interação entre os grãos abrasivos e o material da peça.

Além da aplicação nas peças usinadas, essas técnicas microscópicas são igualmente valiosas para caracterização da superfície ativa do rebolo, possibilitando a quantificação de grãos abrasivos, avaliação de padrões de desgaste e geração de dados para modelagem computacional do processo. No presente estudo, empregou-se uma abordagem combinada utilizando microscopia óptica, MEV e confocal para análise das superfícies retificadas, enquanto a ferramenta abrasiva foi avaliada especificamente por microscopia óptica. Esta metodologia integrada permite uma compreensão abrangente tanto da qualidade superficial obtida quanto do comportamento da ferramenta durante o processo.

Complementando as análises microscópicas, os testes de microdureza representam outra ferramenta fundamental para avaliação da integridade superficial. A realização de perfis de microdureza, tanto na superfície quanto em seções transversais em diferentes profundidades, permite detectar alterações microestruturais induzidas pelo processo térmico da retificação. Tais alterações podem incluir desde transformações de fase até fenômenos de super-revenimento, que resultam em amolecimento do material e consequente redução de suas propriedades mecânicas. A combinação dessas técnicas de caracterização proporciona uma avaliação abrangente dos efeitos do processo de retificação sobre o material, correlacionando parâmetros operacionais com a qualidade final obtida.

2.10.5. Potência de retificação

Malkin e Guo, (2008b) definem que a potência de retificação (P) está relacionada com as componentes tangencial (F_t) e normal (F_n) da força de corte de acordo com a equação (12).

$$P = F_t \cdot (v_s \pm v_w) \quad (12)$$

Sendo v_s a velocidade do rebolo e v_w a velocidade da peça, deve-se utilizar o sinal de adição quando o sentido da velocidade do rebolo for oposto ao da velocidade da peça e o sinal de subtração quando tiverem mesmo sentido.

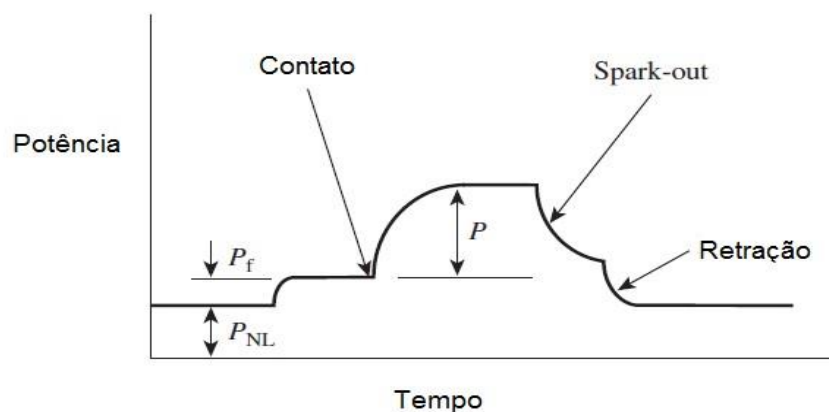
Porém, devido ao fato de que geralmente a velocidade da peça é muito menor que a velocidade do rebolo, pode-se simplificar a equação anterior e obtém-se a equação (13):

$$P = F_t \cdot v_s \quad (13)$$

Conforme estabelecido por Rowe, (2013), o ciclo de potência durante o processo de retificação apresenta características dinâmicas que podem ser divididas em estágios sequenciais, conforme ilustrado na Figura 5. Inicialmente, com o rebolo em movimento, mas sem carga operacional, observa-se uma dissipação de potência básica (P_{NL}) que corresponde principalmente às perdas por atrito no sistema de acionamento e nos mancais. Esta condição representa o estado mínimo de consumo energético do sistema. Com a introdução do fluido de corte no processo, registra-se um incremento na potência dissipada (P_f) decorrente da resistência hidrodinâmica imposta pelo fluido ao movimento rotativo do rebolo. Este efeito é particularmente relevante em sistemas onde o fluido é aplicado em alta pressão ou volume considerável. O estágio seguinte corresponde ao contato efetivo entre o rebolo e a peça, momento em que a potência dissipada (P) atinge seus valores máximos, refletindo a energia necessária para o processo real de remoção de material.

O ciclo culmina com o período de spark-out, caracterizado por uma estabilização gradual da potência seguida de redução progressiva. Esta fase é crucial para a obtenção da precisão dimensional e acabamento superficial desejados, pois permite a acomodação elástica do sistema e a equalização térmica. A compreensão detalhada deste comportamento energético é fundamental para a otimização dos parâmetros operacionais e eficiência do processo de retificação.

Figura 5: Ciclo de variação da potência.



Fonte: Adaptado de (Rowe, 2013)

2.10.6. Análise de custos e poluição na retificação

Field et al. (1980) desenvolveram uma técnica para avaliar o custo e o tempo em três diferentes tipos de processos de retificação, incluindo a retificação cilíndrica externa de mergulho. Um dos principais atributos dessa técnica é a capacidade de analisar o custo de forma

separada por fatores detalhado. No trabalho dos autores, os cálculos de custo foram feitos usando computadores e calculadoras programáveis.

Posteriormente, Sato et al., (2022) utilizaram o trabalho de Field *et al.* (1980) como referência e fizeram algumas adaptações para a análise de custos. Complementarmente às análises das variáveis de saída, o trabalho dos autores apresenta o custo por peça para cada condição de usinagem.

A equação pode ser dividida em três principais fatores: custo do rebolo, custo do fluido e custo da energia. A equação considera o custo do desgaste do rebolo durante a retificação e o desgaste devido à dressagem necessária. O Custo do fluido é o custo de compra e descarte do fluido. O custo da energia é o custo da energia utilizada no processo de retificação e nos equipamentos do método lubrificação-refrigeração. Assim, é possível obter um valor de custo de aplicação dos métodos analisados por US\$/peça.

Os mesmos autores avaliaram o custo por peça comparando o MQL com a lubrificação convencional na retificação de aço AISI 4340. Além disso, foi avaliado também o MQL aliado à limpeza do rebolo. Os autores concluíram que o MQL reduziu o custo do processo em função da redução do custo com fluido de corte. Vale salientar que a utilização do MQL gerou um maior desgaste do rebolo, o que resulta em um aumento de custo. Entretanto, a redução do custo com fluido de corte foi mais expressiva que o aumento do custo com desgaste do rebolo.

2.11. Aço SAE 4340

O material selecionado para esta investigação foi o aço liga ABNT 4340, um material de médio carbono (0,38-0,43% C) com adições de cromo (0,70-0,90%), níquel (1,65-2,00%) e molibdênio (0,20-0,30%), conforme especificado pela norma técnica ABNT NBR 13709 (1996). Após os tratamentos térmicos de têmpera (a 850°C seguido de resfriamento em óleo) e revenimento (entre 200-300°C), este aço desenvolve uma microestrutura predominantemente martensítica revenida, caracterizada por elevada dureza (35-45 HRC) combinada com tenacidade satisfatória.

Do ponto de vista metalúrgico, a combinação dos elementos de liga neste material promove três mecanismos principais de endurecimento: (i) o carbono proporciona a formação da martensita durante o resfriamento rápido; (ii) o níquel aumenta a tenacidade da matriz ferrosa; e (iii) o molibdênio em conjunto com o cromo melhoram a temperabilidade e resistem ao amolecimento durante o revenimento. Esta sinergia resulta em propriedades mecânicas

superiores, com resistência à tração na faixa de 1000-1200 MPa e alongamento em torno de 12-15%.

A seleção deste material justifica-se por sua versatilidade industrial, sendo amplamente empregado na fabricação de componentes críticos que exigem alta resistência mecânica combinada com boa usinabilidade após tratamento térmico. Na indústria automotiva, é utilizado em eixos de transmissão e componentes de suspensão; no setor aeronáutico, em trens de pouso e elementos estruturais; e na indústria de óleo e gás, em componentes de válvulas e conexões de alta pressão.

No contexto específico da retificação, o ABNT 4340 temperado e revenido apresenta desafios particulares devido à sua dureza elevada e tendência ao embotamento de ferramentas. Sua microestrutura martensítica revenida, embora ofereça excelente resistência ao desgaste, pode promover rápido desgaste abrasivo quando submetida a condições inadequadas de usinagem. Estas características o tornam um material ideal para estudos de desempenho em processos de retificação, permitindo avaliar tanto a qualidade superficial obtida quanto o desgaste das ferramentas abrasivas sob diferentes condições operacionais.

A composição química balanceada deste aço, associada ao tratamento térmico otimizado, resulta em um equilíbrio único entre resistência mecânica e tenacidade, propriedades estas que são essenciais para os componentes mencionados e que justificam plenamente sua escolha como material de estudo para investigações sobre processos abrasivos de acabamento de precisão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

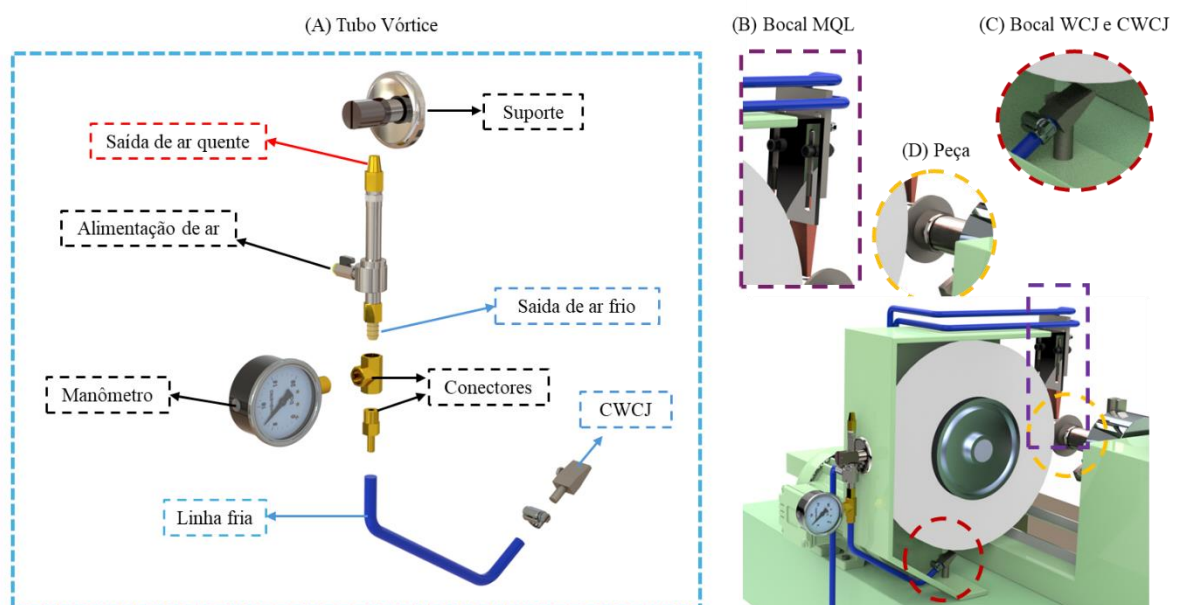
3.1. Retificadora e Materiais

Os procedimentos experimentais foram conduzidos utilizando uma retificadora cilíndrica de imersão fabricada pela empresa Sulmecânica, modelo RUAP515H, assistida por Controle Numérico Computadorizado (CNC) Fagor. A rebole consistia de grãos de óxido de alumínio branco (Al_2O_3) ligados com uma liga vitrificada de dureza média, modelo 38A 150 L 6 V, fornecido pela Norton Abrasivos – empresa Saint Gobain. A ferramenta de retificação possuía formato anular com dimensões: diâmetro externo de 350 mm, diâmetro interno de 127,45 mm e espessura de 25 mm.

3.2. Peças

As peças foram usinadas a partir de aço AISI 4340 e apresentavam a seguinte composição química: Carbono (0,40), Silício (0,25), Manganês (0,80), Molibdênio (0,30), Níquel (1,80), Cromo (0,80), Fósforo (0,035) e Enxofre (0,04). Essas peças foram fabricadas em formato anular com dimensões: diâmetro externo de $54 \pm 0,1$ mm, diâmetro interno de $30 \pm 0,1$ mm e espessura de $4 \pm 0,1$ mm. Consulte a Figura 6 (D) para a ilustração da peça e do dispositivo de fixação durante a usinagem.

Figura 6: Configuração utilizada durante a retificação com dispositivos auxiliares. (A) Tubo Vórtice. (B) Bocal MQL. (C) Bocal WCJ e CWCJ. (D) Peça de trabalho.



Fonte: Autor, 2024.

3.3. Operação de Dressagem

Para a dressagem do rebolo, foi utilizado um aglomerado de diamantes multigrãos produzido pela Master Diamond, medindo 15 mm de comprimento e 8 mm de largura. O processo de dressagem envolveu a remoção de uma camada superficial total de 180 μm do rebolo, dividida igualmente em 60 passadas com profundidade de 3 μm cada. A dressagem foi realizada a uma velocidade padronizada de 400 mm/min, com uma velocidade tangencial da ferramenta de 32 m/s.

3.4. Aplicação do Método lubrificante refrigerante convencional

O método convencional foi implementado utilizando um reservatório de fluido, um medidor de fluxo tipo turbina, mangueiras, uma bomba centrífuga, válvulas de esfera e um

bocal de aplicação. A mistura foi dispensada a uma pressão de 130 kPa na região de corte com uma vazão de 17 L/min, empregando um sistema de reutilização circulatória para garantir a manutenção e controle contínuo das propriedades do fluido lubrificante e refrigerante.

3.5. Mínima quantidade de lubrificante (MQL)

A configuração do método MQL envolveu um compressor de ar, um regulador de pressão e um atomizador, modelo ITW Accu-Lube 79053D, produzido pela ITW Chemical Products Ltd. O fluido atomizado foi liberado na região de corte com a mesma velocidade tangencial do rebolo, facilitado por uma pressão de 800 kPa e uma vazão de 20 ml/h. O fluxo de ar comprimido foi medido usando um medidor tipo turbina, modelo SVTG12/12BA4A44BS, fornecido pela Contech Company, calibrado para uma pressão de 8 kgf/cm². Consulte a Figura 6 (B) para a configuração do método MQL.

3.6. Fluidos de Lubri-refrigeração

O fluido semi-sintético Rocol 4847 Ultracut 370, produzido pela ITW Chemical Products, foi utilizado como fluido base. Os fluidos MV Aqua 100, MV Aqua 180 e MV Aqua 182, fabricados pela VCI Brasil, foram usados comparativamente e referidos como VCI, VCI LC e VCI EP, respectivamente. Para o método convencional de fluido em abundância, foi utilizado fluido emulsificado em água na concentração de 5% (1:20), adicionando biocidas, fungicidas, agentes alcalinizantes e antiespumantes. Enquanto isso, para os métodos MQL, os fluidos foram usados em concentração natural.

3.7. Sistemas de Jato de Limpeza do Rebolo (WCJ) e resfriado (CWCJ)

A implementação do sistema WCJ envolveu um compressor de ar comprimido com uma vazão de 8 l/s e uma pressão de 800 kPa, mangueiras, válvulas de controle de pressão e um bico de aplicação. O ar foi direcionado para a superfície de corte do rebolo, com o bico de saída posicionado a um ângulo de 30°, conforme mostrado na Figura 6 (C).

O sistema CWCJ é essencialmente o mesmo que o sistema WCJ, mas com um secador para reduzir a umidade no ar comprimido e um tubo de vórtice, modelo 6910.15, fabricado pela Emuge-Franken, para resfriar o ar comprimido. De acordo com Saberi et al., (2016), estudos recentes desenvolveram técnicas criogênicas eficientes usando nitrogênio líquido e hélio como refrigerantes, que reduzem a temperatura na interface de corte, as forças de usinagem e as tensões residuais. No entanto, os custos dos equipamentos desses componentes e seu manuseio

são mais elevados do que os métodos convencionais. Além disso, eles apresentam sensibilidade a altas cargas dinâmicas e fadiga.

Sob essa perspectiva, o uso de um tubo de vórtice para resfriar o ar comprimido torna-se atraente devido à sua facilidade de implementação, baixos custos e ampla faixa de temperatura. Xue, Arjomandi e Kelso, (2013) explicam que o princípio de funcionamento de um tubo de vórtice é uma simples injeção de fluido comprimido tangencialmente ao diâmetro interno de um tubo. O autor ressalta ainda que a separação interna entre as porções fria e quente ocorre exclusivamente devido aos efeitos dinâmicos do fluido. A porção quente corre em contato com a parede interna do tubo, saindo do lado oposto à entrada, enquanto a porção fria retorna pela parte central, deixando o dispositivo pelo mesmo lado da entrada. O modelo utilizado é mostrado na Figura 6 (A).

3.8. Medição dos Parâmetros de Saída

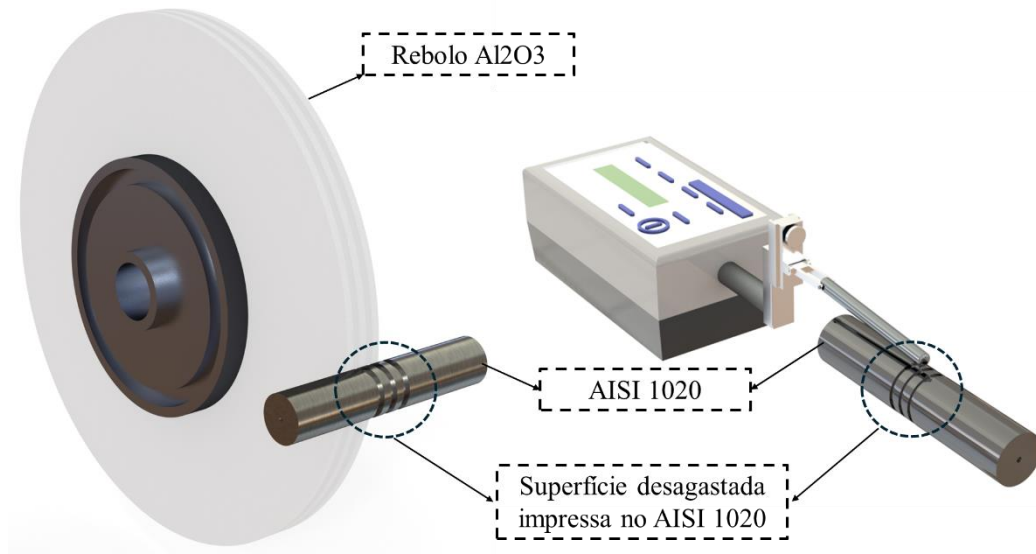
Para contribuir com o conhecimento científico sobre o processo de retificação do aço SAE4340 utilizando métodos econômicos e sustentáveis, os parâmetros de saída compararam a aplicação de fluidos lubrificantes e refrigerantes convencionalmente utilizados com fluidos equipados com inibidores de corrosão para cada técnica de lubrificação: Convencional, MQL, MQL + WCJ e MQL + CWCJ.

A rugosidade foi verificada utilizando o padrão de média aritmética (R_a), com medições realizadas por um perfilômetro produzido pela Taylor Hobson, modelo Talysurf Form 60, equipado com filtro Gaussiano, comprimento de corte de 0,25 mm e comprimento total de 1,25 mm.

O desvio de circularidade foi avaliado utilizando um instrumento de medição de circularidade fabricado pela Taylor Hobson, modelo Talyrond 31C, empregando o filtro Least Square Circle (LSCI). Foram realizadas dez medições em cinco pontos distintos ao longo da espessura de quatro milímetros da peça.

O desgaste diametral do rebolo foi caracterizado utilizando um método de medição indireto. Entre a usinagem de uma peça e outra, o perfil resultante na superfície do rebolo foi transferido para um cilindro de aço AISI 1020 de baixa dureza. Após esse procedimento, as áreas desgastadas do rebolo criaram saliências no cilindro, permitindo a medição das diferenças de raio resultantes no rebolo. Essa abordagem permitiu estimar o volume de material desgastado da ferramenta. A Figura 7 ilustra o funcionamento deste método.

Figura 7: Esquema de medição indireta do desgaste diametral do rebolo.



Fonte: Autor, 2024.

A estimativa de custos para a implementação de cada técnica foi realizada com base nos cálculos fornecidos pelas Equações (13)-(15) de (Field; Kegg; Buescher, 1980), (Pusavec *et al.*, 2010) and adaptado por (Lopes *et al.*, 2021b).

$$C_{rebolo} = \frac{C_s * V}{G} + \frac{\pi * b_s * C_s}{N_d} * (d_s * a_d - a_d^2) \quad (13)$$

$$C_{fluido} = \frac{v_{jet} * a_e}{N_c * v_w} * (C_f + C_w) \quad (14)$$

$$C_{energia} = \frac{(P_c + P_{bo} + P_{air}) * C_e}{60000} * \left(\frac{2 * R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (15)$$

A análise da poluição e a estimativa das emissões de carbono durante o processo de retificação foram calculadas com base no fluido utilizado e no consumo de energia (corte, ar comprimido e sistema de recirculação), utilizando os parâmetros encontrados na Tabela 1 e nas equações (16)-(17).

$$CE_{energia} = \frac{(P_c + P_{bo} + P_{air}) * CE_e * 3,6}{60000} * \left(\frac{2R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (16)$$

$$CE_{fluido} = \frac{V_{jet} * k_p * CE_{oil}}{N_c} * \left(\frac{2R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (17)$$

A Potência de Retificação foi calculada rastreando meticulosamente o consumo de energia durante o processo de retificação no eixo principal. Isso envolveu o uso de um módulo Curvepower3 junto a dois sensores de efeito Hall, que capturaram sinais de Tensão (V) e Corrente (A), operando a uma rápida taxa de aquisição de dados de 2 kS/s. Os dados brutos

foram convertidos de forma contínua utilizando uma placa de aquisição de dados de o, especificamente o modelo PCI-6035EDAQ, seguidos por um processamento minucioso no software LabVIEW 7.1, ambos produtos renomados desenvolvidos pela National Instruments.

Finalmente, o mapeamento 3D das superfícies do rebolo e da peça foi realizado utilizando um Perfilômetro, modelo Talysurf Form 60, fabricado pela Taylor Hobson. Além disso, o equipamento Inspect S 50, fabricado pela Field Electron and Ion Company (FEI), também foi utilizado.

Tabela 1: Parâmetros para análise de custo e poluição.

Simbolos	Descrição	Unidades	Valores			
a_d	Profundidade total de dressagem	[mm]	0.180			
a_e	Profundidade radial removida	[mm]	2.5			
b_s	Largura do rebolo	[mm]	25.0			
b_w	Largura da peça	[mm]	4.0			
v_w	Taxa de avanço	[mm/min]	0.75			
t_{so}	Spark-out time	[min]	0.083			
C_r	Preço do rebolo	[US\$]	136.20			
d_s	Diâmetro externo do rebolo	[mm]	350.0			
d_{min}	Mínimo diâmetro do rebolo	[mm]	295.59			
d_w	Diâmetro externo da peça	[mm]	54			
Ω	Rotação do rebolo	[rad/s]	183.78			
N_d	Número de peças entre dressagens	[-]	2.0			
R	Percurso em avanço rápido	[mm]	300.0			
r	Velocidade de avanço rápido	[mm/min]	36000.0			
V	Volume removido da peça	[mm ³ /min]	2277.6547			
C_{air}	Custo de ar comprimido	[US\$/m ³]	0.0106			
C_e	Custo de energia	[US\$/kWh]	0.12			
CE_e	Carbono emitido por energia	[kgCO ₂ /MJ]	0.128			
CE_{oil}	Carbono emitido por óleo	[kgCO ₂ /l]	3.0616			
C_s	Custo de uso do rebolo	[US\$/mm ³]	0.000197475			
C_w	Custo de descarte do fluido	[US\$/l]	0.085			
M	Custo por hora do operador	[US\$/h]	20			
-	-	-	Conven.	MQL	MQL+WCJ	MQL+CWCJ
k_p	Proporção de diluição	[-]	0.03	1.0	1.0	1.0
P_{air}	Potência do compressor	[W]	0	5500.0	5500.0	5500.0

P_{bo}	Potência da bomba de óleo	[W]	372,85	0	0	0
V_{jet}	Vazão de fluido	[l/min]	17,0	0,002	0,002	0,002
N_c	Reutilizações do fluido	[-]	10,0	1,0	1,0	1,0
V_{air}	Vazão do compressor de ar	[m ³ /min]	0	0,85	0,85	0,85
Método lubrificador		(P) Potência de retificação [W]	(Cf) Custo de fluido [US\$/L]			
Convencional		320,37	0,4125			
Convencional VCI		296,74	0,33			
Convencional VCI LC		291,54	0,309375			
Convencional VCI EP		307,86	0,32175			
MQL		493,37	13,75			
MQL VCI		465,88	11			
MQL VCI LC		434,39	10,3125			
MQL VCI EP		474,10	10,725			
MQL+WCJ		390,85	13,75			
MQL+WCJ VCI		359,06	11			
MQL+WCJ VCI LC		349,85	10,3125			
MQL+WCJ VCI EP		384,83	10,725			
MQL+WCJ		356,12	13,75			
MQL+WCJ VCI		331,20	11			
MQL+WCJ VCI LC		328,01	10,3125			
MQL+WCJ VCI EP		350,49	10,725			

Fonte: Autor, 2024.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante e após os ensaios para cada velocidade de avanço e para cada método de lubrificação utilizados. Assim, serão apresentadas figuras para auxiliar na comparação e entendimento da técnica, bem como na explicação de alguns fenômenos particulares do processo.

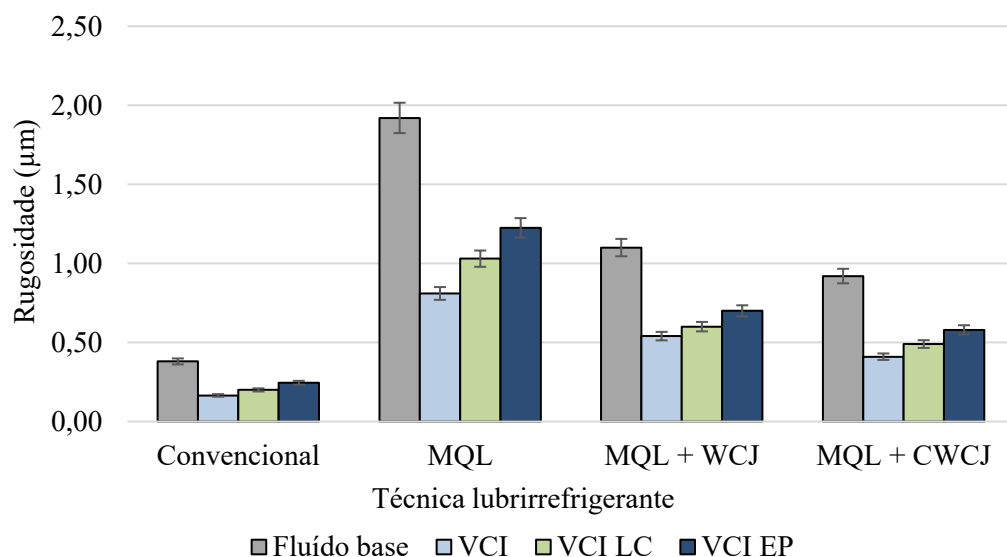
4.1. Rugosidade

A rugosidade é essencial para o processo de retificação, pois as peças selecionadas para este processo geralmente possuem tolerâncias geométricas muito apertadas (Sato *et al.*, 2019). A Figura 8 apresenta os resultados da rugosidade para cada condição de lubri-refrigeração estudada.

Em primeiro lugar, há uma tendência clara de aumento da rugosidade ao comparar o método convencional com o método MQL (Minimal Quantity Lubrication). No caso do fluido base, comparando os resultados do método convencional com o MQL, observa-se que o MQL resultou em um aumento de 405% nos valores de rugosidade. Nota-se também que as técnicas WCJ (Wheel Cleaning Jet) e CW CJ (Cold Wheel Cleaning Jet) contribuíram significativamente para melhorar o MQL.

Para o fluido base, o MQL+WCJ reduziu os valores de rugosidade em 42,7% em comparação com a técnica MQL. Da mesma forma, o MQL+CWCJ gerou uma redução de 52,1%. Esse comportamento é devido ao fenômeno de empastamento que ocorre durante a retificação com MQL. O MQL não possui um poder de refrigeração tão significativo quanto o método convencional, devido ao menor volume de água no processo.

Figura 8: Rugosidade média (Ra) para cada condição de usinagem.



Fonte: Autor, 2024.

Conseqüentemente, o MQL gera um aumento de temperatura na interface de corte, fazendo com que os poros do rebolo fiquem obstruídos com cavacos. Esse fenômeno é chamado de empastamento. Uma vez que os poros estão obstruídos, o rebolo perde a capacidade de corte e entra em um ciclo de baixa eficiência e aumento de temperatura.

Talon et al., (2022) e Ávila et al., (2023) observaram esse comportamento em diferentes materiais e com diferentes rebolos. Em ambos os estudos, os autores conseguiram observar uma deterioração nos resultados de rugosidade após o uso do MQL, tanto para aço quanto para cerâmica. Nesses estudos, o empastamento foi observado em rebolos de diamante, óxido de alumínio, carbetto de silício verde e carbetto de silício preto. No entanto, parte desse empastamento pode ser removido utilizando-se jato de ar comprimido no rebolo. Por essa razão,

a técnica WCJ beneficiou o processo. Além disso, ao utilizar o resfriamento por ar comprimido, houve uma melhoria na refrigeração dos grãos abrasivos aumentando o seu tempo de vida útil e evitando parte do empastamento. Isso resulta em superfícies menos rugosas para o CWCJ em comparação com o WCJ.

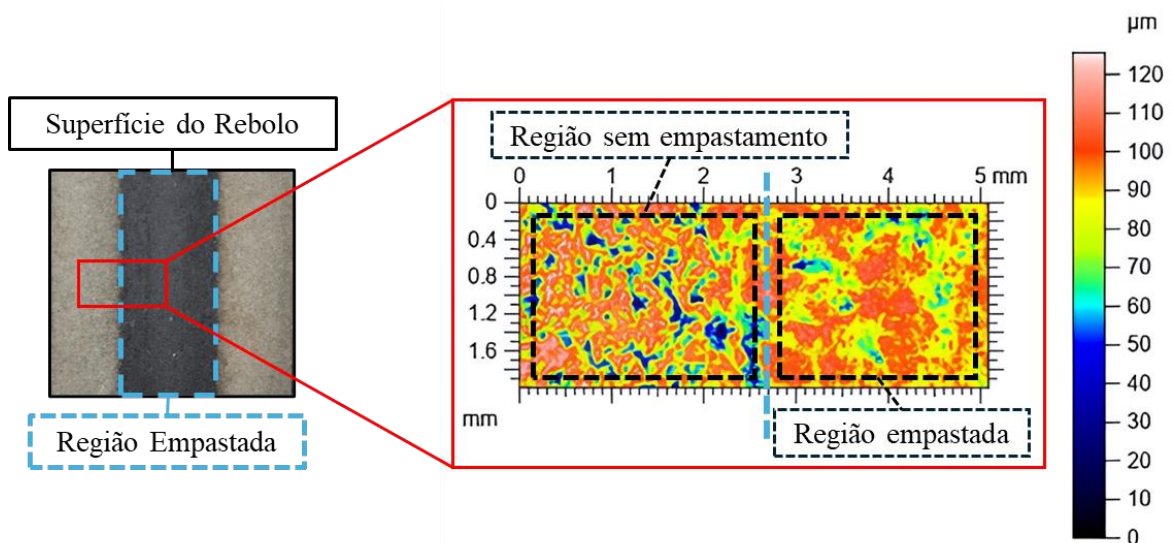
Nos estudos de Lopes et al., (2023a) e Ribeiro et al., (2023), os autores constataram que a técnica WCJ permitiu uma melhora significativa nos resultados de rugosidade para a técnica MQL.

No entanto, quando analisado sob a perspectiva dos fluidos de corte, nota-se que a incorporação de VCI (Inibidor Volátil de Corrosão) aos fluidos de corte melhorou os resultados de rugosidade em comparação com o fluido base. Talon et al., (2019b, 2020b) atribuíram esse comportamento a um agente de lubricidade presente nos compostos de VCI. Este agente tem a capacidade de se polimerizar com o aumento da pressão e temperatura, favorecendo a lubrificação do processo.

No entanto, o VCI LC e o VCI EP afetaram negativamente os resultados de rugosidade quando comparados apenas com o fluido VCI. Talon et al., (2020b) explica que o aditivo de pressão extrema tende a garantir a formação de um filme entre o grão abrasivo e a peça. Nesse sentido, o contato entre o grão e a peça é reduzido. Assim, o rebolo perde a capacidade de corte, e o processo gera maior rugosidade.

Portanto, a partir da discussão, nota-se que o empastamento gera um aumento nos valores de rugosidade devido ao acúmulo de material nos poros do rebolo. A Figura 9 apresenta uma imagem obtida pelo perfilômetro comparando as regiões empastadas e não empastadas do

Figura 9: Caracterização Superficial do rebolo pós-usinagem.

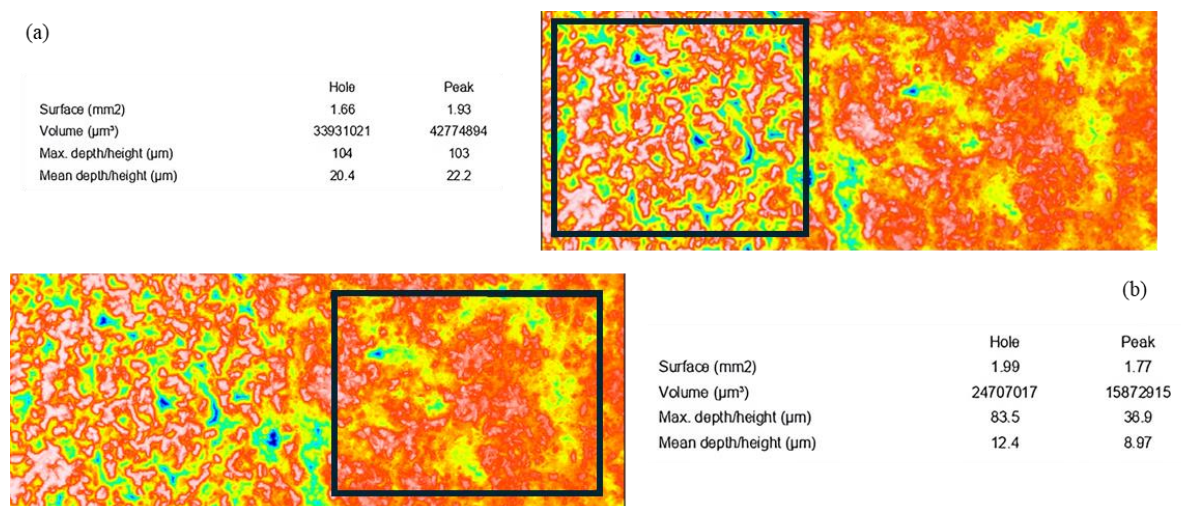


rebolo durante a usinagem usando o fluido padrão e o método MQL de lubri-refrigeração convencional.

Na Figura 9, pode-se notar que, no lado esquerdo da imagem, onde não houve usinagem, há picos (brancos) e vales (azuis) maiores em comparação com o lado direito da imagem, onde uma peça foi usinada e apresenta empastamento visual. Este resultado indica desgaste dos grãos abrasivos devido à redução dos picos em comparação ao lado esquerdo da imagem. Este resultado é consequência do desgaste do rebolo durante a usinagem. No entanto, a ausência de vales indica que os poros do rebolo foram preenchidos com material da peça. Para quantificar isso, foi realizada uma análise dos valores médios de picos e vales para cada região do rebolo.

A Figura 10 (a) e (b) apresenta os resultados dessa análise. Nota-se que, na região original (a) do rebolo, o vale médio é de 20,4 μm , enquanto na região empastada (b), a média é de 12,4 μm , indicando uma redução de 39% no valor médio dos vales. Além disso, o volume de empastamento é aproximadamente a diferença entre os volumes dos vales na região original e na região empastada. O volume de vales na região original do rebolo é de 33.931.021 μm^3 , comparado a 24.707.017 μm^3 na região empastada. Portanto, é possível estimar que o volume de material empastado corresponde, aproximadamente, à diferença entre esses dois volumes: 9.224.004 μm^3 . Analisando ainda a Figura 10, nota-se que o valor médio do pico reduziu de 22,2 μm para 8,97 μm , indicando desgaste do rebolo e redução de sua capacidade de corte.

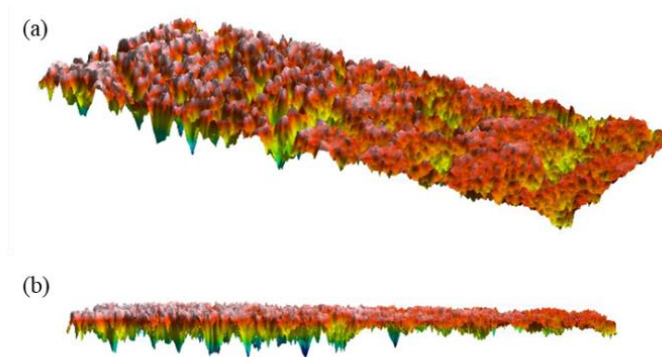
Figura 10: Análise da média de picos e vales: (a) Região virgem, (b) Região empastada.



Fonte: Autor, 2024.

A Figura 11 apresenta uma visualização 3D, de vários ângulos, da região empastada.

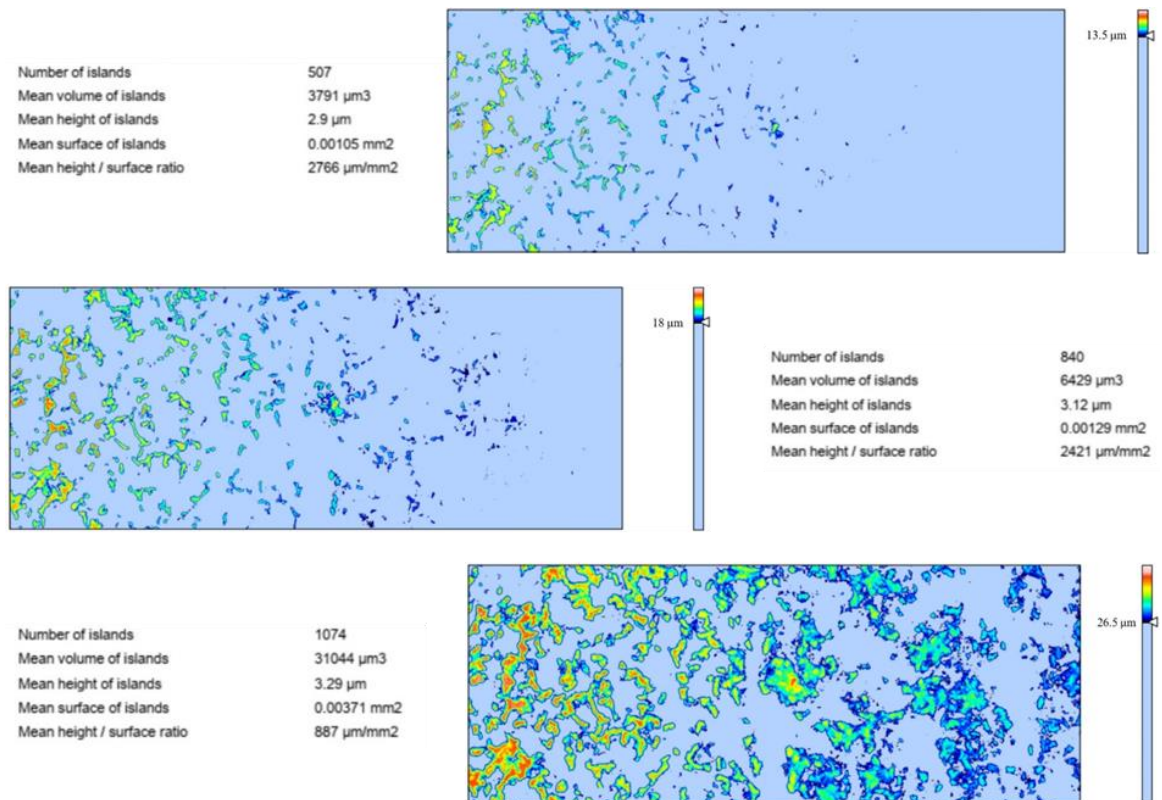
Figura 11: Perspectiva 3D da superfície do rebolo.



Fonte: Autor, 2024.

A Figura 11 permite uma análise qualitativa do fenômeno de empastamento. Nota-se que houve uma perda significativa de porosidade do rebolo. A análise das "ilhas" presentes na Figura 12 confirma que os vales mais profundos estão localizados na região original do rebolo.

Figura 12: Análise de ilhas, da superfície utilizada do rebolo.



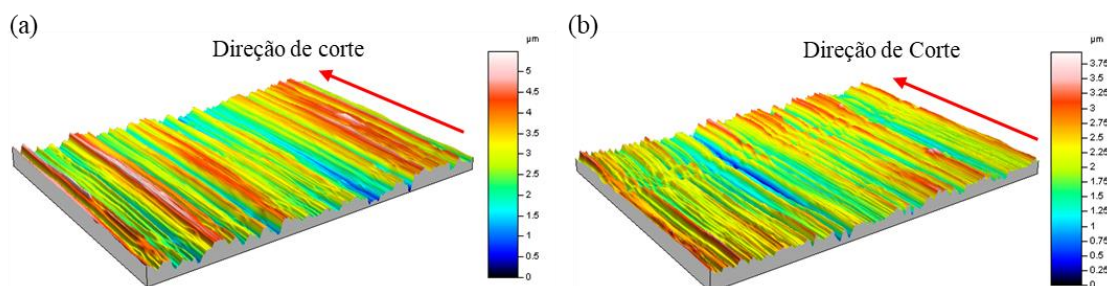
Fonte: Autor, 2024.

A análise das ilhas começa no ponto mais profundo do vale como referência. Nota-se que, à medida que as ilhas se elevam até uma altura de 13,5 μm , a grande maioria dos vales se encontra apenas na região original do rebolo. A partir de 18 μm , alguns vales começam a se

destacar na região empastada. A partir de 26,5 μm , já há uma quantidade significativa de vales na região empastada; no entanto, devido à diferença de coloração, nota-se que os vales que surgem na região empastada não são tão profundos quanto os da região original, devido ao empastamento.

A Figura 13 (b) apresenta um mapeamento superficial das peças retificadas sob a condição de lubri-refrigeração MQL + fluido base, enquanto a Figura 13 (a) representa a usinagem lubrificada e refrigerada com os sistemas auxiliares CW CJ e VCI EP com inibidores de corrosão. Nas imagens, observa-se que a superfície resultante, sem auxílio de limpeza, apresenta menor número de picos, bem como vales mais largos, devido à maior normalização superficial do rebolo empastada. Segundo Sato et al., (2020), o fenômeno de empastamento ocorre gradualmente com a compressão dos cavacos na região dos poros, até o ponto em que a energia necessária para compressão e alocação de material nessa região é igual ou maior do que a energia necessária para o fluxo lateral. Assim, o material que normalmente seria cisalhado passa a ser deslocado para regiões tangenciais à trajetória do grão.

Figura 13: Topografia da superfície usinada: (a) MQL + CW CJ + VCI EP
(b) MQL + fluido base.



Fonte: Autor, 2024.

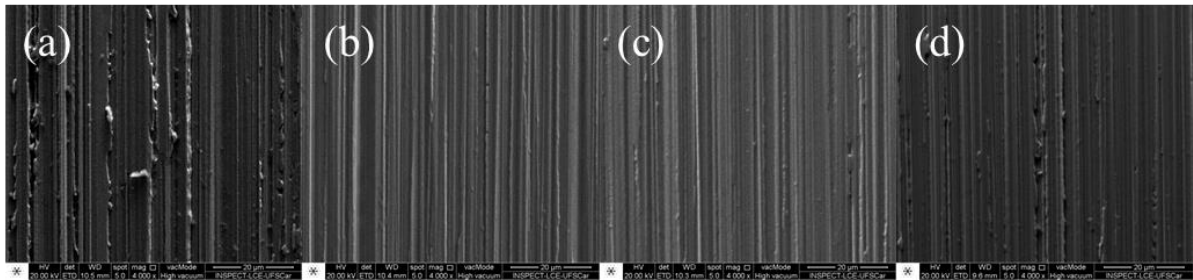
Na mesma perspectiva, o comportamento oposto é observado para as técnicas assistidas pelo sistema CW CJ e pelo uso do VCI EP com inibidor de corrosão. A imagem mostra um aumento no número de picos e uma diminuição nas larguras dos vales. Considerando o estudo de (Sato et al., 2020), esse comportamento demonstra que o sistema auxiliar CW CJ + VCI EP foi eficiente em manter os poros livres, permitindo que os cavacos gerados por um maior número de grãos fossem corretamente alocados, resultando em maior qualidade superficial.

A Figura 14 complementa a análise apresentando a microscopia eletrônica de varredura realizada nas peças usinadas utilizando o método de lubri-refrigeração MQL+CW CJ. Observa-se que o uso de fluido base e VCI EP resulta em uma superfície com maior presença de deformações plásticas.

Nota-se que no primeiro não há capacidade de polimerização com pressão e temperatura, resultando em baixa lubrificação dos poros, assim o fenômeno de empastamento

é acentuado, dificultando a formação e o cisalhamento de cavacos. No segundo, com a formação de um filme espesso de fluido, o contato direto entre o grão abrasivo e o material usinado é reduzido, causando a diminuição da capacidade de cisalhamento, aumentando a taxa de

Figura 14: Microscopia eletrônica de varredura da superfície usinada com MQL + CW CJ: (a) Fluido base, (b) VCI, (c) VCI LC e (d) VCI EP.



Fonte: Autor, 2024.

deformação.

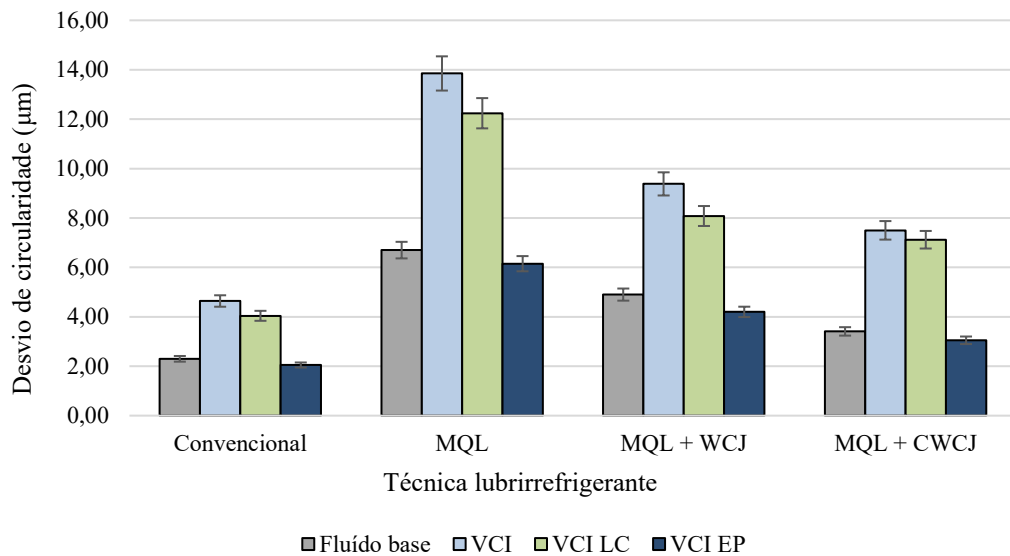
Por outro lado, a polimerização do fluido que ocorre com o VCI e o VCI LC é benéfica para o processo de formação de cavacos, considerando a melhor lubrificação dos poros. Portanto, o material passa pelas três fases do processo, terminando com cisalhamento adequado.

4.2. Desvios de circularidade

A indústria atual trabalha incansavelmente na busca pela padronização e intercambialidade de seus componentes, visando facilitar a configuração e reduzir o tempo de produção. De acordo com Zeng et al., (2023), o parâmetro de desvio de circularidade está intimamente ligado ao nível de intercambialidade de um componente. Segundo o autor, desvios significativos de forma impedem o uso do mesmo componente em diferentes produtos devido à impossibilidade de montagem. Zeng et al., (2023) também destaca que o processo de retificação é o principal método de usinagem para atingir baixos desvios de circularidade, o que está relacionado à rigidez estrutural da máquina.

Por outro lado, (Shaw, 1996) afirma que a geração de calor e altas temperaturas na zona de corte, inerente ao processo de retificação, causa expansões térmicas tanto na ferramenta quanto na peça, prejudicando assim a qualidade geométrica resultante. No entanto, o autor ressalta que a lubrificação e a refrigeração eficientes podem mitigar esses efeitos. Levando esses fatores em consideração, a Figura 15 apresenta os resultados de desvios de obtidos para cada condição de usinagem testada.

Figura 15: Desvios de circularidade para cada condição de usinagem.



Fonte: Autor, 2024.

De forma geral, observa-se que o uso do método de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) apresenta um efeito negativo nos desvios de circularidade. Hadad e Sadeghi, (2012) explicam, por meio de modelagem analítica, que embora a técnica MQL forneça excelente lubrificação na zona de corte, ela não atinge níveis aceitáveis de refrigeração. Lopes et al., (2019c) compararam a aplicação do MQL com o método convencional de inundação, concluindo que a eficiência de refrigeração dos métodos tradicionais se deve ao volume de água utilizado e à sua facilidade em trocar calor. Essa análise está alinhada com o estudo de (Shaw, 1996), pois a ineficiência no controle térmico na interface de corte permite o aumento da temperatura e as expansões térmicas na peça e na ferramenta.

Além disso, assim como na rugosidade, os sistemas de limpeza WCJ e CWCJ reduzem 31% e 47% do desvio de circularidade apresentado pelo MQL convencional. De acordo com Marinescu et al., (2007), um rebolo com especificações adequadas deve conduzir porções de fluido refrigerante para a interface de contato através dos poros. O método MQL permite o preenchimento acelerado desses poros, diminuindo a eficácia das trocas térmicas na região e aumentando a temperatura e as expansões térmicas. Assim, os sistemas WCJ e CWCJ atuam removendo os cavacos já aderidos à superfície do rebolo e aumentando o tempo durante o qual o fluido é conduzido pelos poros, melhorando consequentemente a qualidade geométrica resultante do processo.

Isoladamente, o uso de VCI e VCI LC é prejudicial ao desvio de circularidade. Diferentemente da rugosidade, a capacidade de polimerização, que permite o aumento de

pressão e temperatura, é diretamente proporcional ao desvio de circularidade devido ao crescimento das expansões térmicas.

Curiosamente, o uso de VCI EP com aditivo de pressão extrema contradiz os dois anteriormente mencionados. Segundo Papay, (1998), os aditivos de pressão extrema protegem o equipamento contra o desgaste. O autor destaca que os aditivos EP permitem a formação de um filme lubrificante que envolve os corpos em contato, reduzindo o atrito. Com base nesse princípio, reduções médias de 11% nos desvios de circularidade com a adição de VCI EP podem ser atribuídas à capacidade do filme protetor de envolver os grãos, reduzindo a geração de calor devido ao atrito e, conseqüentemente, as expansões térmicas, além de melhorar a distribuição das tensões normais no processo. ativamente pequeno (23% para convencional e 16% para MQL). Portanto, o MQL apresenta resultados comparáveis à convencional, principalmente nestas velocidades de avanço.

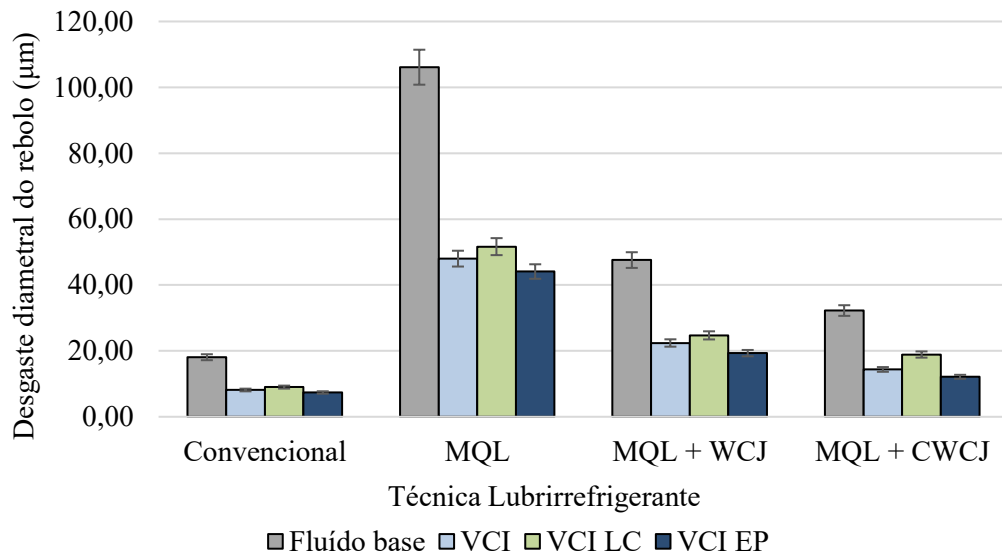
4.3. Desgaste diametral do rebolo

O desgaste diametral do rebolo pode ocorrer de três maneiras diferentes: atrito, fratura e arrancamento de grãos. A fratura de grãos é a mais comum, sendo causada principalmente por choques térmicos ou sobrecargas mecânicas. Devido às altas temperaturas e forças envolvidas, essas situações estão constantemente presentes no processo de retificação (Marinescu *et al.*, 2016b; Naskar; Choudhary; Paul, 2020).

O desgaste do rebolo pode representar desvios no perfil da ferramenta, resultantes das forças envolvidas no processo de retificação. Quando ocorre em níveis elevados, esse desgaste pode comprometer a qualidade da peça usinada. Como observado por Marinescu *et al.*, (2016b), nos processos de retificação, desvios na circularidade do rebolo podem induzir vibrações na estrutura da máquina, que se manifestam na superfície da peça como irregularidades conhecidas como chatters, que, em determinadas circunstâncias, podem inviabilizar o uso do componente retificado. Além disso, como apontado por Malkin e Guo, (2008b), o desgaste diametral do rebolo está intimamente ligado aos custos operacionais, devido à necessidade de dressagem e ao volume de material removido durante esse processo.

Considerando esses fatores, a Figura 16 ilustra graficamente os resultados do desgaste diametral do rebolo para cada condição de lubri-refrigeração testada.

Figura 16: Desgaste diametral do rebolo para cada condição de usinagem.



Fonte: Autor, 2024.

O método convencional de inundação obteve os melhores resultados de imediato. Segundo Shaw, (1996), o aumento da lubrificação e refrigeração ao ajustar o volume de fluido reduz o desgaste do rebolo. Consequentemente, o atrito entre o grão e a peça, assim como entre o cavaco e o ligante, é minimizado, controlando assim a temperatura e mantendo-a em um nível aceitável para preservar a resistência do ligante por mais tempo.

O efeito inverso explica o aumento do desgaste ao aplicar o método MQL; a redução do fluido lubrificante e refrigerante aumenta o atrito entre o grão e a peça, bem como entre o cavaco e o ligante, facilitando o desprendimento de grãos inteiros. Oliveira et al., (2009) destacam a baixa capacidade de resfriamento do ar comprimido em comparação com a água, amplamente utilizada no método de inundação convencional. Consequentemente, as temperaturas de trabalho na interface de corte atingem níveis suficientemente altos para enfraquecer o ligante.

Por outro lado, os sistemas auxiliares de limpeza WCJ e CWCJ reduzem, em média, 55% e 70%, respectivamente, o volume de material desgastado no rebolo. Lopes et al., (2023b) estudaram a aplicação de MQL auxiliado por sistemas de limpeza na retificação do aço SAE 4340; o autor enfatiza que essa redução decorre da atenuação do fenômeno de clogging. O jato de ar comprimido pode reduzir a adesão de cavacos aos poros e, consequentemente, o atrito cavaco-ligante mencionado por (Shaw, 1996). O mesmo estudo destaca que o efeito de resfriamento do ar comprimido reduz o tempo de resfriamento dos cavacos aderidos à

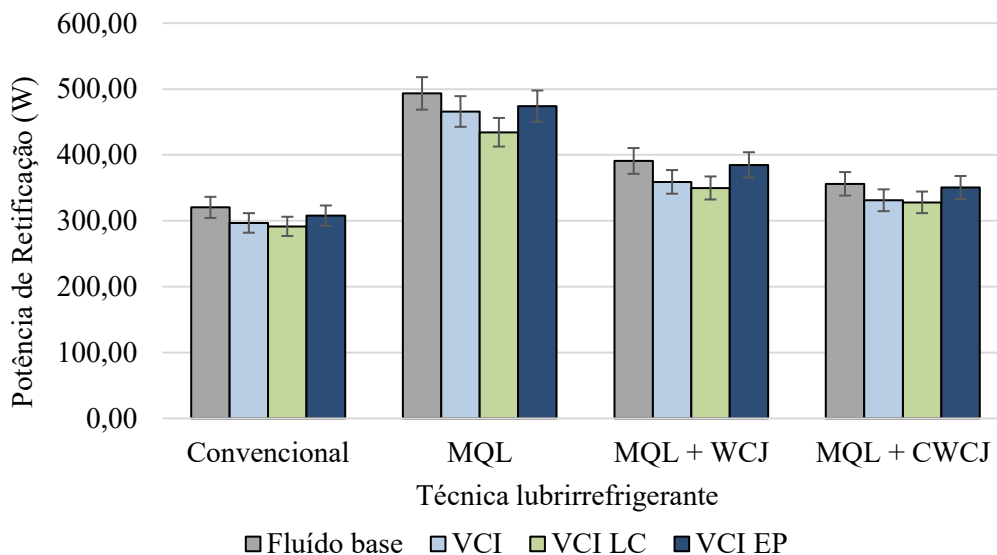
reboladeira e o tempo em que o ligante é submetido a altas temperaturas, mantendo assim a funcionalidade da ferramenta.

Por fim, a Figura 16 mostra que o uso de fluidos VCI não varia significativamente entre eles. No entanto, em comparação com o fluido base, a redução média no desgaste diametral do rebolo é de 55%. Talon et al., (2020b) atribuem a diminuição do desgaste devido aos aditivos VCI à camada de repulsão polimerizada na interface grão-peça, que reduz as tensões atuantes na região. Dessa perspectiva, o uso de aditivos aproxima os resultados de técnicas alternativas e convencionais.

4.4. Potência de retificação

A Figura 17 apresenta os dados de potência obtidos para cada condição de lubri-refrigeração estudada. Moretti et al., (2024) mencionam que vários fatores influenciam a potência durante o processo de retificação; no entanto, o empastamento é um desses fatores. Nesse sentido, pode-se notar que os resultados de potência foram, em média, 66,2% maiores para a técnica MQL em comparação com o método de inundação.

Figura 17: Potência de retificação para cada condição de usinagem.



Fonte: Autor, 2024.

Lopes et al., (2023b) afirmam que a quantidade de energia requerida é proporcional ao desgaste do rebolo. A agressividade dos grãos abrasivos é reduzida pela formação de empastamento, exigindo mais energia para remover o material, o que aumenta o consumo energético da retificação. Os autores também observam que, embora não tenha atingido os valores de energia obtidos com a técnica de inundação, a combinação de MQL com o jato de

limpeza do rebolo a um ângulo de 30° mostrou-se promissora como uma alternativa viável e sustentável. Portanto, é notável que as técnicas MQL+W CJ e MQL+CWCJ foram capazes de reduzir os valores de consumo de potência em comparação com a técnica MQL isoladamente.

Por outro lado, ao observar os fluidos de corte, é possível notar que a adição de VCIs beneficiou sutilmente o processo. Dado que fenômenos dissipadores de energia, como adesão, atrito e deformações plásticas e elásticas, são influenciados pela lubrificação da zona de corte, os VCIs com maior capacidade lubrificante tiveram vantagem sobre os demais. No entanto, a maior diferença foi causada pela variação no método de lubri-refrigeração.

A presença de empastamento no rebolo causa adesão, atrito e deformações que não geram cavacos na superfície da peça durante o corte. Nesse sentido, o método convencional de inundação remove os cavacos gerados e reduz a temperatura na interface de corte, o que reduz significativamente a solda por pressão, e, assim, o empastamento, justificando seu desempenho superior nos testes. A técnica MQL tem grande dificuldade em remover os cavacos e não refrigera suficientemente a zona de corte, intensificando o empastamento. Portanto, o alto grau de empastamento gerado com o uso de MQL provoca uma dissipação significativa de energia no processo de retificação, fazendo com que ele consuma mais energia para o mesmo corte em comparação ao método convencional. No entanto, a limpeza do rebolo reduz o empastamento, mitigando seus efeitos e reduzindo a potência requerida. Além disso, quando a limpeza é resfriada, o empastamento é ainda mais atenuado, aproximando seu resultado de forma satisfatória ao método convencional.

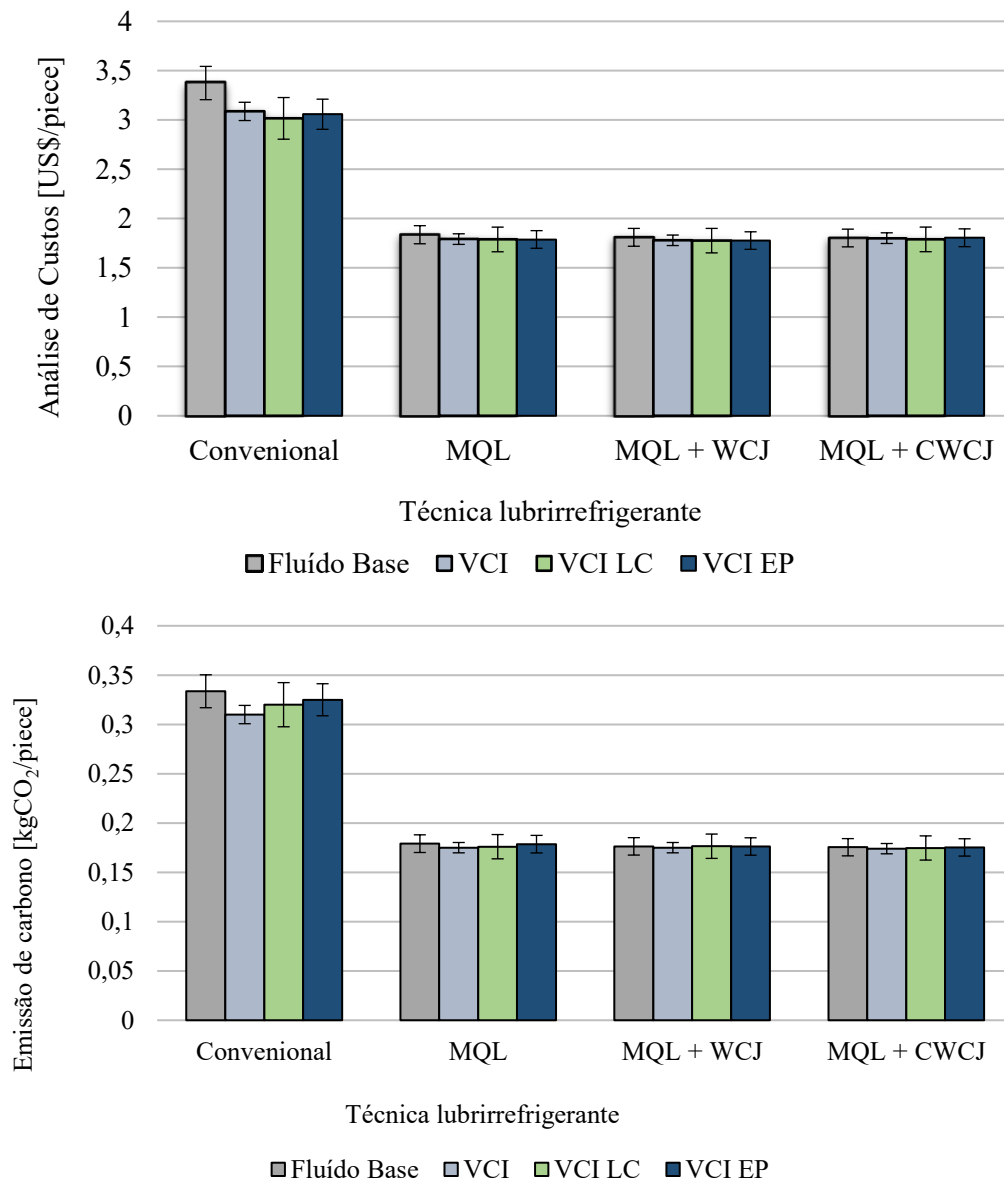
4.5. Análise de custo e poluição

O estudo conduzido por Oliveira et al., (2009) destaca a necessidade de uma análise aprofundada dos custos envolvidos no desenvolvimento e melhoria de processos industriais. No contexto específico do processo de retificação, é essencial considerar uma série de parâmetros, como os procedimentos de dressagem, a vida útil do rebolo e a taxa de avanço, entre outros. Nesse sentido, a Figura 18 exibe os resultados dos custos necessários para a implementação de diferentes técnicas de lubri-refrigeração utilizando aditivos anticorrosivos.

De forma geral, observa-se que o uso da técnica MQL (Minimum Quantity Lubrication) reduz os custos de implementação necessários em 44%. Em um estudo realizado por Oliveira et al., (2009), que analisou os custos associados à aplicação de MQL, os resultados positivos foram atribuídos ao menor volume de óleo utilizado. Isso resulta em despesas mais baixas para o descarte e a manutenção dos fluidos lubrificantes.

Ao examinar a influência dos fluidos VCI nos resultados, nota-se que eles não causam mudanças significativas. Essa baixa influência decorre da manutenção consistente do desempenho de cada técnica empregada. Esse padrão de comportamento também é refletido na análise de poluição, conforme mostrado na Figura 13, onde as vantagens decorrem da aplicação das técnicas em si, não sendo significativamente influenciadas pelos aditivos utilizados.

Figura 18: Custo e Poluição para cada condição de usinagem.



Fonte: Autor, 2024.

O aumento da velocidade de avanço na técnica MQL aumentou o custo por peça. Por outro lado, mesmo com o aumento da velocidade de avanço, o custo por peça ficou estável para a lubrificação convencional. Como o processo é mais rápido, há menos custos de energia, fluido de corte e mão de obra. No entanto, velocidades de avanço mais altas afetam os esforços

de corte e o desgaste do rebolo. No caso da condição MQL, as desvantagens de aumentar a velocidade de avanço foram maiores que os benefícios.

5. CONCLUSÕES

Este estudo investigou a retificação do aço endurecido AISI 4340, utilizando diferentes técnicas de lubri-refrigeração e variando os fluidos aplicados para entender a influência dos inibidores voláteis de corrosão (VCI) no processo. Portanto, com base nos resultados coletados e na análise do estudo, pode-se concluir que:

1) Para todos os parâmetros de saída analisados, exceto custos e poluição, o método convencional apresentou os melhores resultados, devido à sua capacidade de troca térmica e limpeza do rebolo.

(2) A adição do método MQL com o sistema CW CJ e VCI aproxima a rugosidade resultante daquela obtida pelo método convencional de lubri-refrigeração por inundação.

(3) O uso de VCI e VCI LC afeta negativamente a qualidade geométrica gerada no processo, aumentando o desvio de circularidade, enquanto o VCI EP o reduz em 11%.

(4) O uso de fluidos com inibidores voláteis de corrosão VCI, VCI LC e VCI EP não diferem significativamente na influência sobre o desgaste do rebolo. No entanto, reduzem o desgaste em 55%, em média, quando comparados ao fluido base.

(5) A potência de retificação depende mais da técnica de lubrificação do que do tipo de fluido utilizado.

(6) Os fluidos VCI não influenciam significativamente os níveis de emissão de carbono ou os custos de implementação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e estudos deste trabalho, pode-se estabelecer algumas sugestões para trabalhos futuros envolvendo a MQL na retificação de cerâmicas avançadas. Dentre as sugestões de trabalhos futuros, pode-se citar:

- Fazer uma espectroscopia Raman do rebolo de diamante antes e após a usinagem de alumina para verificar se houve grafitização do diamante durante a usinagem.
- Avaliar através de microscopia eletrônica de varredura a superfície de corte do rebolo, tendo como finalidade o entendimento dos mecanismos físicos de desgaste dos grãos

abrasivos, bem como entender a influência do empastamento do rebolo na retificação de cerâmicas avançadas.

- Acrescentar a técnica de limpeza do rebolo aliada ao MQL, visando um melhor desempenho do MQL em relação ao obtido no presente estudo.
- Realizar estudos de avaliação superficial da peça utilizando microscopia eletrônica de varredura, de modo a propiciar um melhor entendimento dos mecanismos de desgaste que ocorrem na superfície da cerâmica.
- Utilizar no MQL fluidos de corte com inibidores voláteis de corrosão para verificar se esse tipo de molécula anticorrosiva pode beneficiar o processo de retificação de cerâmicas avançadas.
- Investigar o comportamento da do processo ao utilizar diferentes diluições de fluidos de corte no MQL para averiguar se o aumento de água no processo auxilia na melhora da integridade superficial da peça retificada.

REFERÊNCIAS

ALBERDI, R. *et al.* Strategies for optimal use of fluids in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 51, n. 6, p. 491–499, 2011a.

ALBERDI, R. *et al.* Strategies for optimal use of fluids in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 51, n. 6, p. 491–499, 2011b. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695511000381>.

ANDERSON, D.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 204, n. 1–3, p. 269–278, 2008. Disponível em: Acesso em: 14 nov. 2022.

AURICH, J.C. *et al.* High-performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 357–362, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850608000784>.

ÁVILA, Benício Nacif *et al.* Grinding effect of thermoplastic mold steel using green manufacturing concepts combined with various conventional wheels. **International Journal**

of **Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 129, n. 5, p. 2443–2456, 2023. Disponível em: Acesso em: 26 fev. 2024.

BARMOUZ, Mohsen *et al.* Influence of bond thermal and mechanical properties on the additively manufactured grinding wheels performance: Mechanical, wear, surface integrity, and topography analysis. **Wear**, [s. l.], v. 538–539, p. 205215, 2024. Disponível em: Acesso em: 19 ago. 2024.

BASTIDAS, D.M.; CANO, E.; MORA, E.M. Volatile corrosion inhibitors: a review. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, [s. l.], v. 52, n. 2, p. 71–77, 2005.

BIANCHI, E. C. *et al.* Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado. **Cerâmica**, [s. l.], v. 57, n. 344, p. 431–437, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132011000400010&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 17 jan. 2020.

BIANCHI, E. C. *et al.* Limpeza da superfície de corte de rebolos por um sistema de ar comprimido na retificação cilíndrica externa de mergulho de materiais cerâmicos refrigerados com a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL). **Cerâmica**, [s. l.], 2012.

CAMERON, A; BAUER, R; WARKENTIN, A. An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 126–130, 2010.

CHOUDHARY, Amit; PAUL, S. The wear mechanisms of diamond grits in grinding of alumina and yttria-stabilized zirconia under different cooling-lubrication schemes. **Wear**, [s. l.], v. 454–455, p. 203315, 2020. Disponível em: Acesso em: 30 maio 2024.

DA SILVA, Andriago Elisiario *et al.* Grinding behavior of VP50IM steel using green and black silicon carbide compared to aluminum oxide wheel under different feed rates. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 117, n. 9–10, p. 2639–2653, 2021.

DE MARTINI FERNANDES, Lucas *et al.* Comparative analysis of two CBN grinding wheels performance in nodular cast iron plunge grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 98, n. 1–4, p. 237–249, 2018.

DE MARTINI FERNANDES, Lucas *et al.* Thermal model for surface grinding application. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 104, n. 5–8, p. 2783–2793, 2019.

DE MORAES, Douglas Lyra *et al.* Advances in precision manufacturing towards eco-friendly grinding process by applying MQL with cold air compared with cooled wheel cleaning jet. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 113, n. 11–12, p. 3329–3342, 2021a.

DE MORAES, Douglas Lyra *et al.* Advances in precision manufacturing towards eco-friendly grinding process by applying MQL with cold air compared with cooled wheel cleaning jet. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 113, n. 11–12, p. 3329–3342, 2021b. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-021-06713-3>.

DE MORAES, Douglas Lyra *et al.* Performance of SAE 52100 steel grinding using MQL technique with pure and diluted oil. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 105, n. 10, p. 4211–4223, 2019.

DE OLIVEIRA, D.; DA SILVA, R. B.; GELAMO, R. V. Influence of multilayer graphene platelet concentration dispersed in semi-synthetic oil on the grinding performance of Inconel 718 alloy under various machining conditions. **Wear**, [s. l.], v. 426–427, p. 1371–1383, 2019. Disponível em: Acesso em: 19 ago. 2024.

DEBNATH, Sujan; REDDY, Moola Mohan; YI, Qua Sok. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining : a review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 83, p. 33–47, 2014a.

DEBNATH, Sujan; REDDY, Moola Mohan; YI, Qua Sok. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 83, p. 33–47, 2014b.

DEMIRBAS, E.; KOBYA, M. Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 105, p. 79–90, 2017.

DHAR, N.R.; KAMRUZZAMAN, M; AHMED, Mahiuddin. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 172, n. 2, p. 299–304, 2006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013605008964>.

DINIZ, Anselmo Eduardo; DE OLIVEIRA, Adilson José. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 195, n. 1–3, p. 275–281, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013607005249>.

D.M., Bastidas; E., Cano; E.M., Mora. Volatile corrosion inhibitors: a review. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, [s. l.], v. 52, n. 2, p. 71–77, 2005.

DOMINGUES, Bruno Biondo *et al.* Eco-friendly thinking toward mitigating the greenhouse effect applied to the alumina grinding process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 124, n. 7–8, p. 2171 – 2183, 2023a.

DOMINGUES, Bruno Biondo *et al.* Eco-friendly thinking toward mitigating the greenhouse effect applied to the alumina grinding process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 124, n. 7–8, p. 2171 – 2183, 2023b. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85143500468&doi=10.1007%2fs00170-022-10598-1&partnerID=40&md5=f9d3a3f3823bb66415569edefa63b2c5>.

EMAMI, M.; SADEGHI, M. H.; SARHAN, Ahmed A.D. Investigating the effects of liquid atomization and delivery parameters of minimum quantity lubrication on the grinding process of Al₂O₃ engineering ceramics. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], 2013.

FIELD, M.; KEGG, R.; BUESCHER, S. Computerized Cost Analysis of Grinding Operations. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 233–237, 1980. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607613286>. Acesso em: 30 maio 2020.

FODOR, George E. **The Inhibition of Vapor-Phase Corrosion. A Review**. [S. l.]: SOUTHWEST RESEARCH INST SAN ANTONIO TXBELVOIR FUELS AND LUBRICANTS ..., 1985.

GENOVEZ, M. C. **New concept for metallic protection against corrosion: V-active VCI**. 2016. 139 f. [s. l.], 2016.

GENOVEZ, Mário Celso *et al.* New concept of corrosion protection in the presence of water: V-active VCI Concept and application. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, [s. l.], v. 62, n. 1, p. 53–58, 2015.

GUBA, Nikolai *et al.* Grinding burn limits: Generation of surface layer modification charts for discontinuous profile grinding with analogy trials. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [s. l.], v. 31, p. 99–107, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175558172030119X>.

HADAD, Mohammadjafar. An experimental investigation of the effects of machining parameters on environmentally friendly grinding process. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 108, p. 217–231, 2015.

HADAD, M.J. J. *et al.* Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 54–55, p. 10–17, 2012a.

HADAD, M.J. J. *et al.* Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and**

Manufacture, [s. l.], v. 54–55, p. 10–17, 2012b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.11.010>.

HADAD, Mohammadjafar; SADEGHI, Banafsheh. Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 63, p. 1–15, 2012.

HASSUI, A; DINIZ, A E. Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 43, n. 8, p. 855–862, 2003. Disponível em: <file:///C:/Users/Cláudio/AppData/Local/Mendeley>.

HERMAN, Daniela; KRZOS, Jan. Influence of vitrified bond structure on radial wear of cBN grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 209, n. 14, p. 5377–5386, 2009.

HEWSTONE, R. K. Health, safety and environmental aspects of used crankcase lubricating oils. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 156, n. 3, p. 255–268, 1994.

HOBSON, Taylor. **Exploring Surface Texture: A fundamental guide to the measurement of surface finish**. 7 ed.ed. [S. l.]: Taylor Hobson, 2011.

JACKSON, M. J. *et al.* Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 185, n. 1–3, p. 17–23, 2007. Disponível em: Acesso em: 14 nov. 2022.

JAVARONI, R. L. *et al.* Minimum quantity of lubrication (MQL) as an eco-friendly alternative to the cutting fluids in advanced ceramics grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 103, n. 5–8, p. 2809–2819, 2019a.

JAVARONI, R. L. *et al.* Minimum quantity of lubrication (MQL) as an eco-friendly alternative to the cutting fluids in advanced ceramics grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 103, n. 5–8, p. 2809–2819, 2019b. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-019-03697-z>. Acesso em: 4 fev. 2020.

KING, Robert I; HAHN, Robert S. **Handbook of modern grinding technology**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

KLOCKE, Fritz *et al.* Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 581–604, 2015. Disponível em: Acesso em: 3 jul. 2020.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing Processes 2**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009a.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing processes 2: grinding, honing, lapping**. 1. ed. [S. l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009b.

KLOCKE, F; BRINKSMEIER, E; WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 22–45, 2005.

KÖNIG, W; BERKTOLD, A; KOCH, K.-F. Turning versus Grinding – A Comparison of Surface Integrity Aspects and Attainable Accuracies. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 39–43, 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607623877>.

KOPAC, J; KRAJNIK, P. High-performance grinding-A review. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 175, n. 1–3, p. 278–284, 2006.

KRUSZYŃSKI, Bogdan W; WÓJCIK, Ryszard. Residual stress in grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 109, n. 3, p. 254–257, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013600008074>.

LAUER-SCHMALTZ, H.; KÖNIG, W. Prof Dr Ing. Phenomenon of Wheel Loading Mechanisms in Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 201–206, 1980.

LI, Z C *et al.* Experimental studies on grinding forces and force ratio of the unsteady-state grinding technique. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 129, n. 1, p. 76–80, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602005794>.

LI, Haogang *et al.* **Extreme pressure and antiwear additives for lubricant: academic insights and perspectives**. [S. l.]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022.

LI, Benkai *et al.* Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil. **Chinese Journal of Aeronautics**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 1084–1095, 2016.

LIANG, Xiaoliang *et al.* Friction behaviors in the metal cutting process: state of the art and future perspectives. **International Journal of Extreme Manufacturing**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 012002, 2023. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/2631-7990/ac9e27>.

LIN, B *et al.* Influence of grinding parameters on surface temperature and burn behaviors of grinding rail. **Tribology International**, [s. l.], v. 122, p. 151–162, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X18300987>.

LOPES, José Claudio *et al.* An experimental evaluation between pure and diluted MQL versus flood lubri-cooling focused on cost and environmental impact. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 129, n. 5, p. 2691–2705, 2023a. Disponível em: Acesso em: 26 fev. 2024.

LOPES, José Claudio *et al.* Application of a wheel cleaning system during grinding of alumina with minimum quantity lubrication. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 102, n. 1–4, p. 333–341, 2019a.

LOPES, J C *et al.* Application of minimum quantity lubrication with addition of water in the grinding of alumina. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 97, n. 5–8, p. 1951–1959, 2018.

LOPES, José Claudio *et al.* Effect of CBN grain friability in hardened steel plunge grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 103, n. 1–4, p. 1567–1577, 2019b.

LOPES, José Claudio *et al.* Grinding comparative analysis between different proportions of water-oil applied to MQL technique and industrial production cost towards a green manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], 2021a.

LOPES, José Claudio *et al.* Grinding comparative analysis between different proportions of water-oil applied to MQL technique and industrial production cost towards a green manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], 2021b.

LOPES, José Claudio *et al.* Grinding performance using variants of the MQL technique: MQL with cooled air and MQL simultaneous to the wheel cleaning jet. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 105, n. 10, p. 4429–4442, 2019c. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04574-5>.

LOPES, José Claudio *et al.* Reducing carbon footprint in grinding: exploring green manufacturing to mitigate CO₂ emission from cutting fluids. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 129, n. 11, p. 5691–5708, 2023b. Disponível em: Acesso em: 26 fev. 2024.

MACHADO, Álisson Rocha *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. [S. l.]: Editora Blucher, 2015.

MALKIN, S.; BITTER, J. E. Grinding mechanisms and strength degradation for ceramics. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, [s. l.], v. 111, n. 2, p. 167–174, 1989.

MALKIN, Stephen; GUO, Changsheng. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**. 2^aed. New York: Industrial Press Inc, 2008a.

MALKIN, Stephen; GUO, Changsheng. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**. 2^a eded. New York: Industrial Press Inc, 2008b.

MALKIN, Stephen; GUO, Changsheng. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**. 2^a eded. New York: Industrial Press Inc, 2008c.

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

MARINESCU, Ioan D. *et al.* **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. [S. l.]: CRC Press, 2016a.

MARINESCU, Ioan D. *et al.* **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. [S. l.]: CRC Press, 2016b. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781482206708>.

MARINESCU, Ioan D. *et al.* **Tribology of Abrasive Machining Processes**. 2 ed.ed. [S. l.]: Elsevier, 2013.

MORETTI, Guilherme Bressan *et al.* Eco-friendly grinding: exploring the potential of volatile corrosion inhibitors. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 134, n. 1, p. 795–809, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-024-14167-6>. Acesso em: 21 set. 2024.

NASKAR, Anirban; CHOUDHARY, Amit; PAUL, S. Wear mechanism in high-speed superabrasive grinding of titanium alloy and its effect on surface integrity. **Wear**, [s. l.], v. 462–463, p. 203475, 2020. Disponível em: Acesso em: 20 ago. 2024.

OLIVEIRA, Danilo de Jesus *et al.* Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 212, n. 12, p. 2559–2568, 2012a.

OLIVEIRA, Danilo de Jesus *et al.* Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning. **Journal of Materials Processing Technology**,

[s. l.], v. 212, n. 12, p. 2559–2568, 2012b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013612001744>.

OLIVEIRA, J F G *et al.* Industrial challenges in grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 2, p. 663–680, 2009.

PAPAY, A G. Antiwear and extreme-pressure additives in lubricants. **Lubrication Science**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 209–224, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/lc.3010100304>.

PUSAVEC, Franci *et al.* Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 18, n. 12, p. 1211–1221, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652610000260>. Acesso em: 30 maio 2020.

QIAN, Ning *et al.* Towards Sustainable Grinding of Difficult-to-Cut Alloys—A Holistic Review and Trends. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 23, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01002-y>.

RABIEI, F *et al.* Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 86, p. 447–460, 2015a.

RABIEI, F *et al.* Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 86, p. 447–460, 2015b. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614008683>.

RIBEIRO, Fernando *et al.* Applications of texturization techniques on cutting tools surfaces—a survey. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05669-0>.

RIBEIRO, Fernando Sabino Fontequ *et al.* Sustainable grinding: mitigating CO₂ emissions through MQL+WCJ technique in AISI VP50 steel processing. **International**

Journal of Advanced Manufacturing Technology, [s. l.], v. 129, n. 11, p. 5421–5433, 2023. Disponível em: Acesso em: 26 fev. 2024.

ROWE, W. Brian. **Principles of modern grinding technology**. 2. ed. [S. l.]: William Andrew, 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780323242714/principles-of-modern-grinding-technology>. Acesso em: 6 fev. 2025.

ROWE, W. Brian. **Principles of modern grinding technology**. 2. ed. United States: William Andrew, 2014.

RUZZI, Rodrigo de Souza *et al.* Study on grinding of inconel 625 and 718 alloys with cutting fluid enriched with multilayer graphene platelets. **Wear**, [s. l.], v. 476, p. 203697, 2021. Disponível em: Acesso em: 19 ago. 2024.

RUZZI, Rodrigo de Souza *et al.* Topographical analysis of machined surfaces after grinding with different cooling-lubrication techniques. **Tribology International**, [s. l.], v. 141, p. 105962, 2020.

SABERI, A. *et al.* Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 131, p. 728–738, 2016. Disponível em: Acesso em: 10 fev. 2020.

SADEGHI, M H *et al.* Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–6Al–4V titanium alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 44, n. 5–6, p. 487–500, 2009.

SAID, Zafar *et al.* A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 105, n. 5–6, p. 2057–2086, 2019.

SANCHEZ, J A *et al.* Machining evaluation of a hybrid MQL-CO2 grinding technology. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 18, n. 18, p. 1840–1849, 2010.

SATO, Bruno Kenta *et al.* Grinding performance of AISI D6 steel using CBN wheel vitrified and resinoid bonded. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 105, n. 5–6, p. 2167–2182, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04407-5>.

SATO, Bruno Kenta *et al.* Novel comparison concept between CBN and Al₂O₃ grinding process for eco-friendly production. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 330, n. September 2021, p. 129673, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621038506>.

SATO, B.K. *et al.* Toward sustainable grinding using minimum quantity lubrication technique with diluted oil and simultaneous wheel cleaning. **Tribology International**, [s. l.], v. 147, p. 106276, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X20301183>. Acesso em: 21 fev. 2020.

S.B., Valdez *et al.* Rapid method for corrosion protection determination of VCI films. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, [s. l.], v. 53, n. 6, p. 362–366, 2006.

SCHWARZ, Marián *et al.* Environmental and health aspects of metalworking fluid use. **Polish Journal of Environmental Studies**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 37–45, 2015.

SHARMA, Anuj Kumar; TIWARI, Arun Kumar; DIXIT, Amit Rai. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 127, p. 1–18, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616302293>.

SHAW, M C. **Principles of Abrasive Processing**. [S. l.]: Clarendon Press, 1996. (Oxford science publications). Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=f-FaL_ukM3EC.

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 and Manufacture**, [s. l.], v. 57, p. 83–101, 2012.

SILVA NETO, José Fernandes da. Estudo experimental da remoção, por jato de ar comprimido, de detritos na superfície de corte de rebolo diamantado durante a retificação da alumina refrigerada pela técnica MQL. **94 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia.**, [s. l.], 2012.

SINHA, Manoj Kumar *et al.* Hybrid approach for modelling and optimizing MQL grinding of Inconel 625 with machine learning and MCDM techniques. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01738-w>.

SKINNER, William. A new method for quantitative evaluation of volatile corrosion inhibitors. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 1491–1494, 1993.

SOKOVIĆ, M.; MIJANOVIĆ, K. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 109, n. 1–2, p. 181–189, 2001. Disponível em: Acesso em: 18 dez. 2019.

SONG, Yu-Xiang *et al.* Nanobiolubricant grinding: a comprehensive review. **Advances in Manufacturing**, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40436-023-00477-7>.

TALON, Anthony Gaspar *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**, [s. l.], v. 104, n. 1–4, p. 1437–1448, 2019a.

TALON, Anthony Gaspar *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**, [s. l.], v. 104, n. 1–4, p. 1437–1448, 2019b. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-019-04005-5>.

TALON, Anthony Gaspar *et al.* Green manufacturing concept applied to the grinding process of advanced ceramics using an alternative lubri-refrigeration technique. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 123, n. 7, p. 2771–2782, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10385-y>.

TALON, Anthony Gaspar *et al.* Grinding performance of hardened steel: a study about the application of different cutting fluids with corrosion inhibitor. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 108, n. 9–10, p. 2741–2754, 2020a.

TALON, Anthony Gaspar *et al.* Grinding performance of hardened steel: a study about the application of different cutting fluids with corrosion inhibitor. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 108, n. 9–10, p. 2741–2754, 2020b. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-020-05598-y>. Acesso em: 12 jun. 2020.

UMEDA, Yasushi *et al.* Toward integrated product and process life cycle planning—An environmental perspective. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 61, n. 2, p. 681–702, 2012. Disponível em: Acesso em: 14 nov. 2022.

VOROBYOVA, Viktoria; SKIBA, Margarita; CHYGYRYNETS', Olena. A novel eco-friendly vapor phase corrosion inhibitor of mild steel. **Pigment and Resin Technology**, [s. l.], v. 48, n. 2, p. 137–147, 2019.

WALKER, Tim. **ML Handbook**. [S. l.]: Unist company, 2013. v. 1

WEBSTER, J.; TRICARD, M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 53, n. 2, p. 597–617, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607600316>. Acesso em: 16 jan. 2020.

WINTER, Marius *et al.* Life cycle assessment of cubic boron nitride grinding wheels. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 107, p. 707–721, 2015.

WINTER, Marius; HERRMANN, Christoph. Eco-efficiency of Alternative and Conventional Cutting Fluids in External Cylindrical Grinding. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 15, p. 68–73, 2014.

XI, Xinxin *et al.* Grindability evaluation and tool wear during grinding of Ti2AlNb intermetallics. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 94, n. 1, p. 1441–1450, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1005-7>.

XU, Wenhao *et al.* Electrostatic atomization minimum quantity lubrication machining: from mechanism to application. **International Journal of Extreme Manufacturing**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 042003, 2022. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/2631-7990/ac9652>.

XUE, Yunpeng; ARJOMANDI, Maziar; KELSO, Richard. The working principle of a vortex tube. **International Journal of Refrigeration**, [s. l.], v. 36, n. 6, p. 1730–1740, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700713001059>.

YANG, Min *et al.* Temperature field model in surface grinding: a comparative assessment. **International Journal of Extreme Manufacturing**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 042011, 2023. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/2631-7990/acf4d4>.

ZENG, Xu *et al.* Research on the consistency model of roundness error in journal cylindrical grinding with random parameters. **Precision Engineering**, [s. l.], v. 82, 2023.

ZHU, Yejun *et al.* Effect of grinding wheel speed on self-sharpening ability of PCBN grain during grinding of nickel-based superalloys with a constant undeformed chip thickness. **Wear**, [s. l.], v. 426–427, p. 1573–1583, 2019. Disponível em: Acesso em: 19 ago. 2024.