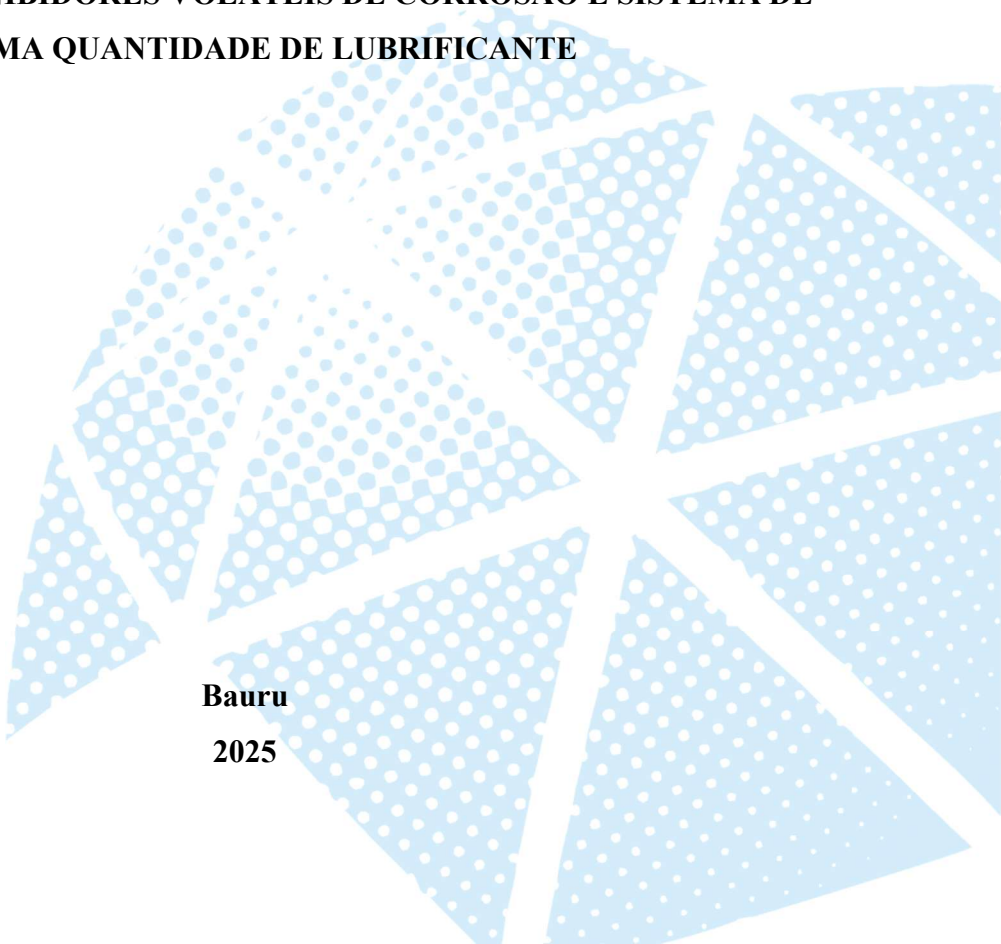


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Engenharia – Campus de Bauru

GUILHERME BRESSAN MORETTI

**AVANÇOS SUSTENTÁVEIS NA RETIFICAÇÃO: REDUÇÃO DO IMPACTO
AMBIENTAL COM INIBIDORES VOLÁTEIS DE CORROSÃO E SISTEMA DE
MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE**

Bauru
2025



GUILHERME BRESSAN MORETTI

**AVANÇOS SUSTENTÁVEIS NA RETIFICAÇÃO: REDUÇÃO DE IMPACTO
AMBIENTAL COM INIBIDORES VOLÁTEIS DE CORROSÃO E SISTEMA DE
MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia mecânica.

Área de Concentração: Processos de fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Claudio Lopes

BAURU

2025

Moretti, Guilherme Bressan

Avanços sustentáveis na retificação: redução do impacto ambiental com inibidores voláteis de corrosão e sistema de mínima quantidade de lubrificante / Guilherme Bressan Moretti. -- Bauru, 2025

98 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: José Claudio Lopes

1. Engenharia mecânica. 2. Processos de fabricação. 3. Retificação. 4. Fluidos de corte. 5. Inibidores voláteis de corrosão. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE GUILHERME BRESSAN MORETTI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 16 de setembro de 2025, às 14h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de GUILHERME BRESSAN MORETTI, intitulada **AVANÇOS SUSTENTÁVEIS NA RETIFICAÇÃO: REDUÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL COM INIBIDORES VOLÁTEIS DE CORROSÃO E SISTEMA DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE**. 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.^a Dr.^a MILLA CAROLINE GOMES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais / Universidade Estadual de Campinas, Prof. RAFAEL LIBERATTI IAVARONE (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Câmpus de Bauru, 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.

Documento assinado digitalmente
 JOSE CLAUDIO LOPES
Data: 29/10/2025 16:38:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES

Dedico este trabalho aos meus pais, Cláudia e Sandro, e aos meus irmãos, Luca e Rafaela, por sempre estarem ao meu lado quando precisei, podendo contar com eles cegamente. Ademais, agradeço a todos os envolvidos, direta ou indiretamente, com o Laboratório de Usinagem e Abrasão.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Cláudia e ao meu pai Sandro, por todo o apoio a mim e à nossa família, mesmo nos momentos mais difíceis. Sou grato por toda a dedicação e esforço em criar um ambiente acolhedor e repleto de carinho, no qual pudéssemos nos desenvolver livremente. Obrigado pelos ensinamentos sobre o que é certo e errado, e como as coisas devem ser feitas, sendo meus maiores exemplos do que é ser um ser humano ético e responsável.

Ao meu irmão Luca e à minha irmã Rafaela, por estarem sempre ao meu lado, ajudando-me mesmo sem perceber.

À minha avó Alice e ao meu avô Ademar, pelo carinho e incentivo aos meus estudos.

Ao meu namorado Matheus, por sempre me apoiar em minhas decisões, estando ao meu lado mesmo quando não sei por onde seguir.

Ao meu amigo Lucas, pela amizade e apoio durante a graduação.

Ao meu orientador, Professor Dr. José Claudio Lopes, pela oportunidade de participar de um projeto tão único como o Laboratório de Usinagem e Abrasão (LUA). Além disso, pela amizade, suporte e valiosos conselhos ao longo desses anos.

Ao Professor Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pela oportunidade de fazer parte do Laboratório de Usinagem e Abrasão (LUA) e pelos conhecimentos transmitidos.

Aos demais integrantes do Laboratório de Usinagem e Abrasão (LUA), por todo o conhecimento compartilhado e por contribuírem para o meu desenvolvimento profissional.

À Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB/UNESP), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade concedida.

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

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

*Não há final real. Há apenas o lugar onde você
para a história.*

(Frank Herbert)

RESUMO

Diante das crescentes pressões por sustentabilidade, a indústria tem buscado adotar processos mais eficientes e ecologicamente corretos. Neste contexto, destacam-se os fluidos de corte com a tecnologia de inibidores voláteis de corrosão (*V-active® VCI*), biodegradáveis e seguros, que possuem potencial para simplificar etapas produtivas e reduzir impactos ambientais. O presente trabalho avaliou a aplicação desses fluidos inovadores em conjunto com a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido, utilizando um rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3). Foram testados três fluidos, um base e dois com tecnologia VCI (VCI; VCI+EP), sob diferentes condições de lubrificação, incluindo o método com fluido em abundância e as técnicas de MQL e MQL auxiliado por sistema de limpeza do rebolo (WCJ), mantendo-se constantes os demais parâmetros de usinagem. Os parâmetros analisados abrangeram rugosidade superficial (R_a), erro de circularidade, desgaste diametral do rebolo, potência de corte, emissão acústica, custo por peça e poluição ambiental. Os resultados demonstraram desempenho superior dos fluidos com VCI na maioria dos parâmetros, com destaque para a combinação MQL+limpeza com fluido VCI+EP, que otimizou o acabamento superficial, a precisão geométrica e a vida da ferramenta, além de reduzir o impacto ambiental em cerca de 89,3% em relação ao convencionalmente utilizado. Por outro lado, o fluido contendo apenas VCI demonstrou rugosidade superficial 130,3% inferior que o fluido base, beneficiando-se da capacidade de adaptar a lubrificação conforme a severidade do processo devido à sua polimerização. Essa característica também resultou em redução de 27,1% na emissão acústica e 94,3% menos desgaste em comparação com o fluido convencional. Entretanto, a ausência do aditivo extrema pressão (EP) afetou significativamente a circularidade das peças. Com isso, mostra-se que a técnica de MQL+limpeza auxiliada pelas tecnologias do VCI+EP representa um avanço promissor para a sustentabilidade e competitividade industrial, enquanto o VCI puro mostra vantagens específicas em acabamento superficial e redução de desgaste, embora com limitações geométricas.

Palavras-chave: Processo de retificação. Aço temperado. Fluido de corte. Inibidores Voláteis de Corrosão. Mínima quantidade de lubrificante. Jato de limpeza do rebolo. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Faced with growing sustainability pressures, industry has been seeking to adopt more efficient and environmentally friendly processes. In this context, cutting fluids with volatile corrosion inhibitor technology (V-active® VCI) stand out – they are biodegradable, safe, and have the potential to simplify production steps and reduce environmental impacts. This work evaluated the application of these innovative fluids combined with the Minimum Quantity Lubrication (MQL) technique in the plunge cylindrical grinding process of hardened and tempered ABNT 4340 steel, using an aluminum oxide (Al_2O_3) grinding wheel. Three fluids were tested, one base and two with VCI technology (VCI; VCI+EP), under different lubrication-cooling conditions, including the flood method, MQL, and MQL assisted by a wheel cleaning jet (WCJ) system, while keeping all other machining parameters constant. The analyzed parameters included surface roughness (R_a), roundness error, diametrical wheel wear, cutting power, acoustic emission, cost per part, and environmental pollution. The results showed superior performance of VCI fluids for most parameters, particularly the MQL+WCJ with VCI+EP combination, which optimized surface finish, geometric precision, and tool life, while reducing environmental impact by approximately 89.3% compared to the conventional method. On the other hand, the fluid containing only VCI demonstrated 130.3% better surface roughness than the base fluid, benefiting from its ability to adapt lubrication according to process severity due to its polymerization. This characteristic also led to a 27.1% reduction in acoustic emission and 94.3% less wear compared to the conventional fluid. However, the absence of the extreme pressure (EP) additive significantly affected workpiece circularity. Thus, the MQL+WCJ technique assisted by VCI+EP technology represents a promising advance for industrial sustainability and competitiveness, while pure VCI shows specific advantages in surface finish and wear reduction, albeit with geometric limitations.

Keywords: Grinding process. Hardened steel. Cutting fluid. Volatile Corrosion Inhibitors. Minimal Quantity Lubricant. Wheel cleaning jet. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Custo dos sistemas de lubrificação na usinagem em função da sustentabilidade.	18
Figura 2 – Representação da montagem do bocal de limpeza do rebolo (WCJ).....	20
Figura 3 – Interface de corte no processo de retificação.	23
Figura 4 – Custos acumulados para a fabricação de um produto e seu valor.....	23
Figura 5 – Representação do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.....	25
Figura 6 – Representação do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho.....	26
Figura 7 – Cinemática do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.....	27
Figura 8 – Efeito do aumento da velocidade de corte: a) sob taxa de remoção de material constante e b) sob taxa de remoção de material crescente.	28
Figura 9 – Estágios de formação do cavaco.	34
Figura 10 – Tipos de estruturas básicas de rebolos.	36
Figura 11 – Dureza e condutividade térmica de abrasivo convencionais e superabrasivos. ...	37
Figura 12 – Classificação dos fluidos de corte.....	39
Figura 13 – Aplicação do sistema de limpeza do rebolo (WCJ).	47
Figura 14 – Erro de circularidade conforme o método de círculos de mínimos quadrados (LSC).	50
Figura 15 – Dimensões do corpo de prova (em milímetros).	56
Figura 16 – Representação da montagem do bocal para o sistema do método convencional.	58
Figura 17 – Representação da montagem do bocal para o sistema de MQL.....	59
Figura 18 – Representação da montagem do bocal de limpeza do rebolo (WCJ).....	60
Figura 19 – Matriz de ensaios.....	62
Figura 20 – Desgaste do rebolo e método de impressão de sua superfície.	65
Figura 21 – Rugosidade superficial para diferentes condições de usinagem.	69
Figura 22 – Desvio de circularidade para diferentes condições de usinagem.	71
Figura 23 – Desgaste diametral do rebolo para diferentes cenários de usinagem.....	73
Figura 24 – Potência consumida para diferentes cenários de usinagem.....	74
Figura 25 – Emissão acústica para diferentes cenários de usinagem.	75
Figura 26 – Custo por peça para diferentes cenários de usinagem.....	77
Figura 27 – Poluição para diferentes cenários de lubrificação.	78
Figura 28 – Resultados comparativos entre os diferentes fluidos de corte, a) para o método convencional, b) para o sistema de MQL e c) para o sistema de MQL+limpeza.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos fluidos de corte.	41
Tabela 2 – Composição química e variações permissíveis do aço ABNT 4340.	48
Tabela 3 – Composição química do aço ABNT 4340.	56
Tabela 4 – Dureza média dos corpos de prova – antes e depois dos tratamentos térmicos. ...	57
Tabela 5 – Propriedades dos fluidos de corte.	58
Tabela 6 – Parâmetros de entrada do processo de usinagem.....	61
Tabela 7 – Parâmetros para os cálculos de custo e poluição	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/D	Analógico-Digital
CNC	Comando Numérico Computadorizado
EA	Emissão Acústica
EP	<i>Extreme Pressure</i> (Aditivo de Extrema Pressão)
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental)
FEB	Faculdade de Engenharia de Bauru
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência de Energia Internacional)
LUA	Laboratório de Usinagem por Abrasão
MQL	<i>Minimum Quantity Lubrication</i> (Mínima Quantidade de Lubrificante)
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Valor Quadrático Médio)
UNESP	Universidade Estadual Paulista
VCI	<i>Volatile Corrosion Inhibitor</i> (Inibidor Volátil de Corrosão)
WCJ	<i>Wheel Cleaning Jet</i> (Jato de Limpeza do Rebolo)
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> (Organização Mundial de Meteorologia)

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em graus Celsius	($^{\circ}\text{C}$)
A	Área média no topo dos grãos abrasivos	(mm^2)
A/D	Analógico/Digital	(-)
a_d	Profundidade de dressagem	(μm)
a_e	Profundidade real de corte	(μm)
Al_2O_3	Óxido de alumínio	(-)
a_p	Profundidade de corte	(μm)
b	Largura do rebolo	(mm)
C	Carbono	(-)
CBN	Nitreto de boro cúbico	(-)
c_d	Profundidade radial de corte	(μm)
CO_2	Dióxido de Carbono	(-)
CH_4	Metano	(-)
Cr	Cromo	(-)
d_e	Diâmetro equivalente	(mm)
d_s	Diâmetro do rebolo	(mm)
d_w	Diâmetro da peça	(mm)
ec	Energia específica	(J/mm^3)
F_a	Força axial	(N)
F_n	Força normal	(N)
F_t	Força tangencial	(N)
G	Relação G	(-)
gf	Gramma-força	(gf)
h_{eq}	Espessura equivalente de corte	(μm)
HV	Dureza Vickers	(HV)
HRC	Dureza Rockwell C	(HRC)
K	Força de corte unitária	(N)
kgf	Quilograma-força	(kgf)
l/min	Vazão volumétrica de fluido	(l/min)
l_c	Comprimento de contato	(μm)
m	Metro	(m)
m/s	Velocidade linear	(m/s)

m^3/min	Vazão volumétrica de ar	(m^3/min)
ml/h	Vazão volumétrica	(ml/h)
mm	Comprimento	(mm)
mm/min	Velocidade linear	(mm/min)
Mn	Manganês	$(-)$
Mo	Molibdênio	$(-)$
MPa	Pressão	(MPa)
N_2O	Óxido Nitroso	$(-)$
Ni	Níquel	$(-)$
n_s	Rotação do rebolo	(rpm)
n_w	Rotação da peça	(rpm)
P	Potência de corte	(W)
p	Pressão unitária	(N/mm^2)
P.A.	Grau de pureza (para análise)	$(-)$
Q'_w	Taxa específica de remoção de material no tempo	$(\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s})$
Q_w	Taxa de remoção de material no tempo	(mm^3/s)
Ra	Rugosidade média aritmética	(μm)
RMS	Valor quadrático médio	$(-)$
Si	Silício	$(-)$
SiC	Carbeto de silício	$(-)$
t_{so}	Tempo de centelhamento	(s)
v_c	Velocidade de corte	(m/s)
v_f	Velocidade de avanço do rebolo	(mm/min)
v_s	Velocidade tangencial do rebolo ou de corte	(m/s)
v_w	Velocidade periférica da peça	(m/s)
Z_s	Volume de rebolo gasto	(mm^3)
Z_w	Volume de material removido	(mm^3)

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivo geral.....	21
1.2. Objetivos específicos.....	21
2. REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1. Retificação	22
2.2. Retificação cilíndrica externa de mergulho	24
2.3. Parâmetros de corte na retificação cilíndrica externa de mergulho.....	27
2.3.1. Velocidade de corte (v_s).....	28
2.3.2. Velocidade periférica da peça (v_w).....	29
2.3.3. Velocidade de avanço ou de mergulho (v_f).....	29
2.3.4. Profundidade de corte (a_p)	30
2.3.5. Comprimento de contato (l_c) e diâmetro equivalente (d_e).....	31
2.3.6. Taxa de remoção do material (Q_w)	32
2.3.7. Espessura equivalente de corte (h_{eq})	33
2.4. Mecanismo de formação do cavaco.....	34
2.5. Rebolos.....	35
2.6. Fluidos de corte.....	38
2.6.1. Histórico	39
2.6.2. Classificação	39
2.6.3. Aditivos	42
2.6.4. Inibidores voláteis de corrosão	42
2.6.5. Métodos de aplicação dos fluidos de corte	44
2.6.6. Alternativas ao método convencional de lubrificação.....	45
2.7. Aço ABNT 4340	47
2.8. Variáveis de saída do processo de retificação	48
2.8.1. Rugosidade	48
2.8.2. Circularidade	49
2.8.3. Desgaste diametral do rebolo	51
2.8.4. Potência elétrica consumida	52
2.8.5. Emissão acústica	53
2.8.6. Custo e poluição	53

3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.1.	Equipamentos e materiais.....	55
3.1.1.	<i>Retificadora</i>	55
3.1.2.	<i>Rebolo</i>	55
3.1.3.	<i>Dressagem</i>	55
3.1.4.	<i>Corpos de prova</i>	56
3.2.	Sistemas de lubrificação.....	57
3.2.1.	<i>Fluidos de corte.....</i>	57
3.2.2.	<i>Sistema de lubrificação convencional.....</i>	58
3.2.3.	<i>Sistema de mínima quantidade de lubrificante.....</i>	59
3.2.4.	<i>Sistema de mínima quantidade de lubrificante com limpeza</i>	60
3.3.	Procedimento de ensaio e parâmetro de entrada	60
3.4.	Variáveis de saída e coleta de dados	63
3.4.1.	<i>Rugosidade superficial</i>	63
3.4.2.	<i>Circularidade</i>	63
3.4.3.	<i>Desgaste diametral do rebolo</i>	64
3.4.4.	<i>Potência consumida.....</i>	65
3.4.5.	<i>Emissão acústica</i>	66
3.4.6.	<i>Custo e Poluição.....</i>	66
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1.	Rugosidade superficial	68
4.2.	Desvio de circularidade	70
4.3.	Desgaste diametral do rebolo	72
4.4.	Potência consumida	74
4.5.	Emissão acústica	75
4.6.	Custo e poluição	76
4.7.	Visão geral.....	79
5.	CONCLUSÕES.....	82
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICES	97

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história da Terra, o clima passou por diversas variações naturais. No entanto, nas últimas décadas, a ação humana tem causado alterações climáticas significativas em um curto espaço de tempo. A queima contínua de combustíveis fósseis e as mudanças no uso do solo resultaram na elevação da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, provocando o aquecimento global (Chapman, 2007; Thornton et al., 2014).

Entretanto, os gases de efeito estufa não estão relacionados apenas ao aumento da temperatura média do planeta. As altas concentrações de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) causam um desequilíbrio climático, que leva ao aumento da frequência de eventos extremos, como ondas de calor, enchentes e secas (Maucieri et al., 2017; Thornton et al., 2014). Esses fenômenos, além de impactarem os sistemas naturais, afetam diretamente as populações humanas, agravando problemas socioeconômicos e comprometendo a vida de bilhões de pessoas (Adom, 2024; Chapman, 2007).

Desde o final da década de 80, organizações internacionais, como a WMO (*World Meteorological Organization*), já reuniam pesquisadores de todo o mundo para discutir o impacto das atividades humanas sobre o clima global (Barnett, 2003). Entretanto, foi apenas em 1992, com a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, ou ECO-92, realizada na cidade do Rio de Janeiro, que a sociedade política internacional reconheceu formalmente as mudanças climáticas e estabeleceu conceitos e compromissos para o desenvolvimento sustentável (Kranz et al., 2022; Lago; Rio, 2006).

Por conta dessas pressões políticas, pesquisadores ao redor do globo direcionaram seus estudos para compreender como o impacto humano afeta o meio ambiente e de que forma ele pode ser atenuado. Assim, setores como transporte, energia e manufatura passaram a ser analisados quanto à sua contribuição para as mudanças climáticas (Adom, 2024).

Entretanto, mesmo após três décadas de incentivo global por mudanças nessas áreas, o cenário atual ainda é preocupante. Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2025), o consumo global de energia elétrica aumentou 4,3% entre 2023 e 2024, sendo que 40% desse crescimento foi impulsionado exclusivamente pelo setor industrial. Ainda assim, cerca de 60% da energia gerada mundialmente continua sendo proveniente da queima de combustíveis fósseis, o que resultou em um pico de emissões de CO₂ na atmosfera, atingindo 37,8 gigatoneladas (“Global Energy Review 2025 – Analysis - IEA”, [S.d.]).

Nesse cenário de rever os métodos de produção e o impacto da indústria, destaca-se a retificação. Presente, direta ou indiretamente, na fabricação de cerca de 80% dos produtos da

sociedade moderna, esse processo responde por aproximadamente 20% a 25% dos custos globais de manufatura, destacando-se por sua capacidade de proporcionar excelente acabamento superficial e elevada precisão geométrica (Malkin; Guo, 2008). Por essas qualidades, é amplamente aplicada nas etapas intermediárias ou finais da cadeia produtiva, especialmente em componentes que exigem rigorosos padrões dimensionais (Bianchi et al., 2013a).

A retificação é classificada como um processo de usinagem abrasivo, no qual uma ferramenta, denominada rebolo, composta por inúmeros grãos de elevada dureza atrita contra a superfície da peça, removendo material. Além dos grãos abrasivos, o rebolo é constituído por um ligante — responsável por manter a coesão da ferramenta — e por poros, que têm a função de transportar o fluido lubrificante até a zona de corte e facilitar a remoção dos cavacos (Malkin; Guo, 2008; Rowe, 2013).

Por conta da ferramenta não apresentar uma geometria definida, diversos grãos entram em contato simultaneamente com a peça durante a usinagem, podendo ou não efetuar o corte. Como consequência, parte da energia do processo é dissipada em ações que não resultam em cisalhamento do material, sendo transformada, principalmente, em calor (Ribeiro et al., 2020a; Rowe, 2013). Esse calor eleva a temperatura na zona de corte, podendo provocar efeitos adversos à usinagem, como queima superficial, microtrincas, tensões residuais e alterações microestruturais, que comprometem a qualidade e a confiabilidade da peça usinada (Javaroni et al., 2020a; Malkin; Guo, 2007). Desse modo, controlar a temperatura durante o processo de usinagem é de grande interesse da indústria, já que isso minimiza custos de retrabalho (Field; Kegg; Buescher, 1980).

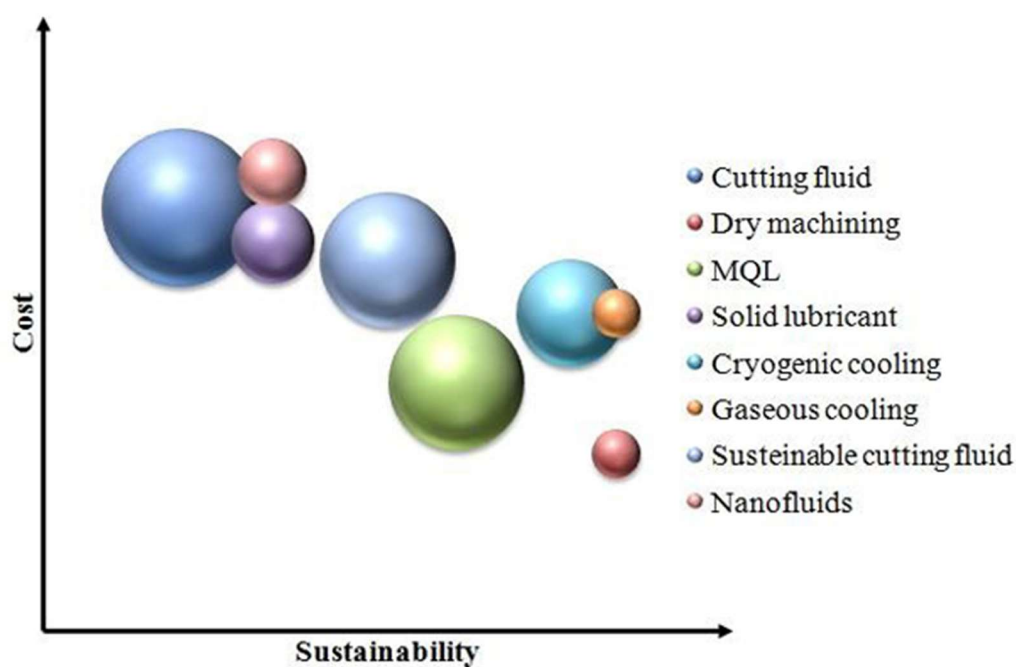
A alternativa mais adotada para o controle da temperatura é através do uso de fluidos de corte durante a usinagem. O método mais convencional é a aplicação por meio de um bocal, posicionado próximo à peça, que despeja uma emulsão de fluido e água sobre a zona de corte, promovendo lubrificação, resfriamento e limpeza (Barros et al., 2014; Talon et al., 2020). Além disso, os fluidos de corte podem conter outras substâncias, denominadas de aditivos. Estes aditivos possuem a capacidade de modificar o comportamento da emulsão, conferindo a ela uma melhora de suas funções básicas, ou novas características (Bastidas; Cano; Mora, 2005).

No entanto, a aplicação desse tipo de fluido de corte é controversa, especialmente em grandes quantidades, como no método convencional. Os fluidos contêm vários formaldeídos, alcanolaminas e materiais orgânicos voláteis, que são extremamente tóxicos para a fauna e a flora (Sato et al., 2022b; Soković; Mijanović, 2001). Além disso, sua produção libera quantidades significativas de CO₂ na atmosfera. De acordo com Said et al. (2019), em 2016,

cerca de 2.300 Mt de CO₂ foram expelidos pelo uso de combustíveis fósseis na produção de fluidos de corte.

Fang et al. (2011) adicionam outro ponto importante à esta discussão. Em sua pesquisa, ficou determinado que apenas 15% da energia consumida em um processo de usinagem é usada no corte do material, o restante é consumido por sistemas auxiliares do processo, como bombas para fluido de corte, sistemas de recirculação e armazenamento. Sabendo que em 2017, o setor industrial consumiu aproximadamente 32 bilhões de MJ, mais de 13600 Mt de CO₂ foram emitidos para manter apenas os sistemas do método convencional de lubrificação (Duflou et al., 2012; Sun; Li, 2014). Esses números se tornam mais alarmantes quando, de acordo com a *International Energy Agency* (IEA), o consumo de energia projetado para 2030 é de 26 trilhões de MJ, levando a um aumento significativo nas emissões de dióxido de carbono (“Global Energy Review 2025 – Analysis - IEA”, [S.d.]; Sato et al., 2022b).

Figura 1 – Custo dos sistemas de lubrificação na usinagem em função da sustentabilidade.



Fonte: Benedicto; Carou; Rubio (2017)

Outro fator importante é a relação entre os fluidos de corte e os operadores de máquinas. Em um estudo realizado por Hewstone (1994), constatou-se que os funcionários em constante contato com esses fluidos são mais propensos a desenvolver problemas de pele, como dermatite, e problemas respiratórios devido à inalação de vapores gerados durante a usinagem; e em casos mais extremos, podendo levar ao desenvolvimento de câncer. Estas implicações à

saúde dos trabalhadores refletem-se diretamente nos custos operacionais das empresas, seja pela necessidade de pagamento de adicionais por insalubridade, seja pelo aumento dos encargos com assistência médica, afastamentos e eventuais indenizações (Bennett, 1983; Sato et al., 2022b).

Portanto, é de extremo interesse para o setor e para a sociedade em geral minimizar o uso de fluidos de corte, devido aos altos custos e ao seu impacto ambiental negativo. É nesse contexto que surgem métodos alternativos à abordagem convencional, sendo os mais promissores os fluidos criogênicos, os nanofluidos e, principalmente, os sistemas de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) (Garcia et al., 2020; Jawahir et al., 2016).

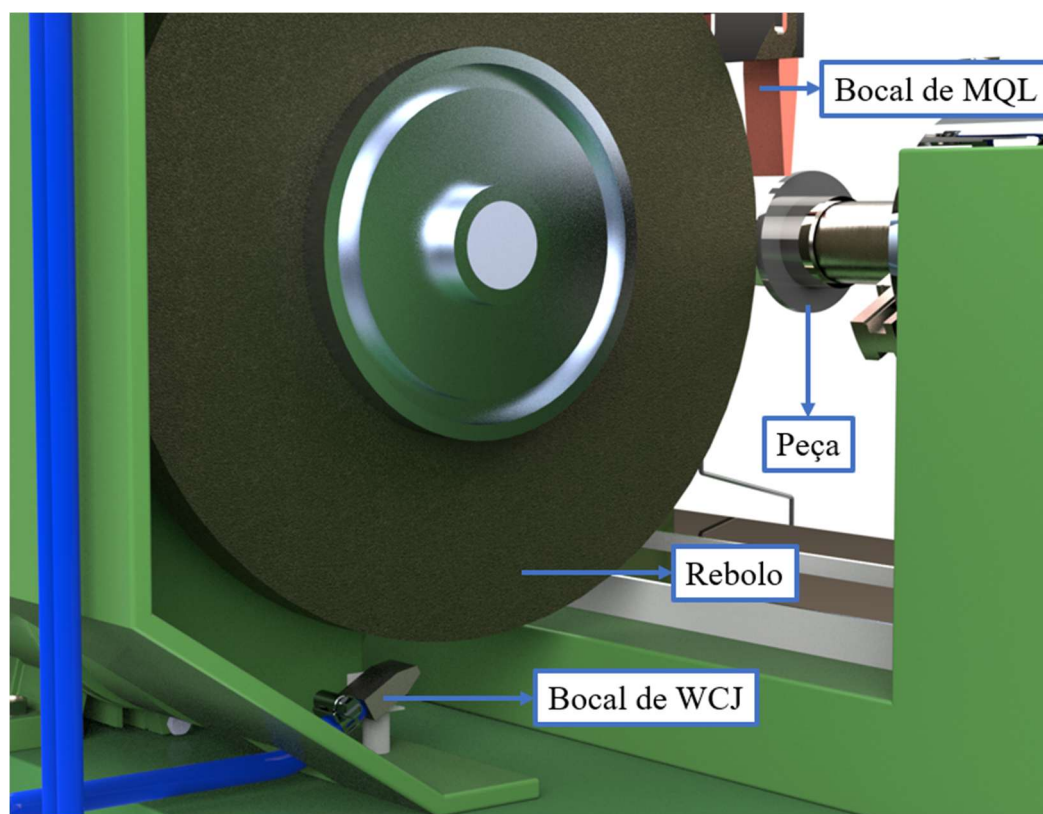
Enquanto no método convencional de fluido em abundância o consumo de óleo de corte pode variar de 1,8 a 30,6 l/h, no método MQL esse consumo fica em torno de 30 a 200 ml/h, representando uma redução média de 94% (Brinksmeier et al., 2015; Silva et al., 2020). Essa redução é possível porque, em vez do fluido ser despejado sobre a peça, como no método convencional, no MQL ele é misturado com ar comprimido no bocal de aplicação e pulverizado sob alta pressão contra a zona de corte, lubrificando-a (Javaroni et al., 2020b).

Embora a técnica de MQL proporcione uma excelente lubrificação, ela ainda tem dificuldades para controlar a temperatura durante a usinagem, isso porque a baixa vazão de fluido limita a capacidade de remoção de calor da zona de corte (Bianchi et al., 2013b; Dambatta et al., 2023). Da Silva et al. (2020) atribuem os resultados inferiores obtidos pelo sistema de MQL, na retificação de ferro dúctil austemperado, ao empastamento do rebolo, que é o preenchimento dos poros da ferramenta, impedindo a remoção eficiente de cavacos da zona de corte, afetando o acabamento da superfície e a circularidade da peça.

O efeito do empastamento está intimamente relacionado às altas temperaturas na interface de contato ferramenta-peça, pois o calor aumenta a ductilidade do material, facilitando a adesão dos cavacos aos poros. Em casos mais graves, os cavacos acabam por recobrir os grãos abrasivos, aumentando o atrito e as forças de corte, elevando ainda mais a temperatura (Garcia et al., 2020).

A fim de minimizar esse problema, um sistema auxiliar ao MQL foi desenvolvido, denominado de *Wheel Cleaning Jet* (WCJ), ou jato de limpeza do rebolo, em português. Nessa técnica, um bocal de ar comprimido adicional é posicionado próximo à superfície do rebolo, como mostrado na Fig. 2, soprando ar comprimido contra a ferramenta e exercendo força para desalojar os cavacos presos nos poros, reduzindo os efeitos de empastamento da ferramenta (Javaroni et al., 2020b). Rodriguez et al. (2019) avaliaram o desempenho do sistema de limpeza para diferentes vazões de MQL, obtendo resultados de acabamento superficial e erro de circularidade muito próximos aos do método convencional, isto é, com fluido em abundância.

Figura 2 – Representação da montagem do bocal de limpeza do rebolo (WCJ).



Fonte: Autor, 2025

Em resumo, técnicas alternativas e mais sustentáveis ao método convencional têm ganhado gradualmente mais destaque no setor industrial ao longo dos anos. Por isso, há uma necessidade crescente de expandir o conhecimento sobre o desempenho desses métodos em vários cenários de usinagem, ferramentas e materiais.

Nesse contexto, destaca-se o aço ABNT 4340, amplamente utilizado na indústria devido à sua elevada resistência mecânica, tenacidade e boa resposta a tratamentos térmicos. Essas propriedades tornam o material ideal para aplicações estruturais críticas, como eixos, engrenagens, componentes aeronáuticos e partes de máquinas pesadas, que exigem alta confiabilidade operacional (Kumar; Singh; Kalsi, 2017; Sato et al., 2018).

No entanto, essas mesmas características que conferem robustez ao material também impõem desafios durante a usinagem, especialmente em processos como a retificação. Assim, investigar o comportamento de métodos alternativos de lubrificação, como o MQL e suas variações, na retificação do ABNT 4340 torna-se essencial para viabilizar processos mais eficientes, sustentáveis e tecnicamente seguros para a indústria moderna.

1.1. Objetivo geral

Avaliar o desempenho de três fluidos de corte distintos - um base, um com tecnologia VCI e outro com VCI e aditivo de extrema pressão (EP) - na retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 temperado e revenido, utilizando o método convencional de lubrificação e duas técnicas de mínima quantidade de lubrificante.

1.2. Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência de cada fluido de corte no processo de retificação cilíndrica do aço ABNT 4340;
- Analisar a influência dos fluidos de corte no desempenho de diferentes métodos de lubrificação, com base em variáveis de saída do processo, como rugosidade superficial (R_a), erro de circularidade, desgaste da ferramenta, potência de corte, emissão acústica, custo e poluição;
- Relacionar os fluidos de corte e os métodos de lubrificação a variáveis como qualidade superficial, precisão geométrica da peça e desgaste do rebolo, visando à otimização do processo de retificação;
- Avaliar a severidade do processo de retificação sob diferentes fluidos e sistemas de lubrificação, por meio da análise da potência consumida e da emissão acústica;
- Investigar os impactos econômicos e ambientais associados ao uso dos diferentes fluidos de lubrificação em distintos cenários de retificação.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção é apresentada uma revisão da literatura sobre os principais assuntos abordados neste trabalho. Serão tratados o processo de retificação, suas principais características e ferramentas. Além disso, serão discutidos os sistemas e fluidos de lubrificação bem como as novas tecnologias na área. Ademais, serão analisados os aços endurecidos, as variáveis de saída do processo de retificação cilíndrica e outros temas relacionados à pesquisa.

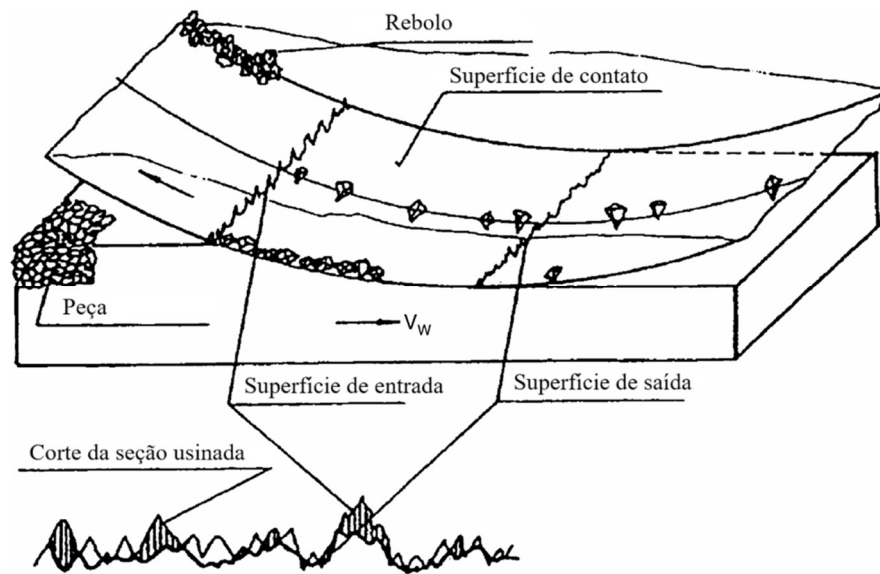
2.1. Retificação

A retificação é um processo de usinagem abrasivo, que utiliza de partículas extremamente duras, aglomeradas sob a forma de um reboło, em alta velocidade para a retirada de material (Groover, 2010). Os processos abrasivos estão presentes nas comunidades humanas desde a pré-história, com registros de homens primitivos afiando e moldando ferramentas e armas feitas de pedra em materiais abrasivos naturais (Malkin; Guo, 2008).

Na segunda metade do século XX, a retificação consolidou-se como processo estratégico para indústrias de alta tecnologia, especialmente na fabricação de componentes críticos como motores aeronáuticos e sistemas de guiagem de mísseis, devido à sua capacidade de atender aos rigorosos requisitos de qualidade. Com o advento da revolução digital e o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos de precisão, a retificação reafirmou sua importância como método essencial para produção de superfícies ópticas de alta qualidade (Groover, 2010; Rowe, 2013). Estima-se que atualmente 80% dos produtos manufaturados utilizam componentes que passaram por processos de retificação em sua cadeia produtiva, representando um gasto anual com retificação equivalente a 20-25% de todos os custos da indústria manufatureira (Malkin; Guo, 2008).

Diferentemente de processos como torneamento ou fresamento, que utilizam ferramentas de geometria definida, a retificação caracteriza-se pelo uso de um reboło – uma ferramenta composta por grãos abrasivos distribuídos aleatoriamente em uma matriz ligante, o que confere geometria indefinida às suas arestas de corte (Anderson; Warkentin; Bauer, 2008; Azarhoushang et al., 2021). Durante o processo, o contato em alta velocidade entre os grãos abrasivos e a peça gera atrito, deformações plásticas e cisalhamento, sendo este último o mecanismo principal de remoção de material e formação de cavacos (Malkin; Guo, 2008; Rasim; Mattfeld; Klocke, 2015).

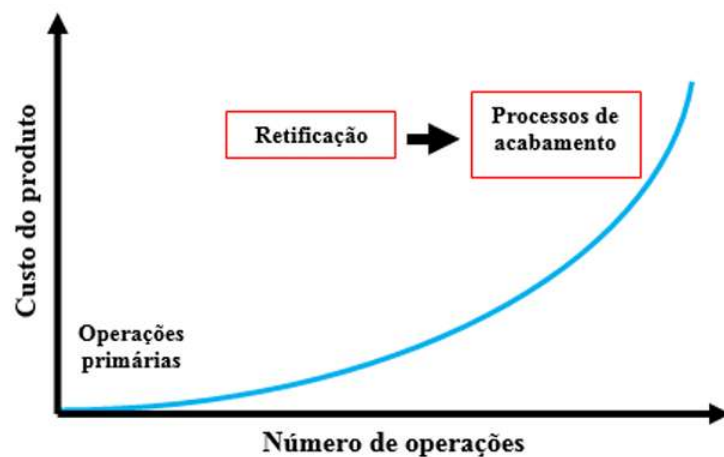
Figura 3 – Interface de corte no processo de retificação.



Fonte: Kopac e Krajnik (2006), adaptado.

Por ser frequentemente uma das etapas finais da cadeia produtiva, a retificação agrega alto valor ao produto, exigindo parâmetros operacionais rigorosos para evitar falhas que comprometam custos e qualidade (Anderson; Warkentin; Bauer, 2008). Seus seis elementos fundamentais – máquina, rebolo, peça, fluido de corte, ar atmosférico e cavaco – interagem de forma complexa, influenciando resultados como rugosidade, precisão geométrica e eficiência energética (Azarhoushang et al., 2021). A Figura 4 ilustra o custo acumulado ao longo das operações precedentes, destacando o impacto econômico dessa etapa crítica.

Figura 4 – Custos acumulados para a fabricação de um produto e seu valor.



Fonte: Rowe (2013), adaptado.

De acordo com Sinha et al. (2016) e Marinescu et al., (2013), o processo de retificação destaca-se por sua complexidade dinâmica, envolvendo múltiplas variáveis inter-relacionadas que influenciam diretamente a qualidade final da peça, como velocidades de corte, profundidade de corte, tipo de rebolo, condições de dressagem e propriedades do fluido de corte. Esses parâmetros devem ser rigorosamente controlados, pois pequenas alterações podem comprometer tolerâncias dimensionais, acabamento superficial e até levar ao descarte da peça, gerando custos elevados (Bianchi et al., 2013a; Rowe, 2013). A complexidade é amplificada pela natureza aleatória das arestas de corte do rebolo, cuja geometria se modifica continuamente devido ao desgaste dos grãos abrasivos e do ligante (Zhou et al., 2018).

O processo de retificação pode ser classificado de acordo com o tipo de contato entre o rebolo e a peça, destacando-se quatro principais categorias: retificação cilíndrica externa, utilizada para usinar diâmetros externos de componentes como eixos e virabrequins; retificação cilíndrica interna, aplicada no acabamento de furos e furos alargados; retificação plana, empregada para superfícies planas e perfis retilíneos; e retificação sem centros (*centerless*), ideal para produção em série de peças cilíndricas sem fixação central, como pinos e buchas (Groover, 2010; Malkin; Guo, 2008).

Além disso, essas operações podem ser subdivididas conforme o movimento de avanço do rebolo, como tangencial de mergulho (avanço radial contínuo), tangencial de passagem (avanço axial combinado com radial), lateral de mergulho (usinagem por faces) e lateral de passagem (Groover, 2010; Rowe, 2013; Sato et al., 2022a). A escolha do método depende das características geométricas da peça, da precisão requerida e da eficiência produtiva, sendo a retificação cilíndrica externa de mergulho uma das mais relevantes para a indústria metalmeccânica, devido à sua aplicação em componentes críticos como virabrequins e comandos de válvula (Sato et al., 2022a).

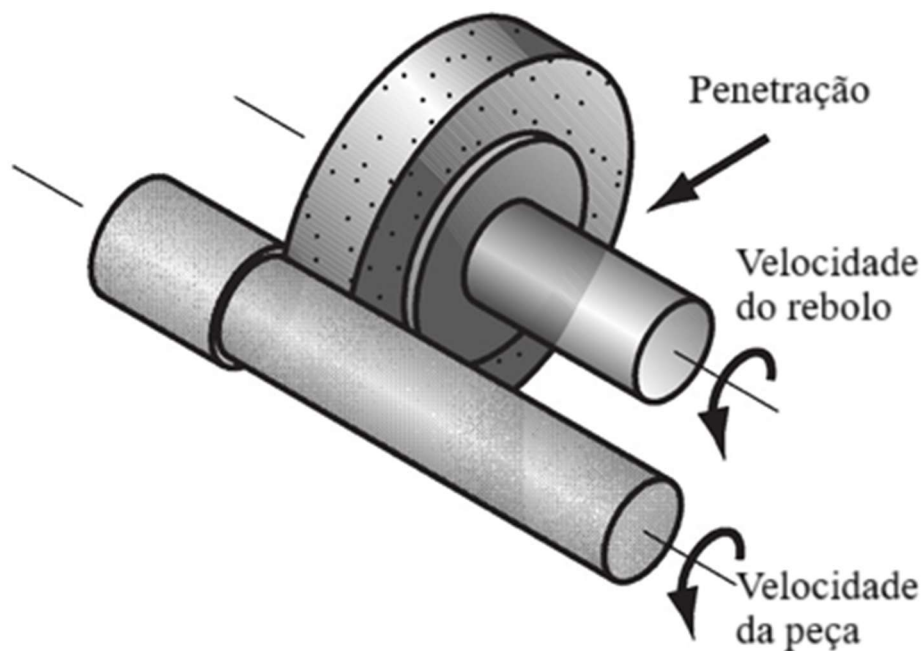
2.2. Retificação cilíndrica externa de mergulho

A retificação cilíndrica externa de mergulho é um processo de usinagem de precisão no qual o rebolo avança radialmente (em direção perpendicular) sobre a superfície rotativa da peça, diferentemente do método de passe longitudinal, como apresentado na Fig. 5 (Groover, 2010).

Nessa operação, a peça — como eixos, virabrequins ou rolamentos — gira tipicamente entre 18 m/min e 30 m/min, enquanto o rebolo, rotacionando em alta velocidade (1200 m/min a 2000 m/min), remove material de forma contínua e controlada. O ciclo completo engloba desde o posicionamento e fixação da peça até sua remoção final, sendo ideal para

componentes pré-usinados e temperados que exigem acabamento dimensional preciso e rugosidade superficial específica. Essa técnica é especialmente aplicada em peças cilíndricas de geometria complexa ou com perfis não lineares, onde o rebolo pode ser conformado para reproduzir o contorno desejado em uma única passagem radial, eliminando a necessidade de movimentos axiais adicionais (Groover, 2010; Hassui; Diniz, 2003).

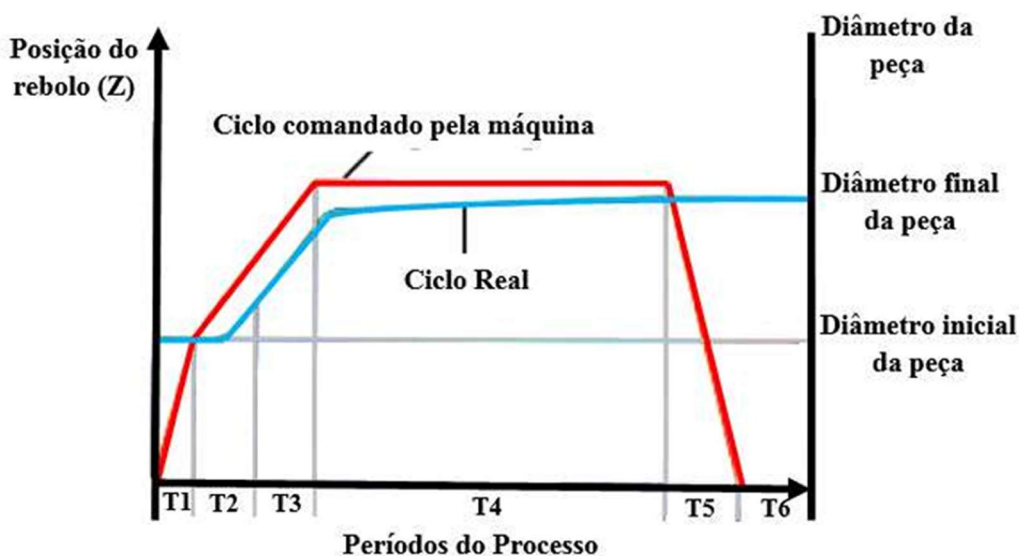
Figura 5 – Representação do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.



Fonte: Groover (2010), adaptado.

Quando o rebolo entra em contato com a peça durante a retificação, ocorre imediatamente uma deformação elástica tanto no eixo porta-ferramenta quanto na própria peça, causando uma defasagem entre o avanço teórico programado na máquina e o avanço real efetivo. Essa diferença faz com que a profundidade de corte real seja inicialmente menor que a prevista, situação que se normaliza após algumas rotações, quando os avanços real e teórico se igualam — embora a discrepância nas profundidades de corte persista (Diniz; Marcondes; Coppini, 2006). Para garantir a precisão dimensional final, é necessário interromper o avanço radial do rebolo ao término do corte, mantendo-o em contato com a peça por um breve período denominado tempo de centelhamento (*spark-out*). Durante essa fase, a deformação elástica é gradualmente recuperada, e o corte continua com profundidade decrescente até que as forças residuais se dissipem completamente, assegurando que a peça atinja as dimensões exatas projetadas (Hassui; Diniz, 2003).

Figura 6 – Representação do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho.



Fonte: Hassui e Diniz (2003), adaptado.

Conforme Hassui e Diniz (2003), o ciclo de retificação pode ser dividido em seis etapas, sendo representadas na Fig. 6, na qual:

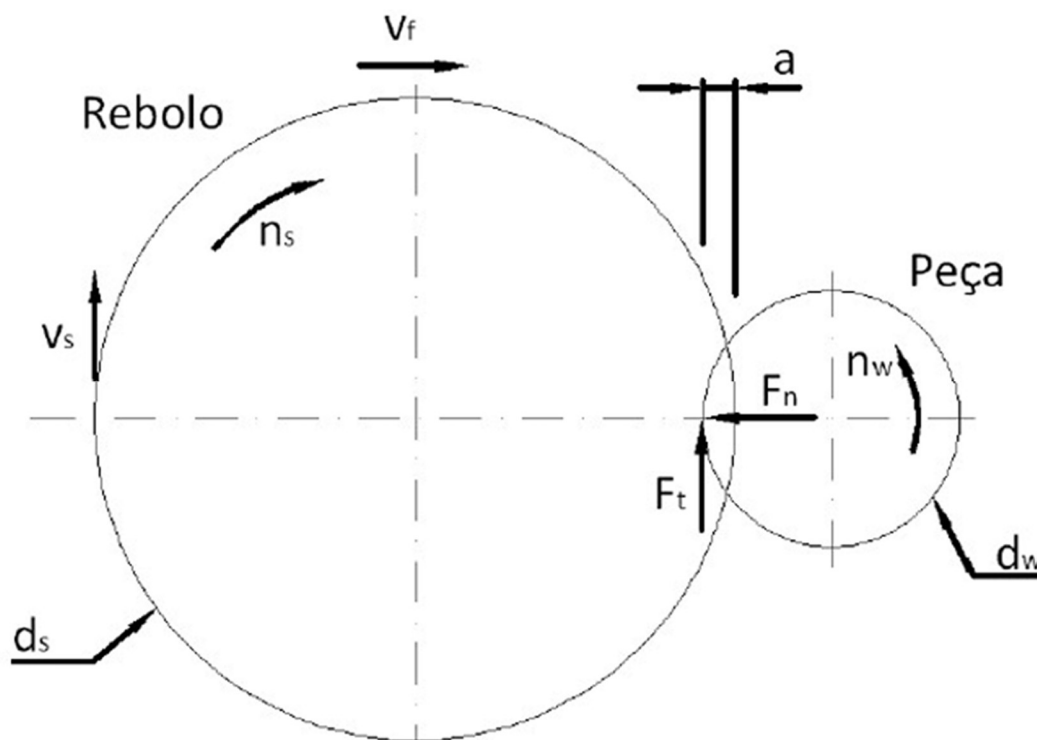
- T1 - aproximação: corresponde ao deslocamento da ferramenta em relação à peça, sem a ocorrência de remoção de material;
- T2 - início do corte: este estágio marca o momento crítico de primeiro contato entre o rebolo e a peça, resultando em deformações elásticas instantâneas no sistema peça-rebolo-máquina. Essas deformações causam uma discrepância imediata entre a posição real do rebolo e a posição programada no comando numérico. Simultaneamente ao contato inicial, observam-se picos transitórios em dois parâmetros fundamentais: (1) a potência demandada pelo motor principal e (2) os níveis de emissão acústica, que servem como indicadores sensíveis do engajamento inicial do processo.
- T3 - profundidade de corte: atinge-se a profundidade total de corte estabelecida para um ciclo de retificação;
- T4 - *spark-out*: corresponde ao período de centelhamento, em que não há avanço do rebolo, permitindo, desta forma, eliminar as deformações adquiridas durante o período T2. O tempo de centelhamento é de fundamental importância dentro de um ciclo de retificação, pois é neste momento que se atinge as tolerâncias dimensionais e geométricas com reduzidos valores de rugosidade superficial, característicos do processo de retificação;

- T5 - recuo: afastamento do rebolo, permitindo a retirada da peça usinada e a colocação de outra peça a ser trabalhada;
- T6 - troca de peça e dressagem: realização da operação da dressagem, a qual é composta pelo movimento do rebolo até o dressador, pela dressagem propriamente dita e pelo retorno do rebolo até a posição de trabalho.

2.3. Parâmetros de corte na retificação cilíndrica externa de mergulho

A cinemática do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho pode ser descrita como um rebolo com diâmetro d_s girando com velocidade tangencial v_s enquanto avança radialmente com velocidade de mergulho v_f em direção à peça. Esta, por sua vez, possui diâmetro d_w e gira com velocidade tangencial v_w , até que seja alcançada a profundidade de corte a . Dessa interação dinâmica resultam duas forças principais: a força tangencial F_t e a força normal F_n (Malkin; Guo, 2008; Rowe, 2013).

Figura 7 – Cinemática do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.



Fonte: Malkin e Guo (2008), adaptado.

A seguir, são apresentados os principais parâmetros do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.

2.3.1. Velocidade de corte (v_s)

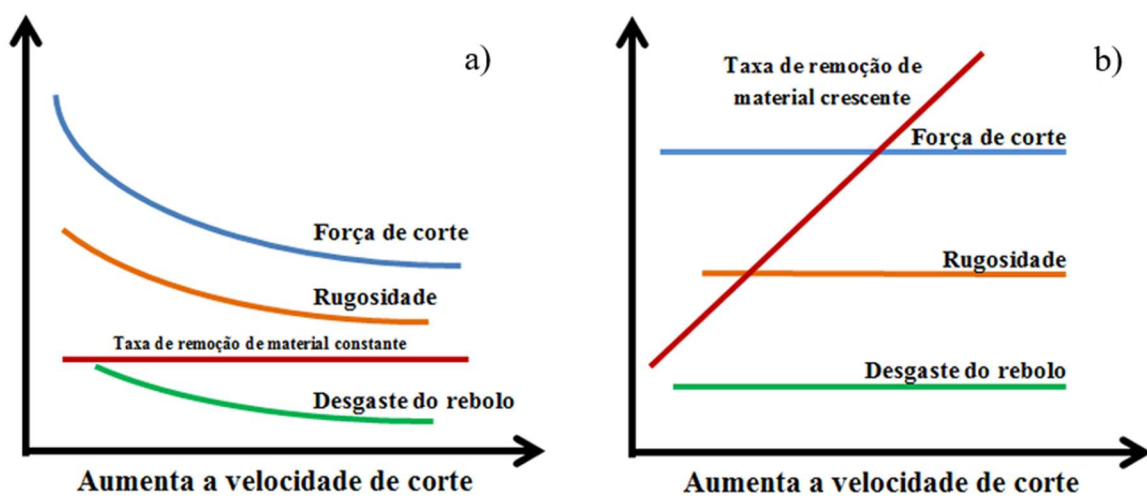
A velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo corresponde à velocidade tangencial da ferramenta durante o processo de remoção de material, sendo definida conforme Rowe (2013) pela Equação (2.1):

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (2.1)$$

Na qual, n_s é a rotação do rebolo, em rotações por minuto (rpm), e d_s seu diâmetro, em milímetros (mm).

Conforme Tian et al. (2015), existe uma relação intrínseca entre velocidade de corte e eficiência de usinagem. Isso ocorre porque velocidades de corte mais elevadas aumentam a frequência de contato das arestas abrasivas com a peça por unidade de tempo, promovendo a remoção de material por meio de cavacos menores. Esse mecanismo resulta na redução das forças de corte e no aumento da vida útil da ferramenta. Rowe (2013) complementa que maiores velocidades de corte podem ser empregadas tanto para melhorar a precisão e qualidade quanto para aumentar a produtividade, mantendo a precisão dimensional e as características superficiais da peça, conforme ilustrado na Fig. 8.

Figura 8 – Efeito do aumento da velocidade de corte: a) sob taxa de remoção de material constante e b) sob taxa de remoção de material crescente.



Fonte: Rowe (2013), adaptado.

Ainda segundo o autor, o aumento simultâneo da velocidade de corte e da taxa de remoção de material permite manter estáveis as forças de corte, a rugosidade superficial e o desgaste do rebolo. Dessa forma, é possível elevar a produtividade sem comprometer a qualidade do processo, uma vez que a duração da operação é reduzida (Rowe, 2013; Tian et al., 2015).

2.3.2. *Velocidade periférica da peça (v_w)*

Segundo Marinescu et al. (2007), a velocidade periférica da peça é a velocidade linear tangencial a superfície de trabalho, sendo descrita pela Equação (2.2)

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (2.2)$$

Onde: d_w é o diâmetro da peça (mm), n_w a rotação da peça (rpm) e v_w a velocidade periférica da peça (m/s).

Segundo Rowe (2013), altas velocidades periféricas da peça proporcionam maiores taxas de remoção de material, gerando cavacos mais espessos que, por sua vez, exigem maiores forças de corte durante o processo. Enquanto baixas velocidades favorecem a ocorrência de danos térmicos, uma vez que prolongam o tempo de exposição ao calor e sua condução pelo material. Ademais, o autor complementa que neste cenário a profundidade de corte mais elevada leva a um comprimento de contato muito grande, o que causa uma acentuada taxa de cegamento dos grãos abrasivos do rebolo.

2.3.3. *Velocidade de avanço ou de mergulho (v_f)*

A velocidade de avanço (ou velocidade de mergulho) na retificação corresponde à velocidade com que o rebolo avança perpendicularmente em direção à superfície da peça no ponto de contato entre ambos, conforme descrito por Marinescu et al. (2007).

Este parâmetro fundamental exerce influência direta e multifacetada no processo de retificação. Por um lado, o aumento da velocidade de avanço proporciona maior produtividade ao elevar a taxa de remoção de material, como destacado por Rowe (2013). No entanto, esse incremento gera efeitos colaterais significativos: as forças de corte aumentam proporcionalmente, comprometendo a qualidade superficial da peça com maior rugosidade, conforme observado por Tawakoli et al. (2009).

Além disso, velocidades excessivas aceleram o desgaste do rebolo, reduzindo sua vida útil e a relação G, o que demanda dressagens mais frequentes e aumenta os custos operacionais. Rowe (2013) ressalta que existe uma faixa de operação otimizada, na qual se maximiza a eficiência energética sem comprometer excessivamente a qualidade ou a durabilidade do rebolo. Acima desta faixa, os prejuízos superam os benefícios, tornando o processo menos eficiente. Portanto, a seleção adequada da velocidade de avanço requer um equilíbrio cuidadoso entre produtividade, qualidade superficial, vida da ferramenta e eficiência energética, devendo ser ajustada conforme as especificações do material e os requisitos do produto final.

2.3.4. Profundidade de corte (a_p)

A profundidade de corte é um parâmetro fundamental no processo de retificação, representando a penetração do rebolo na peça durante a usinagem. Segundo Malkin e Bitter (1989), ela é definida pela profundidade que o rebolo avança radialmente (a_p) em relação à superfície da peça, com uma velocidade de avanço (v_f) durante uma revolução completa. Segundo Rowe (2013), para o caso da retificação cilíndrica de mergulho, o tempo necessário para uma revolução da peça de diâmetro d_w vale π multiplicado pela razão $\frac{d_w}{v_w}$. Deste modo, a profundidade de corte é dada pela Equação (2.3), como:

$$a_p = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \quad (2.3)$$

Sendo v_f a velocidade de avanço e v_w a velocidade da peça.

Entretanto Rowe (2013) complementa que para uma primeira passada, o valor da profundidade de corte (a_p) se distancia muito da profundidade de corte real (a_e). Isso decorre por conta da estrutura da máquina, tipo de rebolo e material da peça, que geram deflexões mecânicas e térmicas. Entretanto após um número de revoluções, a profundidade de corte real (a_e) se aproxima do valor de profundidade de corte programado (a_p), por conta da estabilização das deflexões, se tornando constantes. (Marinescu; Doi; Uhlmann, 2015; Rowe, 2013).

Ainda segundo Rowe (2013), a Equação (2.3) só é válida quando se desconsidera o desgaste do rebolo, que mesmo sendo infinitesimal, altera a profundidade de corte. No entanto, há casos em que se deve considerar esse desgaste, como na retificação de um material muito duro. Segundo Marinescu; Doi; Uhlmann (2015), para estes casos, no qual a taxa de desgaste do rebolo é mais acentuada, deve-se considerar o parâmetro (a_p) como sendo:

$$a_p = \frac{\pi \cdot d_w}{1 + \left(\frac{1}{G}\right) \cdot \left(\frac{d_w}{d_s}\right)} \cdot \left(\frac{v_f}{v_w}\right) \quad (2.4)$$

2.3.5. Comprimento de contato (l_c) e diâmetro equivalente (d_e)

O comprimento de contato (l_c) pode ser definido como a extensão de contato entre a peça e o rebolo durante a usinagem. Conforme Marinescu et al. (2013), este pode ser calculado a partir da geometria dos elementos do processo, segundo a Equação (2.5):

$$l_c = \sqrt{a_e \cdot d_s} \quad (2.5)$$

Onde: a_e é a profundidade real de corte e d_s o diâmetro do rebolo.

Entretanto, de acordo com Malkin e Bitter (1989), a Equação (2.5) não leva em conta os movimentos e deformações envolvidas no processo, tendo validade assim no caso apenas da retificação plana, e pode ser denominado de comprimento de contato estático.

Por conta disso, Malkin e Guo (2008) desenvolveram o parâmetro de diâmetro equivalente (d_e). Este é um fator de conversão que estabelece uma correlação entre a retificação plana e a cilíndrica, considerando também as diferenças de curvatura em retificações internas e externas. Esse diâmetro corresponde à medida necessária de um rebolo em uma retificação plana tangencial para reproduzir a mesma geometria de corte e comprimento de contato obtidos na retificação cilíndrica, sendo calculado conforme a Equação (2.6):

$$d_e \equiv \frac{d_s}{1 \pm \left(\frac{d_s}{d_w}\right)} \quad (2.6)$$

Nela, d_s é o diâmetro do rebolo e d_w o diâmetro da peça. Adota-se o sinal negativo quando se trata da retificação cilíndrica interna e o sinal positivo no caso da externa. No caso da retificação plana, o diâmetro da peça (d_w) deve ser considerado infinito. Assim, $d_e = d_s$ (Malkin; Guo, 2008).

Por consequência, o estudo do comprimento de contato entre o rebolo e a peça é fundamental para otimizar o processo de retificação, pois influencia diretamente a distribuição de pressão sobre os grãos abrasivos e as características do rebolo. Quando esse comprimento aumenta, a pressão específica de corte diminui, já que o esforço radial se distribui por um maior

número de grãos ativos na zona de contato, tornando o rebolo aparentemente mais duro ao reduzir a probabilidade de remoção prematura dos grãos (Marinescu et al., 2013).

De modo que um maior comprimento de contato permite ainda a utilização de rebolos com maior porosidade e grãos mais grossos, mantendo constante o número de grãos em contato com a peça e melhorando significativamente a dissipação térmica, uma vez que a maior porosidade facilita a remoção dos cavacos e a penetração do fluido de corte (Diniz; Marcondes; Coppini, 2006; Malkin; Bitter, 1989).

Conforme (Marinescu et al., 2013), é justamente através dessa zona de contato que o calor gerado no processo é dissipado para a peça, embora o cálculo preciso desse parâmetro varie conforme o tipo de ligante do rebolo. Enquanto a Equação (2.5) fornece boas aproximações para rebolos com ligante metálico (mais rígidos), ela se mostra inadequada para rebolos com ligante vitrificado (mais elásticos), onde o valor real pode chegar a ser até duas vezes maior que o obtido pelo cálculo tradicional.

Portanto, a análise do comprimento de contato é essencial para equilibrar as propriedades do rebolo com as condições de corte, considerando o tipo de ligante utilizado, o que permite melhorar a eficiência do processo, prolongar a vida útil do rebolo, garantir a qualidade da peça usinada e controlar efetivamente as condições térmicas durante a operação. (Diniz; Marcondes; Coppini, 2006).

2.3.6. Taxa de remoção do material (Q_w)

A taxa de remoção de material (Q_w), conforme Malkin e Guo (2008), representa o volume de material removido por unidade de tempo durante o processo de retificação, sendo determinada pelo produto da profundidade de corte (a_p), velocidade relativa peça-rebolo (v_w) e largura de retificação (b), conforme expresso na Equação (2.7):

$$Q_w = a_p \cdot v_w \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b \quad (2.7)$$

Onde: d_w é o diâmetro da peça e v_f a velocidade de avanço.

Os autores ainda complementam, que se pode obter a taxa de remoção específica de material (Q'_w), dividindo a taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de retificação (b), conforme demonstrado na Equação (2.8), sendo este importante para avaliar a produtividade de um processo de retificação (Kruegar et al., 2000).

$$Q'_w = a_p \cdot v_w \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (2.8)$$

Rowe (2013) complementa que a taxa de remoção de material possui grande influência sobre as forças na máquina, deflexões e consumo de potência, sendo que o aumento do comprimento de contato na retificação eleva proporcionalmente as forças de corte e a potência requerida. O autor ainda ressalta que a taxa de remoção específica representa uma medida da efetividade dos grãos abrasivos na remoção de material.

Entretanto, segundo (Marinescu; Doi; Uhlmann, 2015), particularmente na retificação de materiais muito duros, como cerâmicas, ocorre um desgaste acentuado do rebolo, portanto a taxa de remoção de material deve ser calculada pela Equação (2.9)

$$Q_w = \frac{b_w \cdot \pi \cdot d_w}{1 + \left(\frac{1}{G}\right) \cdot \left(\frac{d_w}{d_s}\right)} \cdot v_f \quad (2.9)$$

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

De acordo com Malkin e Guo (2008), a espessura equivalente de corte (h_{eq}) é definida como a relação entre a taxa de remoção específica de material (Q'_w) e a velocidade de corte (v_s). No caso da retificação cilíndrica, essa relação é dada pela Equação (2.10):

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{v_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{60 \cdot 1000 \cdot v_s} \quad (2.10)$$

Sendo a espessura equivalente de corte expressa em milímetros (mm).

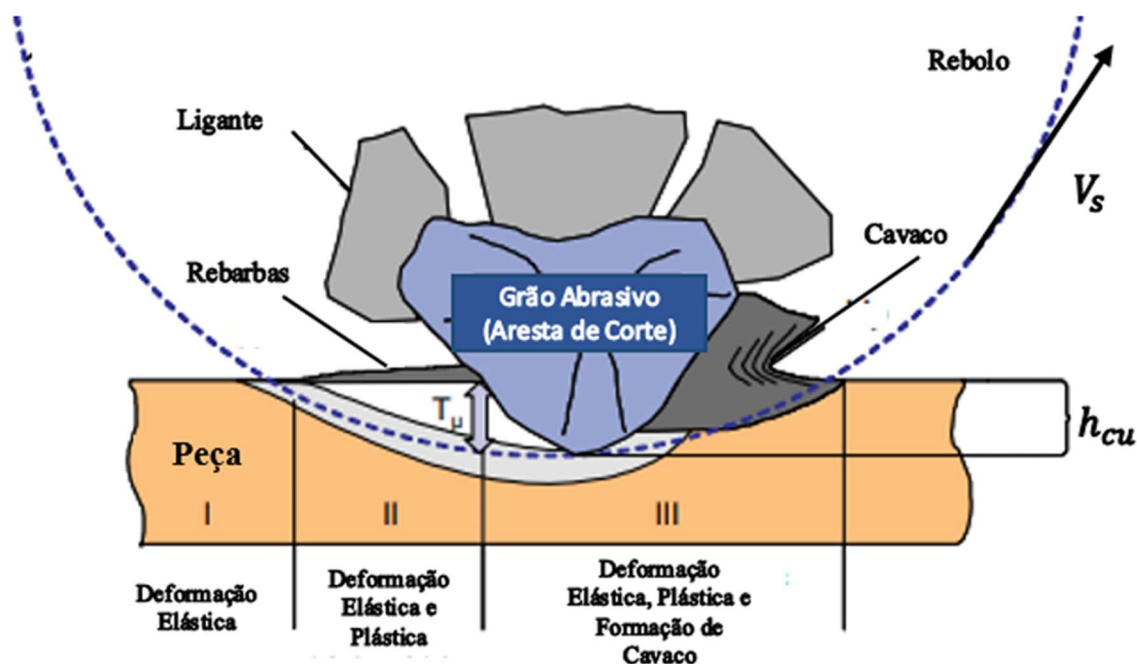
Neto (2012) destaca que este parâmetro é o que melhor caracteriza o processo de retificação, pois engloba as três principais variáveis do processo (v_s, v_f, d_w). Malkin e Bitter (1989) complementam que a velocidade de corte determina a dureza dinâmica do rebolo, sendo que seu aumento eleva o número de grãos ativos por unidade de tempo, reduzindo consequentemente a força tangencial de corte.

Marinescu et al. (2013) ressaltam, contudo, que esse parâmetro não considera o espaçamento entre os grãos do rebolo. Evidencia-se assim que o comportamento da retificação depende da combinação entre a espessura equivalente de corte e a densidade das arestas de corte. Adicionalmente, Malkin e Bitter (1989) demonstram que a espessura equivalente de corte

mantém relação direta com outras variáveis do processo, como a rugosidade superficial e a topografia do rebolo.

2.4. Mecanismo de formação do cavaco

Figura 9 – Estágios de formação do cavaco.



Fonte: Klocke (2014), adaptado.

Segundo Denkena; Köhler; Kästner (2012), o processo de retirada do material durante o processo de retificação pode ser simplificado e dividido em três etapas, como ilustrado na Fig. 9. Na qual:

- Etapa I: é a região de contato inicial entre o grão e a superfície, na qual se inicia a deformação do material à medida que o grão passa pela peça, deformando-a elasticamente. Nela a maior parte da energia do processo é dissipada na forma de atrito, calor e deformações;
- Etapa II: nesta segunda região, à medida que o grão abrasivo penetra na peça, a espessura do cavaco não deformado (h_{cu}) aumenta, elevando as tensões compressivas e promovendo tanto deformação elástica quanto plástica. O material da peça é empurrado para frente e lateralmente em relação ao grão, caracterizando a fase de riscamento, na qual uma porção do material sofre deformação permanente. Nesta etapa, o aumento da área de contato entre o grão

e a peça intensifica as taxas de deformação, elevando significativamente as forças de atrito, resultando em maior dissipação de energia na forma de calor;

- Etapa III: por fim, quando o grão atinge uma penetração crítica, ele entra na terceira região do corte, na qual a aresta de corte gera uma pressão suficiente para iniciar a ruptura do material por cisalhamento, marcando o início efetivo da formação do cavaco. Nesse estágio, a energia do processo é majoritariamente consumida pelo cisalhamento do material, enquanto o cavaco removido é alojado na porosidade do rebolo, e um novo grão entra em contato com a peça, reiniciando o ciclo. Conforme Marinescu et al. (2016), essa formação contínua do cavaco só ocorre quando a espessura do cavaco não deformado (h_{cu}) iguala a profundidade de corte crítica (T_μ), assegurando a ruptura por cisalhamento.

Segundo Daneshi; Müller; Azarhoushang (2018), as energias dissipadas por atrito e riscamento (etapas I e II) ainda superam a energia gasta no corte efetivo do material, explicando a elevada geração de calor característica da retificação.

Após o corte do material, o cavaco alojado na porosidade do rebolo é transportado para fora da zona de corte e expulso pela força centrífuga gerada pela rotação da ferramenta ou pela ação do fluido de corte, evitando assim o empastamento (Rodriguez et al., 2019b). No entanto, em rebolos de CBN com ligante vitrificado, cuja porosidade raramente ultrapassa 30%, a capacidade de remoção de cavacos pode ser limitada, especialmente em operações com grandes taxas de remoção de material (Zhenzhen et al., 2014). O processo também pode ser otimizado por meio de ajustes na morfologia do grão abrasivo ou na redução do fluido de corte, visando controlar a quantidade de grãos ativos em contato com a peça. Quando o número de grãos ativos diminui, a espessura do cavaco aumenta, reduzindo a energia dissipada por atrito e riscamento, que é significativamente maior do que a energia consumida no corte efetivo, resultando em menor geração de calor e maior eficiência do processo (Daneshi; Müller; Azarhoushang, 2018; Tawakoli; Westkaemper; Rabiey, 2007).

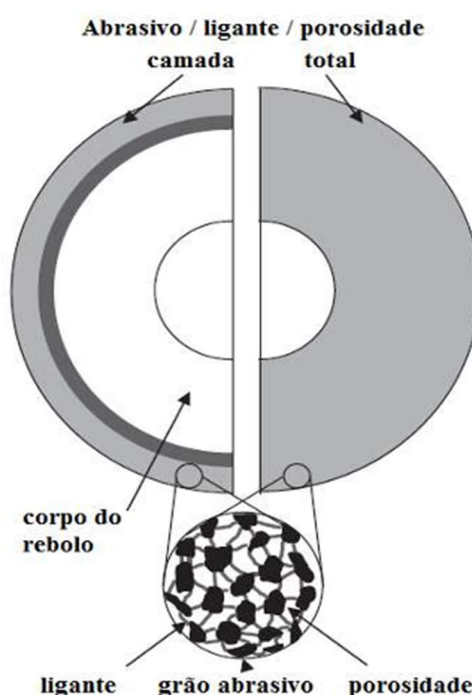
2.5. Rebolos

O rebolo é a ferramenta de corte essencial nos processos de retificação, composto por três elementos básicos, segundo Wegener et al. (2011), sendo eles: grãos abrasivos, um material ligante e porosidade. Entretanto, conforme a definição de Webster e Tricard (2004), os rebolos

possuem um quarto elemento fundamental, seu projeto, que engloba propriedades como resistência mecânica, estabilidade química e condutividade térmica.

Os grãos abrasivos são responsáveis efetivamente pelo corte, removendo material da peça através de suas arestas cortantes. De acordo com Malkin e Guo (2008), essas arestas não possuem geometria definida e estão distribuídas aleatoriamente na ferramenta. Consequentemente, seu desempenho depende diretamente das propriedades do material que as compõe e do tamanho do grão. Já o ligante tem como função manter esses grãos unidos, garantindo a integridade estrutural da ferramenta durante o processo. Por fim, os poros, ou espaços intergranulares, facilitam o escoamento de fluidos de corte e armazenam cavacos gerados durante a usinagem, prevenindo assim o preenchimento da superfície ativa de corte (Malkin; Guo, 2008; Rowe, 2013).

Figura 10 – Tipos de estruturas básicas de rebolos.

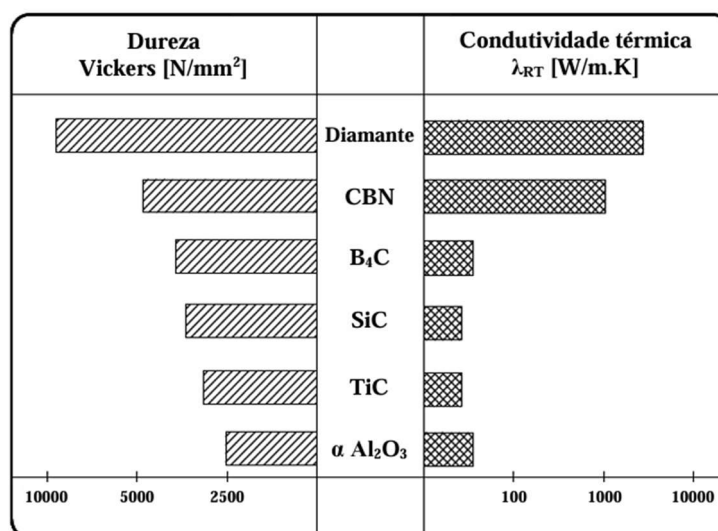


Fonte: Wegener et al. (2011), adaptado.

Segundo Winter et al. (2015), os rebolos são classificados como ferramentas do tipo "abrasivos aglomerados" e dividem-se em dois grupos principais, conforme o material base do grão abrasivo: (i) rebolos convencionais, que utilizam principalmente óxido de alumínio (Al_2O_3) e carbeto de silício (SiC) como abrasivos; e (ii) superabrasivos, que empregam diamante ou nitreto de boro cúbico (CBN) devido à sua excepcional dureza e desempenho em

aplicações de alta precisão. A Figura 11 ilustra os tipos mais comuns desses materiais abrasivos e suas propriedades.

Figura 11 – Dureza e condutividade térmica de abrasivo convencionais e superabrasivos.



Fonte: Marinescu et al. (2016), adaptado.

De acordo com Rowe (2013), a escolha do grão abrasivo ideal deve considerar, em primeiro lugar, sua dureza – propriedade fundamental que deve ser mantida mesmo sob altas temperaturas de usinagem, evitando reações químicas ou difusão para o material da peça. A dureza é tipicamente avaliada pelo teste Knoop, que mede a resistência à indentação estática sob cargas controladas (Stemmer, 1992). Além disso, características como estrutura cristalina, forma do grão, friabilidade e compatibilidade química com o material usinado são críticas para a eficácia na remoção de material (Malkin; Guo, 2008). Por exemplo, grãos de diamante sofrem desgaste prematuro em materiais ferrosos devido à difusão de carbono em altas temperaturas (Klocke, 2009).

Outro aspecto essencial é a durabilidade do abrasivo, avaliada por testes de resistência ao impacto, fadiga, compressão e lascamento sob tensão térmica (Marinescu et al., 2013). A estabilidade e a condutividade térmica também são determinantes: superabrasivos como CBN e diamante possuem alta condutividade, mas esta varia conforme a pureza do material (Rowe, 2013). Em geral, os abrasivos convencionais como óxido de alumínio e carbeto de silício, apresentam baixa condutividade térmica, o que dificulta a dissipação de calor durante a retificação, gerando altas temperaturas na interface de corte (Malkin; Guo, 2007). Esse acúmulo de calor pode causar danos significativos à peça, incluindo variações dimensionais, alterações

microestruturais, trincas, tensões residuais e redução da resistência à fadiga (Malkin; Guo, 2007, 2008).

Segundo Marinescu et al. (2016), embora o tipo e o tamanho do grão abrasivo sejam importantes, a qualidade do processo de retificação também depende criticamente da concentração das arestas de corte e do tipo de ligante utilizado no rebolo. Conforme o estudo de Linke e Klocke, (2010), as propriedades do ligante influenciam diretamente o desempenho da ferramenta: ligantes mais duros mantêm os grãos abrasivos fixos por mais tempo, levando ao aumento da área de contato devido ao aplainamento progressivo das arestas de corte - o que pode elevar o atrito e a temperatura na zona de usinagem. Por outro lado, ligantes menos rígidos permitem que os grãos se soltem mais facilmente, expondo novas arestas de corte e renovando a capacidade de corte, mas acelerando o desgaste geral do rebolo. Essa relação entre a dureza do ligante e o comportamento dos grãos é fundamental para equilibrar eficiência de corte e vida da ferramenta (Rowe, 2013).

Conforme Kopac e Krajnik (2006), os principais tipos de ligante utilizados na fabricação de rebolos são: vitrificado, resinoide, metálico, à base de borracha e polimérico. O ligante vitrificado, utilizado nesta pesquisa, apresenta adequada resistência ao desgaste e maior facilidade de dressagem quando comparado aos demais tipos (Herman; Krzos, 2009). Além disso, a possibilidade de controlar a estrutura e a porosidade com este tipo de ligante permite que os fabricantes desenvolvam ferramentas com características específicas de resistência, remoção de cavacos e capacidade de carga mecânica. Dessa forma, a topografia dessas ferramentas pode ser otimizada para diversas taxas de remoção de material e acabamentos superficiais (Kopac; Krajnik, 2006; Sato et al., 2019).

De acordo com Ribeiro et al. (2020b), o ligante vitrificado destaca-se por sua fragilidade controlada, alta resistência ao desgaste e excelente estabilidade térmica, sendo particularmente vantajoso para rebolos convencionais e de CBN. Suas características de elevada porosidade e capacidade de autoafiação simplificam o processo de condicionamento, consolidando-o como a principal escolha para fabricação de rebolos de alto desempenho.

2.6. Fluidos de corte

A aplicação de fluidos de corte na retificação é essencial para garantir a eficiência e a qualidade do processo, atuando simultaneamente como lubrificante, refrigerante e veículo de remoção de cavacos. Em um processo caracterizado por altas velocidades (20–140 m/s) e geração intensa de calor, os fluidos reduzem o atrito entre o rebolo e a peça, minimizando o desgaste abrasivo e evitando danos térmicos que podem comprometer a integridade do material

(Malkin; Guo, 2007; Marinescu et al., 2016). Além disso, promovem a limpeza da zona de corte, prevenindo o empastamento do rebolo por cavacos e melhorando o acabamento superficial (Ribeiro et al., 2020c).

Desse modo, fluidos de corte podem ser definidos como substâncias especialmente formuladas para processos de usinagem, atuando como lubrificantes e refrigerantes. Esses compostos podem ser formulados a partir de óleos minerais, emulsões óleo-água, pastas, géis ou aerossóis, sendo desenvolvidos a partir de derivados de petróleo, gorduras animais, óleos vegetais ou água (Mamidi; Xavier, 2014).

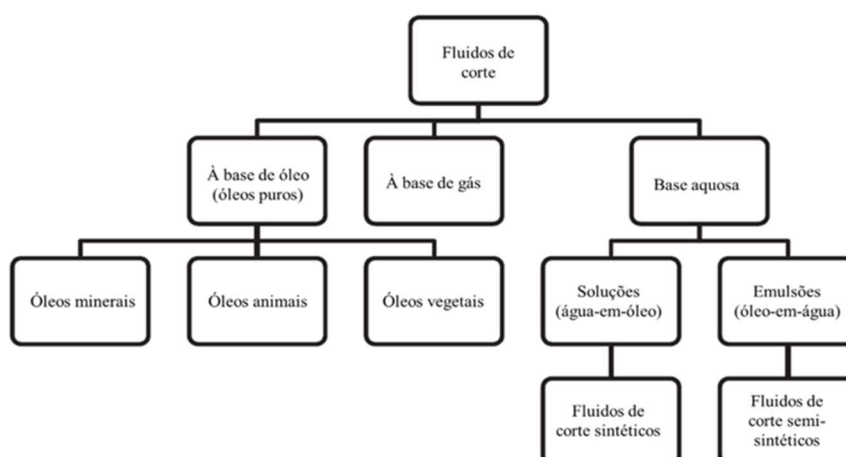
2.6.1. Histórico

Os primeiros registros da utilização de fluidos em processos de fabricação remontam à Idade Média, na produção de armas e obras de arte metálicas. Entretanto, sua aplicação só foi amplamente difundida após publicações científicas a partir de 1907, por F.W. Taylor, que constatou que o uso de água com sabão permitia um aumento de 40% na velocidade de corte sem prejudicar o processo (Kuram et al., 2011).

2.6.2. Classificação

Os fluidos de corte podem ser classificados de diversas maneiras, entretanto, a mais frequentemente utilizada na literatura é a dada por Diniz; Marcondes; Coppini (2006), apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Classificação dos fluidos de corte.



Fonte: (Debnath; Reddy; Yi, 2014), adaptado.

Os lubrificantes sólidos, embora tecnicamente não se classifiquem como fluidos, são frequentemente abordados na literatura junto aos fluidos de corte convencionais devido às suas funções equivalentes nos processos de usinagem. Esses compostos - como a grafita e o bissulfeto de molibdênio - são empregados principalmente para potencializar a lubrificação, porém apresentam limitações significativas: não auxiliam na remoção de cavacos e possuem capacidade de refrigeração praticamente nula. Outro fator restritivo é a necessidade de interrupções frequentes do processo para reaplicação do lubrificante, o que reduz sua viabilidade industrial em operações contínuas (Debnath; Reddy; Yi, 2014).

Por outro lado, os fluidos gasosos são predominantemente empregados em processos que demandam principalmente a remoção eficiente de cavacos, uma vez que seus gases (como ar comprimido, CO₂ e N₂) oferecem capacidade limitada de lubrificação e refrigeração. Desde a década de 1980, experimentos com gases criogênicos buscam aprimorar o desempenho térmico, mas sua aplicação industrial permanece restrita devido a desafios como custos elevados, complexidade operacional e requisitos de segurança (Benedicto; Carou; Rubio, 2017; Daniel et al., 2023).

Em contraste com os fluidos gasosos - limitados principalmente à remoção de cavacos e com restrições térmicas e de segurança - os fluidos de corte líquidos destacam-se como solução industrial predominante. Estes se dividem em: óleos (animais, vegetais e minerais), emulsões e soluções químicas, geralmente reforçados com aditivos de desempenho (Debnath; Reddy; Yi, 2014; Diniz; Marcondes; Coppini, 2006).

Enquanto óleos animais e vegetais, embora eficazes como lubrificantes biodegradáveis, caíram em desuso pela baixa refrigeração e rápida degradação, os óleos minerais mantêm aplicações estratégicas. Apesar de sua superior lubrificação e proteção anticorrosiva, riscos como inflamabilidade, toxicidade e vulnerabilidade microbiana limitaram seu uso a cenários específicos de baixa velocidade e alta remoção de material. Essa transição para emulsões – mais equilibradas em refrigeração e segurança – reflete a evolução tecnológica para superar as limitações tanto dos gases quanto dos óleos puros (Benedicto; Carou; Rubio, 2017; Debnath; Reddy; Yi, 2014).

As emulsões são constituídas por uma dispersão de óleo mineral em água (em proporções que variam de 1:10 a 1:100) com agentes emulsificantes, esses fluidos bifásicos incorporam ainda aditivos anticorrosivos e de extrema pressão. Sua alta concentração de água confere refrigeração superior a custos reduzidos, além de eliminar riscos de incêndio – fatores que, somados a uma lubrificação adequada, as consolidaram como a opção mais adotada na indústria moderna (Debnath; Reddy; Yi, 2014).

No entanto, a presença de água exige controle microbiológico rigoroso, já que a proliferação de fungos e bactérias podem degradar a emulsão, comprometendo seu desempenho e levando ao descarte precoce. Para combater esse problema, a adição de biocidas se faz necessária, ainda que esses compostos introduzam novos desafios, como potenciais riscos à saúde dos operadores. Assim, embora as emulsões representem um avanço significativo em relação aos óleos puros e aos fluidos gasosos, seu uso ideal demanda monitoramento constante de qualidade e segurança (Benedicto; Carou; Rubio, 2017; Hewstone, 1994).

Nesse contexto surgem as soluções, ou fluidos sintéticos, estas são compostos monofásicos, formados tipicamente por sais orgânicos, inorgânicos e aditivos, que reagem quimicamente e se dissolvem totalmente na água, resultando em uma fase única. São isentas de óleos minerais e, portanto, apresentam excelente resistência à ação de microrganismos e são biodegradáveis (Debnath; Reddy; Yi, 2014; Mamidi; Xavier, 2014). Uma comparação das propriedades dos fluidos é feita na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos fluidos de corte.

Propriedade	Óleos puros	Emulsões	Sintéticos
Aspecto	Oleoso	Leitoso	Transparente
Lubricidade	Excelente	Boa	Boa
Refrigeração	Baixa	Boa	Excelente
Controle de corrosão	Excelente	Baixo	Excelente
Controle microbiano	Excelente	Baixo	Excelente
Inflamabilidade	Alta	Não inflamável	Não inflamável
Outras desvantagens	Limitado a operações de baixas velocidades Cria névoa	Perdas por evaporação Cria espuma	Facilmente contaminável por outros fluidos

Fonte: Benedicto; Carou; Rubio (2017), adaptado.

Entretanto o seu alto custo restringe sua aplicação em larga escala, segundo o relatório da Market Research Intellect (2024), o mercado global de fluidos de corte sintéticos foi de 2 bilhões de dólares em 2023, com estimativa de crescimento de 5,5% ao ano até 2031, onde deverá atingir o valor de 3,1 bilhões de dólares.

2.6.3. *Aditivos*

Os aditivos em fluidos de corte são compostos químicos adicionados aos fluidos para melhorar seu desempenho, durabilidade e segurança no processo de usinagem. Entre os principais exemplos destacam-se: antiespumantes (evitam formação de espuma que prejudica a refrigeração), detergentes (reduzem acúmulo de borras), emulsificantes (estabilizam misturas óleo-água), biocidas (previnem contaminação microbiana), anticorrosivos (como os inibidores voláteis - VCI, que protegem peças e máquinas) e aditivos de extrema pressão - EP (mantêm eficácia sob altas temperaturas e pressões). Esses componentes são essenciais para otimizar lubrificação, vida útil do fluido e qualidade superficial da peça, sendo selecionados conforme a severidade da operação e materiais envolvidos (Bastidas; Cano; Mora, 2005; Benedicto; Carou; Rubio, 2017).

Os aditivos de extrema pressão (EP) são especialmente formulados para condições de usinagem severas, onde altas pressões e temperaturas podem comprometer a eficácia do fluido de corte convencional. Esses compostos — frequentemente à base de enxofre, fósforo, cloro ou compostos organometálicos — reagem quimicamente com a superfície da peça sob calor intenso, formando uma película protetora. Essa camada reduz o atrito direto entre a ferramenta e a peça, prevenindo gripagem, desgaste acelerado e falhas prematuras do rebolo (Papay, 1998).

Em aplicações como retificação de aços endurecidos ou ligas de titânio, os aditivos EP mantêm a estabilidade do fluido mesmo acima de 500°C, onde lubrificantes convencionais se decompõem. No entanto, sua seleção exige cuidado: compostos com enxofre, por exemplo, podem corroer metais não-ferrosos, enquanto os baseados em fósforo são mais versáteis e menos agressivos (Li et al., 2022; Marinescu et al., 2016). Estudos como os de Kumar; Padmanabhan; Krishna (2016) demonstram que aditivos EP podem reduzir em até 47% a força de corte em operações críticas, comprovando seu impacto na eficiência energética e qualidade superficial.

2.6.4. *Inibidores voláteis de corrosão*

Os Inibidores Voláteis de Corrosão (VCIs) são compostos químicos — geralmente sais orgânicos e inorgânicos — que vaporizam e formam uma camada protetora monomolecular sobre superfícies metálicas, inibindo a corrosão em ambientes fechados. Tradicionalmente, esses aditivos atuam por meio de propriedades hidrofóbicas que mantêm um pH alcalino na interface metal-fluido, sendo ideais para armazenamento e transporte de peças. No entanto, suas limitações — como dependência de ambientes herméticos, baixa eficácia em condições úmidas

e toxicidade de alguns compostos restringiam seu uso em fluidos de corte, que operam em sistemas abertos e com alta presença de água (Bastidas; Cano; Mora, 2005; Vorobyova; Skiba; Chygyrynets', 2019).

Para superar essas barreiras, Genovez (2016) desenvolveu o *V-active*® VCI, um novo conceito que utiliza a água como veículo de ativação. Composto por aminas graxas e ácidos carboxílicos, esse inibidor se dissocia em meio aquoso, gerando componentes eletricamente ativos que formam uma camada protetora mesmo em ambientes úmidos ou salinos. Testes demonstraram resultados excepcionais, como:

- Proteção prolongada: Em um tanque de diesel com 0,5% de *V-active*® VCI, não houve corrosão após quatro anos, enquanto amostras sem o aditivo apresentaram oxidação severa.
- Compatibilidade industrial: A camada formada não interfere em processos posteriores (como pintura), atendendo aos padrões da Petrobras.
- Segurança ambiental: Por ser baseado em sais orgânicos, é biodegradável e não tóxico.

A empresa brasileira VCI Brasil incorporou essa tecnologia na linha MV Aqua, fluidos sintéticos que combinam proteção anticorrosiva com refrigeração e lubrificação. Esses fluidos eliminam a necessidade de óleos protetivos pós-usinagem e são promissores para processos de retificação (VCI BRASIL, 2024). Parcerias com o Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) buscam validar seu desempenho em condições reais, avaliando impacto na qualidade da peça e no desgaste de ferramentas.

Dessa parceria surgiram trabalhos como o de Talon et al. (2019), no qual os autores avaliaram um fluido com inibidor volátil de corrosão (*V-active*® VCI) na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 endurecido, utilizando rebolo de óxido de alumínio. Os resultados mostraram que o fluido com VCI superou o convencional em rugosidade superficial (R_a), desgaste do rebolo e emissão acústica, especialmente em altas velocidades de avanço, devido ao seu efeito lubrificante. No entanto, o fluido convencional apresentou melhor desempenho em desvios de circularidade, enquanto o VCI demonstrou capacidade refrigerante inferior. Os autores concluíram que o fluido com VCI é ideal para condições de alta produtividade, além de ser biodegradável, seguro para a saúde e eficaz na proteção contra corrosão, reduzindo etapas pós-usinagem.

Em um estudo complementar, Talon et al. (2020) testaram dois novos fluidos com *V-active*® VCI, incluindo versões de baixo custo e com aditivos de extrema pressão (EP), sob o método convencional de lubrificação. Os fluidos com VCI mantiveram vantagens em rugosidade, desgaste do rebolo e emissão acústica, principalmente em taxas de avanço elevadas, onde a polimerização do inibidor melhorou a lubrificação sob altas temperaturas e pressões. Esses resultados reforçam o potencial do VCI para otimizar processos de retificação severos, combinando desempenho técnico e sustentabilidade.

Por conta disso, o *V-active*® VCI representa um avanço significativo, expandindo o uso de VCIs para aplicações em usinagens mais severas, como a retificação, com vantagens ambientais e operacionais.

2.6.5. *Métodos de aplicação dos fluidos de corte*

Como abordado anteriormente, a retificação é caracterizada pelas altas temperaturas geradas na zona de corte, decorrentes da conversão de energia durante a formação do cavaco em calor. Devido a isso, os fluidos de corte são aplicados na zona de usinagem para minimizar a geração térmica, especialmente na peça, reduzindo o atrito na interface peça-rebolo por meio de sua ação lubrificante e refrigerante (Ruzzi et al., 2020).

Segundo Benedicto; Carou; Rubio (2017), o método convencional de aplicação que opera com vazões típicas de 20 a 100 L/min a pressões abaixo de 1 bar, é amplamente utilizado para garantir refrigeração e lubrificação eficazes (Garcia et al., 2020). No entanto, conforme Demirbas e Kobya (2017), o uso anual de aproximadamente 2 milhões de m³ de óleo de corte (valor que aumenta exponencialmente quando emulsificados em água) expõe cerca de 1,2 milhão de trabalhadores a riscos socioambientais.

Estudos de Bennett (1983) e Hewstone (1994), alertam que a exposição contínua a esses fluidos pode causar danos irreversíveis à saúde. Componentes como formaldeídos, alcalanolaminas e compostos orgânicos voláteis presentes nesses fluidos desencadeiam reações alérgicas cutâneas (responsáveis por 80% dos casos de dermatites ocupacionais) e, quando inalados como névoa, podem levar a doenças pulmonares e até câncer.

O impacto ambiental é igualmente crítico: o descarte inadequado contamina ecossistemas aquáticos e terrestres de forma irreversível. Além disso, a produção e eliminação desses fluidos – seja por sua base petrolífera ou pela necessidade de incineração – emitem quantidades significativas de gases de efeito estufa, agravando problemas climáticos (De Moraes et al., 2019; Pusavec et al., 2010).

Para mitigar esses impactos sociais e ambientais, as empresas arcam com os custos de filtragem e descarte adequado dos fluidos de corte, que podem variar entre US\$ 28–56/m³ para grandes empresas e US\$ 56–113/m³ para pequenas empresas (Debnath; Reddy; Yi, 2014; Demirbas; Kobya, 2017). Como a maioria desses fluidos não é biodegradável, o descarte dos fluidos à base de petróleo exige técnicas de tratamento físico-químico para remover resíduos perigosos — processo que muitas vezes precisa ser supervisionado por agências de proteção ambiental (como a EPA), elevando ainda mais os custos de produção (Shokrani; Dhokia; Newman, 2012).

2.6.6. Alternativas ao método convencional de lubrificação

Como resposta a essas limitações do método com fluido em abundância, diversas alternativas tecnológicas têm sido desenvolvidas e estudadas, buscando proporcionar maior sustentabilidade e eficiência nos processos de usinagem (Benedicto; Carou; Rubio, 2017).

Entre os principais métodos alternativos destaca-se a usinagem a seco, que consiste na completa eliminação do uso de fluidos de corte. Essa abordagem, embora ambientalmente vantajosa e economicamente atrativa, apresenta limitações relacionadas ao aumento da geração de calor na zona de corte, o que pode comprometer a vida útil da ferramenta, a qualidade superficial da peça e a estabilidade dimensional, especialmente na usinagem de materiais de difícil usinagem. Dessa forma, a aplicação da usinagem a seco requer o emprego de ferramentas com alta resistência térmica, elevada dureza e estabilidade química, além de rigoroso controle dos parâmetros de corte (Egea et al., 2018; Klocke; Eisenblaetter, 1997).

Outra alternativa é a refrigeração criogênica, utiliza gases como nitrogênio líquido ou dióxido de carbono, como fluido de corte, para rápida dissipação de calor. Essa técnica prolonga significativamente a vida útil da ferramenta e não gera resíduos, mas apresenta custos elevados e necessidade de equipamentos específicos, sendo mais viável em operações com materiais de difícil usinagem (Benedicto; Carou; Rubio, 2017; Cordes; Hübner; Schaarschmidt, 2014).

Por fim, a mínima quantidade de lubrificação (MQL) tem se consolidado como uma das principais alternativas à lubrificação convencional. Utiliza pequenas quantidades de óleo atomizado em ar comprimido, reduzindo em até 95% o consumo de fluidos. Além de diminuir custos operacionais e impactos ambientais, melhora o acabamento superficial e reduz o desgaste da ferramenta. Entretanto, sua capacidade de resfriamento é limitada, sendo mais adequada para operações onde a lubrificação é mais relevante que o controle térmico. Seu desempenho pode ser potencializado quando combinada com técnicas de refrigeração, como ar frio ou nitrogênio (Bianchi et al., 2013b; Zhang et al., 2016).

Estudos de (Balan; Vijayaraghavan; Krishnamurthy, 2013) demonstram que, quando bem ajustados, os parâmetros de vazão de óleo e pressão de ar no MQL proporcionam redução significativa das forças de corte, da temperatura e da rugosidade superficial, além de prevenir danos térmicos na peça de Inconel 751. Observou-se que menores tamanhos de gotículas, associados a maiores velocidades, favorecem a penetração do fluido na zona de contato, tornando a lubrificação mais eficiente.

Os autores complementam que ainda assim, resultados indicam que o desempenho do MQL é sensível ao equilíbrio entre fluxo e pressão, podendo ser prejudicado por pressões excessivas. De forma geral, quando corretamente aplicado, o MQL proporciona bom controle do atrito, melhora da integridade superficial e desempenho comparável, ou até superior, ao da lubrificação convencional em determinados processos.

Dando continuidade, pesquisas recentes de Shen; Shih; Tung (2008), indicam que a aplicação de nanofluidos no MQL pode potencializar ainda mais seus benefícios. O uso de nanopartículas, como Al_2O_3 e diamante, dispersas no fluido base, contribuiu para a redução das forças de corte, melhora da rugosidade superficial e aumento significativo do G-ratio, indicando menor desgaste do rebolo. Esse desempenho está associado à formação de uma camada de *slurry* densa e resistente na superfície do rebolo, que atua como proteção contra o desgaste e melhora as condições de atrito na interface de corte.

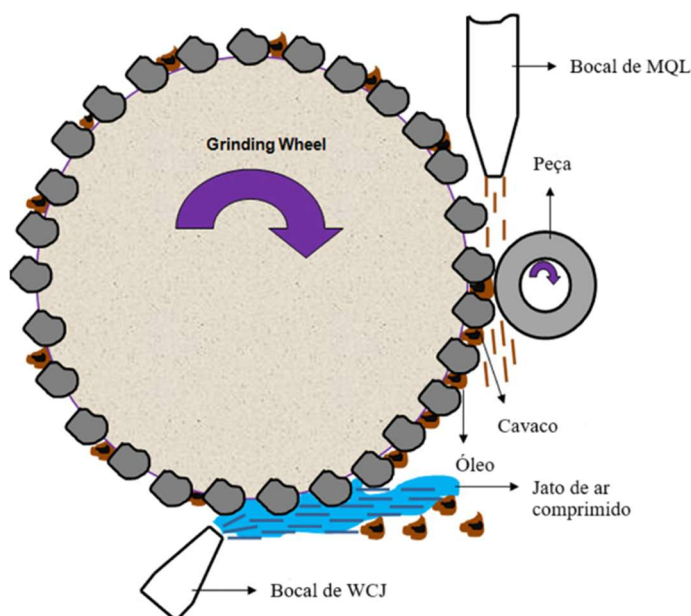
Apesar dessas melhorias, observou-se que o impacto dos nanofluidos na redução da temperatura é limitado, principalmente devido à baixa quantidade de fluido utilizada no MQL. Ainda assim, os ganhos tribológicos — como menor desgaste da ferramenta e melhor qualidade superficial — reforçam o potencial dos nanofluidos como uma evolução da técnica de MQL, especialmente em processos em que a lubrificação desempenha papel mais crítico que a refrigeração (Shen; Shih; Tung, 2008).

Outro problema trazido pelas altas temperaturas é o recobrimento das arestas de corte, que causa o efeito do empastamento. Esse fenômeno ocorre quando os cavacos, aquecidos e amolecidos, aderem aos poros do rebolo, formando uma camada de material que obstrui as arestas cortantes, reduzindo sua eficiência. Como consequência, há aumento das forças de corte, elevação da rugosidade superficial, maiores erros de circularidade e aceleração do desgaste do rebolo (Moretti et al., 2023; Rodriguez et al., 2019b).

Para mitigar esse problema, (Oliveira et al., 2012) implementou um sistema auxiliar de limpeza do rebolo por jato de ar comprimido, integrado ao sistema MQL, como apresentado na Fig. 13. Esse sistema atua diretamente na superfície do rebolo, removendo a mistura de cavacos e óleo que se acumula nos poros abrasivos, prevenindo o empastamento.

Os resultados mostraram que a combinação de MQL com a limpeza do rebolo, especialmente com o jato de ar aplicado em um ângulo de 30°, proporcionou significativa melhora na qualidade superficial, na precisão geométrica e na redução do desgaste do rebolo. As condições com limpeza apresentaram valores de rugosidade e erros de circularidade iguais ou inferiores aos obtidos com lubrificação convencional por fluido abundante, além de garantir menores níveis de emissão acústica e preservar a integridade superficial da peça. Isso demonstra que a adição do sistema de limpeza torna o MQL ainda mais eficiente, permitindo sua aplicação em condições mais severas de remoção de material sem prejuízo à qualidade do processo (Oliveira et al., 2012).

Figura 13 – Aplicação do sistema de limpeza do rebolo (WCJ).



Fonte: Oliveira et al. (2012), adaptado.

2.7. Aço ABNT 4340

O material usinado no presente trabalho foi o aço liga cromo-níquel-molibidênio de médio teor de carbono, ABNT 4340, temperado e revenido, de composição química padronizada pela norma ABNT NBR 13709 (1996), apresentada na Tabela 2.

O aço ABNT 4340 destaca-se por sua combinação excepcional de alta resistência mecânica, tenacidade e temperabilidade, aliada a um custo competitivo em comparação a outros aços-liga. Essas características o tornam material preferencial para componentes estruturais críticos em setores como automotivo, aeronáutico, petrolífero e naval, onde é empregado na

fabricação de virabrequins, eixos, engrenagens, trens de pouso, cilindros e parafusos (Hasçalik; Ünal; Özdemir, 2006; Özdemir, 2005). Após os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, sua microestrutura predominante é a martensita revenida, que confere a resistência necessária para aplicações sob altas cargas. Durante a fabricação desses componentes, o processo de retificação é frequentemente utilizado para garantir precisão dimensional e acabamento superficial adequado. Sua versatilidade e desempenho mecânico justificam seu uso generalizado em ambientes que demandam confiabilidade estrutural e durabilidade (Sato et al., 2018).

Tabela 2 – Composição química e variações permissíveis do aço ABNT 4340.

Composição química		Variação permissível
Elemento	Teor em massa (%)	
Carbono	0,38 – 0,43	± 0,02
Manganês	0,65 – 0,85	± 0,03
Fósforo	0,025 máx.	+ 0,005
Enxofre	0,025 máx.	+ 0,005
Silício	0,15 – 0,35	± 0,02
Cromo	0,70 – 0,90	± 0,03
Molibdênio	0,20 – 0,30	± 0,02
Níquel	1,65 – 2,00	± 0,05
Cobre	0,35 máx.	+0,03

Fonte: ABNT NBR 13709 (1996), adaptado.

2.8. Variáveis de saída do processo de retificação

2.8.1. Rugosidade

A rugosidade superficial constitui um dos parâmetros mais relevantes para a qualidade de componentes usinados, particularmente em processos de retificação que garantem elevado acabamento superficial e precisão dimensional (Malkin; Guo, 2008; Oliveira et al., 2009). Como etapa final em diversas cadeias produtivas, a retificação confere às superfícies propriedades essenciais para o desempenho funcional das peças, incluindo maior resistência à fadiga, vida útil prolongada e redução de atrito entre componentes em movimento (Beretta; Romano, 2017; Oliveira et al., 2009).

A capacidade de prever a qualidade superficial antes mesmo da usinagem, com base nas variáveis de entrada, oferece vantagens significativas em termos de redução de custos, diminuição do tempo de ciclo e menor necessidade de retrabalho ou descarte de peças. Dessa forma, compreender como parâmetros como velocidade de corte, taxa de avanço, profundidade de corte e outros fatores influenciam o processo de retificação torna-se essencial para otimização da produção (Shahabi; Ratnam, 2010).

Segundo Malkin e Guo (2008), as características do rebolo também influenciam significativamente a rugosidade superficial. Isso ocorre porque ferramentas com topografias mais irregulares tendem a gerar peças com maior rugosidade. Esse efeito é causado por dois fatores principais: (1) a distribuição desigual de material abrasivo na superfície do rebolo, que produz marcas inconsistentes na peça, e (2) as vibrações induzidas no sistema de usinagem devido a essa irregularidade.

Puerto et al. (2013) complementam que, além das características do rebolo e das condições de usinagem, a operação de dressagem desempenha um papel crucial na qualidade da peça usinada. Isso porque este é o processo responsável por definir o perfil geométrico e a topografia ativa do rebolo, fatores que influenciam diretamente nas características superficiais do componente final.

Ademais, a qualidade da lubrificação durante a usinagem é decisiva no processo de retificação, uma vez que se estas não forem satisfatórias, mais calor será gerado na zona de corte, podendo causar danos térmicos a peça, erros geométricos e deterioração da qualidade superficial, alterando assim os padrões de rugosidade (De Martini Fernandes et al., 2019; Malkin; Guo, 2007).

O parâmetro Ra (média aritmética da rugosidade) é amplamente utilizado para avaliar a qualidade superficial em retificação, pois esta influencia diretamente características críticas como tolerâncias, lubrificação e vida útil da peça. Embora superfícies ideais apresentem sulcos regulares e material deslocado lateralmente, na prática observam-se também marcas de fratura térmica e outras irregularidades, tornando a caracterização topográfica completa um desafio complexo (Hecker; Liang, 2003).

2.8.2. *Circularidade*

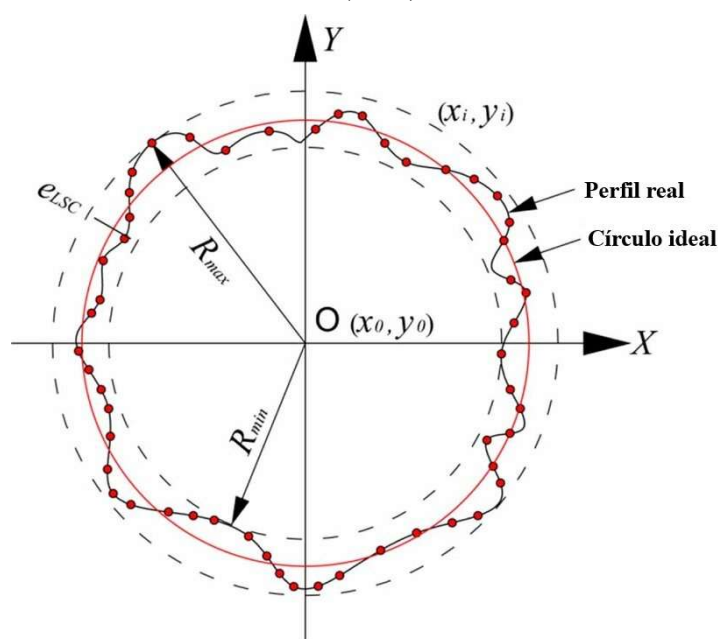
Segundo Sui; Zhang (2012), uma das maneiras de determinar o erro de circularidade é através do ajuste de um círculo ideal ao perfil real da peça, de forma que a soma dos quadrados das distâncias radiais entre os pontos do perfil e esse círculo seja a menor possível. Com base neste círculo ideal, traçam-se dois outros círculos: um circunscrito (externo, que envolve todo

o perfil) e um inscrito (interno, tangente ao perfil), conforme mostrado na Fig. 14. A diferença entre os raios desses dois círculos define o valor do erro de circularidade da peça.

Este tipo de análise é necessário, uma vez que a retificação é reconhecida por sua precisão geométrica e normalmente utilizada para gerar superfícies de referência na cadeia produtiva. O processo do erro pode estar relacionado a diversos fatores, como as condições de retificação, danos térmicos, resistência mecânica, fluxo do fluido de corte e pressão aplicada. (Hadam et al., 2012; Malkin; Guo, 2008).

Além disso, os desvios de circularidade representam um fator crítico na retificação cilíndrica, pois estão diretamente associados a fenômenos como a deflexão elástica do sistema ferramenta-peça, irregularidades no perfil do rebolo e variações na taxa de remoção de material — todos potenciais geradores de erros geométricos. Contudo, a adoção de estratégias como um tempo de *spark-out* otimizado e um processo de dressagem criterioso pode mitigar significativamente essas imperfeições no rebolo, assegurando maior precisão dimensional (Lopes et al., 2018).

Figura 14 – Erro de circularidade conforme o método de círculos de mínimos quadrados (LSC).



Fonte: Yang et al. (2023), adaptado.

Um dos motivos diretos para a variação da taxa de remoção do material é o empastamento da ferramenta. Esse fenômeno ocorre quando os cavacos aderem às arestas de corte do rebolo, recobrando seus grãos abrasivos e inibindo sua capacidade de usinagem. Como consequência, gera-se uma remoção irregular de material e um aumento significativo do atrito

na zona de corte. Esse atrito elevado provoca picos de temperatura que levam à expansão térmica localizada e à deformação do material, agravando ainda mais os desvios de circularidade (Lopes et al., 2020b).

2.8.3. *Desgaste diametral do rebolo*

O processo de desgaste da ferramenta é um acontecimento inerente de qualquer processo de usinagem (Rowe, 2013). Na retificação, em específico, esse processo decorre de três diferentes fenômenos, (1) atrito entre a peça e o grão abrasivo, (2) fratura do grão e (3) fratura do ligante, sendo que a taxa de ocorrência de cada acontecimento varia conforme o esforço ao qual a ferramenta é submetida e a lubrificação do processo (Francelin et al., 2018; Sato et al., 2018).

O desgaste da ferramenta pode ser expresso pela relação G , definida pela razão entre volume de material removido (Z_W) em relação ao volume desgastado do rebolo (Z_S), por consequência, esta relação indica o desempenho do rebolo durante a usinagem. A relação G pode ser determinada em termos matemáticos, segundo Lauer-Schmaltz; König (1980), pela Equação (2.11) a seguir:

$$G = \frac{Z_W}{Z_S} \quad (2.11)$$

Segundo Lopes et al. (2020a), em seu estudo sobre retificação de aço austemperado utilizando diferentes técnicas de MQL, a eficiência do sistema de lubrificação no controle da temperatura na zona de corte é fundamental para prolongar a vida útil do rebolo. Isto porque o aumento excessivo de temperatura provoca a degradação das propriedades físicas do material da ferramenta, especialmente do ligante, resultando no desprendimento prematuro dos grãos abrasivos devido à severidade do processo. No mesmo estudo, os autores estabelecem uma correlação entre a friabilidade dos grãos de CBN e o desgaste acelerado da ferramenta. Por definição, a friabilidade refere-se à capacidade do grão abrasivo de se fragmentar e gerar novas arestas de corte. Consequentemente, rebolos com maior friabilidade tendem a apresentar perda de material mais acentuada durante a usinagem.

Ademais, segundo (McDonald; Bauer; Warkentin, 2016), os métodos para quantificar o desgaste de rebolos podem ser divididos entre técnicas diretas e indiretas. As diretas incluem medições por contato (com perfilômetros) ou sem contato (como microscopia ótica/eletrônica, que exige remoção da amostra). Já as indiretas abrangem desde a impressão do perfil em corpos

de prova de aço ABNT 1020 até métodos não invasivos, como *scanners* de alta resolução com inteligência artificial ou monitoramento em tempo real via sinais de emissão acústica, potência e vibração.

2.8.4. Potência elétrica consumida

O monitoramento da potência elétrica consumida constitui uma técnica não destrutiva e de fácil implementação que fornece dados relevantes sobre o processo de retificação, baseando-se na conversão dos sinais de corrente e tensão elétrica do motor da retificadora em valores de potência, permitindo assim estimar tanto as forças quanto as temperaturas na interface de corte (Bianchi et al., 2018a; Kuppuswamy et al., 2021).

Outros parâmetros de usinagem também podem interferir na potência de consumida, segundo Kwak; Sim; Jeong (2006), a rotação da peça, a velocidade de corte do rebolo e a profundidade de corte são fatores que afetam o consumo energético do processo. Dentre esses parâmetros, a profundidade de corte apresenta a maior influência, conforme demonstrado em seu estudo, no qual este fator impactou o consumo de potência mais significativamente do que o aumento da velocidade transversal.

Sutowski; Święcik (2018) complementam que o aumento da área de contato entre rebolo e peça, resultado do aumento da profundidade de corte, faz com que as forças de corte normal e tangencial se elevem, exigindo maior potência para a formação do cavaco.

De acordo com Malkin e Guo (2007), o aumento da temperatura na interface de corte também pode elevar a potência consumida, uma vez que temperaturas excessivas podem causar danos à superfície usinada, como a queima branca - fenômeno que altera a microestrutura do material e sua microdureza, exigindo maior esforço da máquina para realizar o corte.

Nesse contexto, Wang et al. (2024), desenvolveram um sistema de monitoramento inteligente para otimizar tanto a eficiência energética quanto a qualidade do processo de retificação. O sistema utilizou dados de potência, vibração e temperatura monitorados em tempo real para ajustar automaticamente até 75 parâmetros operacionais, mantendo assim o rebolo em condições ideais de trabalho. Conforme os autores, essa abordagem permitiu identificar com precisão o desgaste da ferramenta abrasiva e preveniu danos térmicos à peça, resultando em economia energética e aumento da vida útil da ferramenta. Ademais, (Yan et al., 2024), enfatizam a relevância do acompanhamento do consumo energético para avaliar a sustentabilidade em operações de usinagem, considerando tanto os efeitos ambientais quanto os gastos relacionados ao consumo de energia elétrica.

2.8.5. *Emissão acústica*

A evolução tecnológica e a exigência por maior eficiência operacional impulsionaram a implementação de sistemas de monitoramento contínuo nos processos industriais, assegurando tanto sua confiabilidade quanto a aderência às especificações técnicas (Hao; Ramalingam; Klamecki, 2000). Embora os protocolos de aquisição de dados apresentem variações processuais, as técnicas não destrutivas emergem como alternativa prioritária, dado o comprovado desempenho dos sensores de avaliação não destrutiva (NDE) no monitoramento em tempo real de operações de conformação e outros processos críticos (Hao; Ramalingam; Klamecki, 2000; Jayakumar et al., 2005).

Dentre as técnicas de controle disponíveis, a emissão acústica (EA, do inglês Acoustic Emission - AE) se destaca significativamente devido à sua capacidade de monitoramento em tempo real dos processos industriais (Jayakumar et al., 2005). Essa característica foi determinante para a consolidação da técnica no setor manufatureiro, no qual vem sendo amplamente aplicada em operações de usinagem, particularmente pelo seu potencial em monitorar tanto as condições de corte quanto os parâmetros do processo (Strömbergsson et al., 2017).

Pesquisas recentes realizadas por Alexandre et al. (2018) e Arun et al. (2018) demonstram que, no contexto específico da retificação, os sinais de emissão acústica são gerados por múltiplos fenômenos, incluindo deformações materiais, distorções dos planos cristalinos, formação e propagação de trincas, transformações de fase, atrito na zona de corte e deformações na peça de trabalho. Desse modo, a análise desses sinais torna-se essencial quando ocorrem alterações nos fluidos de corte do processo, como é o caso do presente estudo.

2.8.6. *Custo e poluição*

Diante das crescentes pressões políticas e sociais em escala global, a indústria enfrenta a necessidade urgente de transformar seus processos produtivos rumo a modelos ambientalmente sustentáveis. Essa transição está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, em especial os ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis). Essa convergência de objetivos demonstra como a sustentabilidade tornou-se um pilar estratégico indispensável para a indústria do século XXI, onde competitividade e responsabilidade ambiental devem caminhar juntas (Lopes et al., 2023).

Na indústria de manufatura, um dos principais desafios atuais é a substituição dos fluidos de corte por alternativas mais sustentáveis. Esse problema ganha relevância quando consideramos três fatores críticos: primeiro, conforme demonstrado por Fang et al. (2011), cerca de 85% da energia elétrica consumida durante a usinagem é destinada aos sistemas auxiliares, como os de recirculação e bombeamento de fluidos de corte; segundo, a produção global ainda depende em 60% de combustíveis fósseis para geração de energia; e terceiro, os fluidos de corte convencionais apresentam alto impacto ambiental tanto em sua produção quanto no descarte. Diante desse cenário, a otimização desses sistemas tornou-se um dos focos prioritários para a indústria (Daniel et al., 2023; “Global Energy Review 2025 – Analysis - IEA”, [S.d.]).

Nesse cenário, diversas técnicas sustentáveis foram desenvolvidas, como a usinagem a seco, o uso de fluidos criogênicos e lubrificantes sólidos. Entre essas alternativas, as técnicas com mínima quantidade de lubrificante (MQL) destacaram-se por reduzirem drasticamente o consumo de fluido, de 50 – 1000 l/h para apenas 0,01 – 2 l/h, minimizando assim o impacto ambiental de forma significativa (Benedicto; Carou; Rubio, 2017).

No entanto, como destacado por Lopes et al. (2023), para que ocorra uma efetiva transformação na indústria, além das pressões políticas, as novas alternativas precisam demonstrar viabilidade financeira, tornando essencial a avaliação de custos nos diferentes cenários de usinagem. Field; Kegg; Buescher (1980) desenvolveram modelos para análise de custos em operações de retificação, considerando onze fatores principais - embora esses modelos não tenham incluído os custos associados aos fluidos de corte.

Nesse contexto, Klocke; Eisenblaetter (1997) revelaram dados significativos na indústria automotiva alemã, onde os fluidos de corte representaram de 7% a 17% dos custos totais, enquanto as ferramentas corresponderam a apenas 2% a 4%. Essa ampla variação decorre de múltiplos parâmetros processuais, como o tipo de máquina e operação, o material da peça, a qualidade requerida, o tipo de fluido utilizado e seu processamento e descarte, entretanto fica evidente o peso significativo dos fluidos na estrutura de custos e o potencial para reduções expressivas mediante avanços tecnológicos e pesquisas aplicadas nessa área.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção compila todos os equipamentos e materiais utilizados durante a pesquisa, assim como uma descrição dos procedimentos aplicados para a obtenção dos parâmetros de entrada e variáveis de saída analisados durante e após a execução dos testes de usinagem.

Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão – LUA, do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, campus Bauru/SP.

3.1. Equipamentos e materiais

3.1.1. Retificadora

O processo de retificação foi conduzido numa retificadora cilíndrica externa de mergulho, da marca Sulmecânica, modelo RUAP515H, modificada para funcionar com um comando numérico computadorizado (CNC), produzido pela empresa Fagor, acoplado ao acionamento do eixo “X” da máquina.

Durante os ensaios, foram utilizadas duas programações em comando G distintas, para o acionamento do CNC. Uma para a realização dos ensaios e outra para a impressão do perfil do rebolo após a usinagem, apresentadas respectivamente no Apêndice A: Programa para retificação dos corpos de prova e Apêndice B: Programa para impressão do desgaste do rebolo.

3.1.2. Rebolo

A ferramenta escolhida para ser utilizada nos testes foi um rebolo convencional com grãos de óxido de alumínio (Al_2O_3), de ligante vitrificado, com uma granulação de 150 mesh, cedido pela empresa Norton Abrasivos Ltda. – Saint-Gobain ao Laboratório de Usinagem e Abrasão – LUA, modelo 38Al50L6V. A ferramenta, antes da usinagem, contava com um diâmetro externo de 350 mm, diâmetro interno de 127 mm, e uma espessura de 25,4 mm.

3.1.3. Dressagem

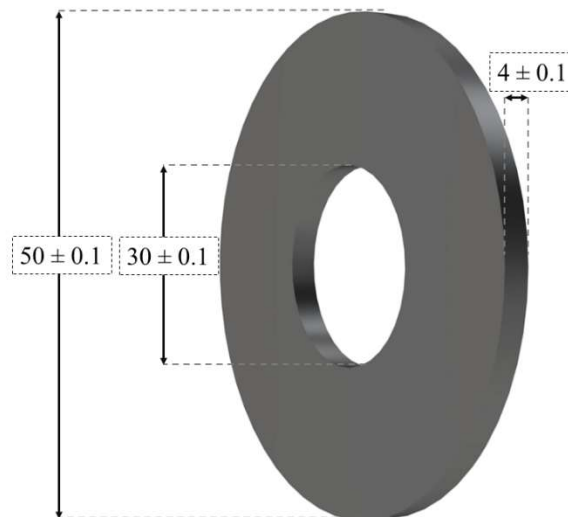
O procedimento de dressagem da ferramenta era efetuado após o processo de impressão da superfície do rebolo em metal de baixa dureza, utilizando um dressador conglomerado multigranular, fabricado pela Master Diamond. Este tipo de ferramenta possui formato paralelepípedo, de dimensões 15 mm x 8 mm x 10 mm, com diamantes afiados incrustados numa matriz metálica.

As condições durante a dressagem foram: velocidade de corte (v_s) = 30 m/s, velocidade de dressagem (v_d) = 500 mm/min, profundidade de dressagem por passe (a_d) = 4 μ m, ao longo de 50 passes, com uma profundidade de dressagem total de 200 μ m.

3.1.4. *Corpos de prova*

Os corpos de prova possuíam formato anelar, com diâmetro externo de $50 \pm 0,1$ mm, diâmetro interno de $30 \pm 0,1$ mm e espessura de $4 \pm 0,1$ mm, conforme a Fig. 15. As peças foram produzidas a partir de um cilindro de aço ABNT 4340, passando por um processo de serragem e torneamento para obterem a forma final desejada para os ensaios.

Figura 15 – Dimensões do corpo de prova (em milímetros).



Fonte: Autor, 2025

A composição química do material dos corpos de prova foi auferida através de um espectrômetro de emissão óptica, modelo Metal Lab 78-80J, produzido pela GNR Brasil, os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química do aço ABNT 4340.

Elemento	C	Si	Cr	P	Ni	Mn	Mo	S
(% em massa)	0,40	0,18	0,65	0,03	0,75	0,26	0,20	0,04

Fonte: Autor, 2025.

Com as peças finalizadas, os corpos de prova foram enviados para a empresa JSC Tratamento Térmico em Metais Ltda., onde passaram por um processo de tratamento térmico

com o objetivo de aumentar sua dureza. Inicialmente, foram submetidos à têmpera, sendo aquecidos a 845 °C por 60 minutos para austenitizar toda a sua estrutura interna. Em seguida, foram resfriados em óleo à temperatura ambiente, resultando em uma microestrutura predominantemente martensítica. Posteriormente, as peças passaram por um processo de revenimento, com a finalidade de aliviar as tensões internas e reduzir a fragilidade. Para isso, foram aquecidas a 350 °C por 120 minutos e, então, deixadas resfriar naturalmente, obtendo-se uma estrutura de martensita revenida.

As peças também foram analisadas conforme sua dureza, antes e depois do processo de tratamento térmico. Ao todo foram realizadas cinco medições em cada peça, seguindo as orientações da norma ASTM E18-08b, utilizando do método Rockwell, escala C (HR_C). Os valores médios dos resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dureza média dos corpos de prova – antes e depois dos tratamentos térmicos.

Condição	Dureza
Aço ABNT 4340 – Pré tratamento térmico	21 HR _C (243 HV)
Aço ABNT 4340 – Após tratamento térmico	58 HR _C (653 HV)

Fonte: Autor, 2025

Ao todo, foram fabricadas 27 peças, três para cada cenário de retificação distinto, de modo a aumentar a confiabilidade dos resultados de cada situação de usinagem.

3.2. Sistemas de lubrificação

A seguir, serão descritos os três diferentes cenários de lubrificação utilizados durante os ensaios, assim como seus parâmetros de entrada e fluidos de corte utilizados.

3.2.1. Fluidos de corte

Ao longo da pesquisa, foram testados três diferentes fluidos de corte, todos aplicados por meio das distintas técnicas de lubrificação. Os fluidos utilizados foram os óleos emulsionáveis sintéticos Grindex 10, fabricado pela Blaser Swissslube AG, e MV Aqua 100 e MV Aqua 182, ambos produzidos pela VCI Brasil.

O óleo Grindex 10 é amplamente reconhecido pela indústria por sua confiabilidade e eficiência, sendo, portanto, adotado como fluido padrão para fins de comparação. Por sua vez, os fluidos da VCI Brasil incorporam uma nova classe de inibidores voláteis de corrosão, denominada *V-active®* VCI, e constituem o foco deste estudo. O fluido MV Aqua 100 será

referido como VCI, enquanto o MV Aqua 182 será denominado VCI+EP, em razão da presença de um aditivo de extrema pressão em sua composição. As principais propriedades de cada fluido se encontram na Tabela 5.

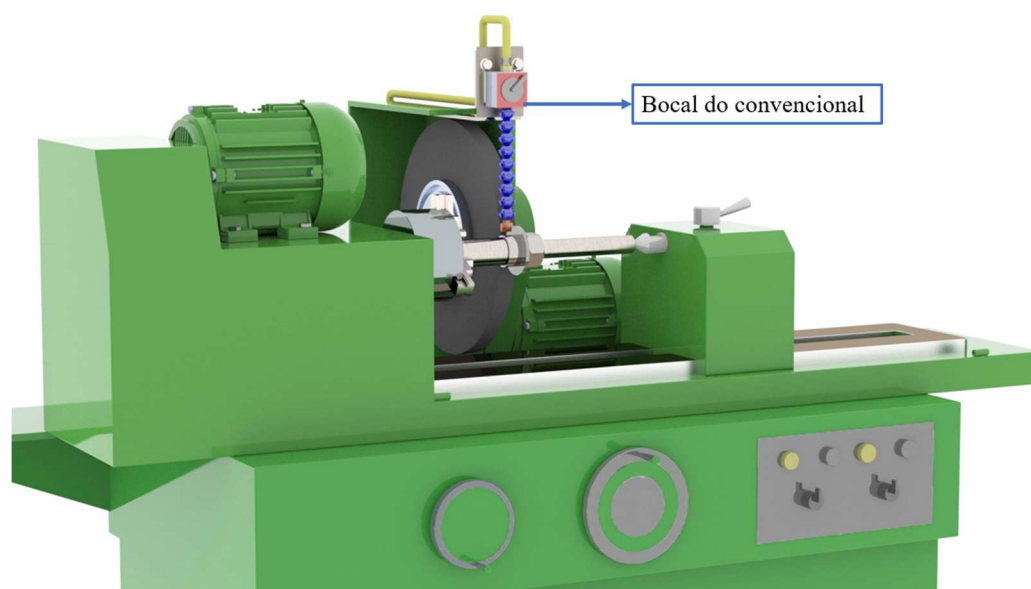
Tabela 5 – Propriedades dos fluidos de corte.

Propriedade	Fluido de corte		
	Grindex 10	MV Aqua 100	MV Aqua 182
Tipo	Sintético	Sintético	Sintético
Cor	Amarelada, marrom claro	Amarelo	Amarelo
Densidade a 20 °C	1,12	1,06	1,04
pH	8,7 – 9,9	9,2	8,0 – 9,0
Viscosidade a 20 °C	27,77	23,85	15,00

Fonte: (Iavarone, 2024).

3.2.2. Sistema de lubrificação convencional

Figura 16 – Representação da montagem do bocal para o sistema do método convencional.



Fonte: Autor, 2025

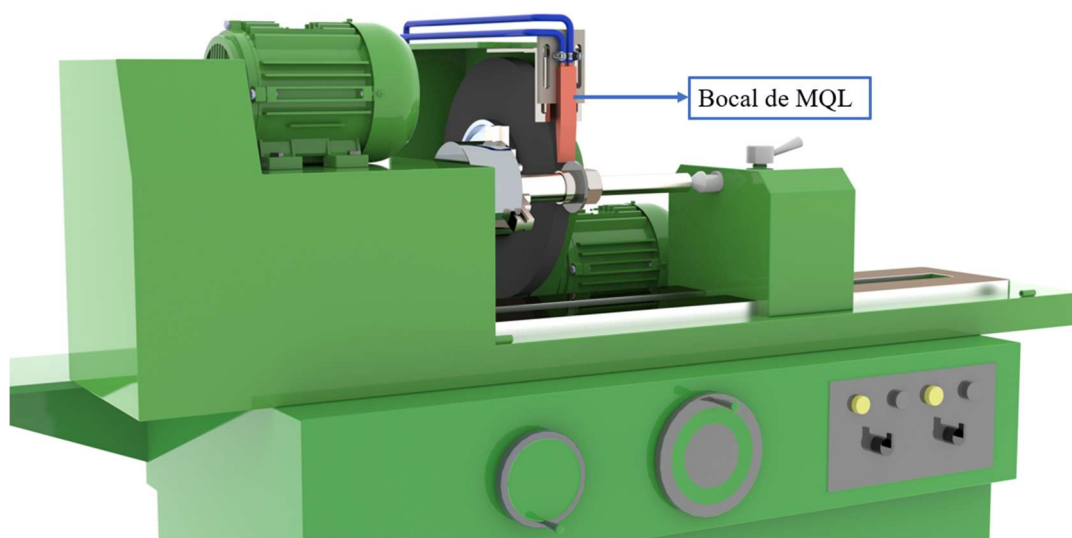
O sistema convencional de lubrificação, era constituído por um reservatório de fluido com capacidade para 100 litros, uma bomba centrífuga, um medidor de vazão do tipo turbina, modelo SVTG DMY-2030, da marca Contech, válvulas de esfera, mangueiras e bocais

de aplicação. O controle da vazão era feito por meio das válvulas de esfera, posicionadas tanto na entrada do medidor de vazão quanto antes do bocal. Os bocais de aplicação do fluido utilizados foram os originais da retificadora, do tipo Fixoflex, com seção circular de 6,3 mm de diâmetro, a montagem é mostrada na Fig. 16.

Os três diferentes fluidos, Base, VCI e VCI+EP, foram emulsificados em água, numa concentração de 3%, conforme recomendado pelos fabricantes, sendo aplicados sobre a zona de corte a uma vazão de 17 l/min, e pressão de 0,4 MPa.

3.2.3. Sistema de mínima quantidade de lubrificante

Figura 17 – Representação da montagem do bocal para o sistema de MQL.



Fonte: Autor, 2025

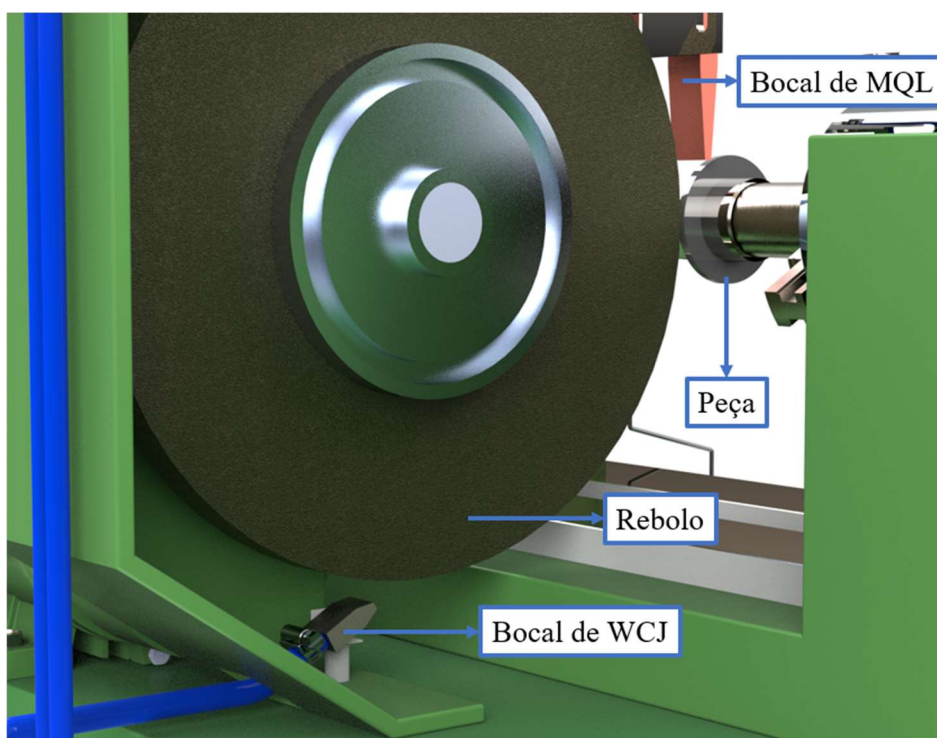
O sistema de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) utiliza ar comprimido em alta pressão para pulverizar o óleo diretamente na zona de corte. Para isso, um bocal especial, mostrado na Fig. 17, é posicionado próximo à área de usinagem e conectado a um misturador de ar e óleo. Todo o conjunto é fornecido pela empresa ITW Chemical Products Ltda., modelo ITW Accu-Lube 79053D. O sistema é alimentado por um compressor de ar comprimido, com filtro instalado na saída, e conectado por mangueiras ao misturador.

Os fluidos utilizados no sistema MQL foram aplicados em sua forma pura, ou seja, sem diluição, com vazão de 0,02 l/min. A vazão de ar no bocal foi ajustada para 0,85 m³/min, e o fluido foi aplicado sob pressão de 0,8 MPa. Devido à baixa quantidade de óleo usado, não havia a necessidade de sistemas de recirculação ou coleta do fluido.

3.2.4. Sistema de mínima quantidade de lubrificante com limpeza

Para a aplicação da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante com sistema auxiliar de limpeza do rebolo por jato de ar (MQL+limpeza), além do conjunto previamente montado para o MQL, foi adicionado um bocal posicionado a 1,0 mm do rebolo, com ângulo de incidência de 30°, como na Fig. 18. Esse bocal foi conectado a uma mangueira de ar comprimido, operando sob pressão de 0,8 MPa. Como resultado, a vazão total de ar comprimido no sistema foi elevada para 1,982 m³/min. De acordo com Oliveira et al. (2012) esses parâmetros correspondem à configuração ideal do sistema de limpeza do rebolo, promovendo os melhores resultados no processo de retificação.

Figura 18 – Representação da montagem do bocal de limpeza do rebolo (WCJ).



Fonte: Autor, 2025

3.3. Procedimento de ensaio e parâmetro de entrada

Os ensaios realizados consistiram em retificação cilíndrica externa de mergulho, com variação da técnica de lubrificação (Convencional, MQL e MQL+limpeza) e do fluido de corte (Grindex 10, MV Aqua 100 e MV Aqua 182). Os demais parâmetros de usinagem foram mantidos constantes, totalizando nove combinações distintas de processamento. Para cada condição, foram realizadas três repetições, resultando em 27 corpos de prova retificados, a fim

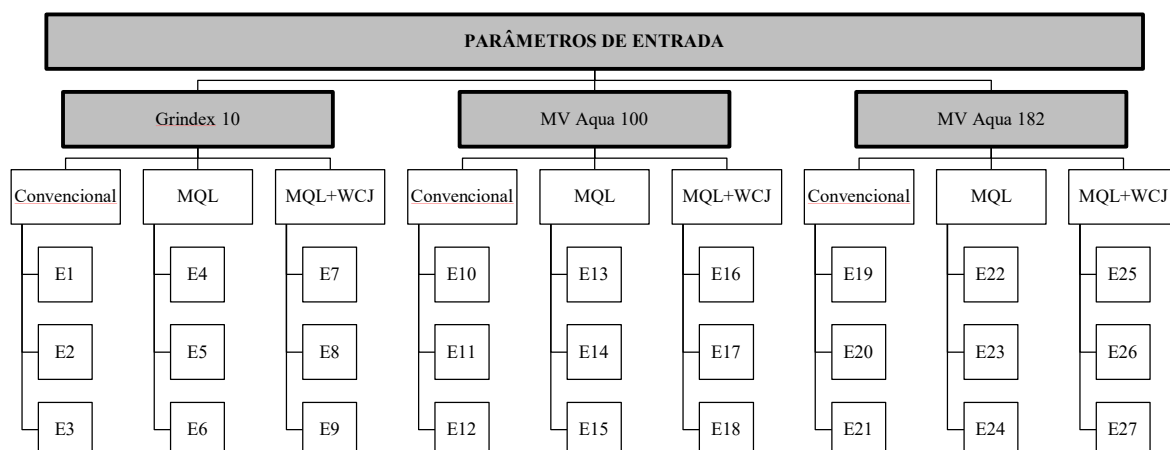
de garantir maior confiabilidade estatística aos resultados obtidos. A matriz experimental é apresentada na Fig. 19, enquanto as condições específicas de usinagem estão detalhadas na Tabela 6. O código utilizado na programação CNC encontra-se no Apêndice A: Programa para retificação dos corpos de prova. Os parâmetros de corte foram definidos a partir de trabalhos anteriores, desenvolvidos por Talon et al. (2020) e Javaroni et al. (2020b).

Tabela 6 – Parâmetros de entrada do processo de usinagem.

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
a_d	Avanço radial total na dressagem	0,20	mm
a_e	Avanço radial na peça de trabalho	2,50	mm
b_s	Largura do rebolo	25,0	mm
b_w	Largura da peça de trabalho	4,00	mm
D_s	Diâmetro externo do rebolo	350,0	mm
d_{min}	Diâmetro mínimo do rebolo	295,59	mm
d_w	Diâmetro externo da peça de trabalho	75,0	mm
t_{so}	Tempo de centelhamento (<i>spark-out</i>)	0,083	min
ω	Rotação do rebolo	183,78	rad/s
N_d	Número de peças usinadas entre cada dressagem	2	-
R	Distância de avanço rápido	300,0	mm
r	Velocidade de aproximação e recuo rápidos	36000	mm/min
v_f	Velocidade de avanço	0,75	mm/min
V	Volume de material removido em uma peça durante a retificação	2277,65	mm ³
k_p	Proporção de diluição – <i>Flood</i> / MQL (todos)	0,03 / 1	-
P_{ar}	Potência do compressor de ar – MQL (todos)	5500	W
P_{bo}	Potência da bomba de óleo - <i>Flood</i>	372,85	W
v_{jet}	Vazão do fluido – <i>Flood</i> / MQL (todos)	10 / 0,002	l/min
N_c	Número de recirculação do fluido – <i>Flood</i>	10	-

Fonte: Autor, 2025.

Figura 19 – Matriz de ensaios.



Fonte: Autor, 2025.

Para a realização dos ensaios de retificação, o rebolo foi, primeiramente, balanceado, instalado na retificadora e dressado conforme os parâmetros indicados na Tabela 6. Em seguida, o corpo de prova foi posicionado e fixado pela sua lateral a um eixo, sendo montado na retificadora por meio de um sistema entre pontas. O rebolo foi então aproximado da peça até o primeiro contato e, posteriormente, recuado 0,1 mm na direção radial. Após esse procedimento, os sistemas de aquisição de emissão acústica e de consumo de potência elétrica foram ativados, e a retificadora foi acionada com a técnica de lubrificação selecionada, dando início ao processo de retificação.

Cada ensaio foi composto por 40 ciclos, com profundidade de corte de 0,1 mm por ciclo, totalizando 4 mm de redução no diâmetro da peça. Entre cada ciclo, foi aplicado um tempo de centelhamento (*spark-out time*) de 5 segundos. Ao término de cada ensaio, a peça foi removida, identificada com o auxílio de um gravador com ponta de aço temperado, de acordo com a condição de teste aplicada, e, posteriormente, limpa e armazenada para análises futuras.

Como a largura do rebolo excedia a da peça, foi possível realizar dois ensaios consecutivos utilizando a mesma região da superfície de corte, apenas ajustando a posição relativa entre ferramenta e peça. Dessa forma, a cada dois ensaios, o perfil desgastado do rebolo era impresso em um corpo de prova de aço ABNT 1020, escolhido por sua baixa dureza, com o objetivo de possibilitar a análise posterior do desgaste diametral. Em seguida, o rebolo era novamente dressado, garantindo que a superfície de corte iniciasse os testes sempre com a mesma condição. A programação CNC utilizada para a impressão do perfil desgastado encontra-se no Apêndice B – Programa para impressão do desgaste do rebolo.

3.4. Variáveis de saída e coleta de dados

Nesta seção serão apresentados os mecanismos utilizados para a coleta e análise dos dados das variáveis de saída do processo de usinagem, sendo eles rugosidade superficial (R_a), circularidade, desgaste diametral do rebolo, potência consumida, emissão acústica, custo e poluição. Todas as medições foram realizadas em ambiente com temperatura controlada.

3.4.1. Rugosidade superficial

A rugosidade da superfície retificada foi medida com o auxílio de um rugosímetro portátil modelo Surtronic 3⁺, em conjunto com o software TalyProfile Lite 3.1.4, ambos da marca Taylor Hobson. O equipamento possui um apalpador com ponta de diamante de 5 μm de raio, resolução de 0,01 μm e opera com carga variando entre 150 e 300 gf. A comunicação com o microcomputador é realizada por meio de interface RS232, que permite a coleta e processamento dos dados.

O rugosímetro é capaz de realizar medições dos parâmetros R_a , R_y , R_z e R_q , sendo possível configurar o comprimento de amostragem (*cut-off*) e o número de *cut-offs* por medição. Neste estudo, foi utilizado o parâmetro R_a (rugosidade média aritmética). O equipamento foi previamente aferido e calibrado, sendo configurado com *cut-off* de 0,25 mm, comprimento de amostragem de 1,25 mm e filtro Gaussiano. O apalpador foi posicionado de forma a realizar as medições no sentido axial da peça.

Antes das medições, os corpos de prova foram limpos seguindo uma sequência de banhos com líquidos de crescente volatilidade: querosene, thinner, álcool etílico P.A. e álcool metílico P.A.. Para a medição, cada corpo de prova foi fixado em um eixo apoiado sobre um bloco em “V”. Foram realizadas 10 medições por peça, distribuídas em regiões distintas e equidistantes. A partir desses dados, foram calculados a média aritmética e o desvio padrão de cada amostra.

3.4.2. Circularidade

A medição dos desvios de circularidade foi realizada utilizando o equipamento Talyrond 31C, do fabricante Taylor Hobson, previamente calibrado. O instrumento possui precisão de 0,03 μm e capacidade máxima de medição de peças com 370 mm de diâmetro e 225 mm de altura. É composto por um conjunto de braço e coluna móvel, que permite deslocamentos nos eixos vertical e horizontal. A mesa giratória é alimentada por um sistema de

ar comprimido, garantindo um movimento rotacional constante e suave. A pressão do sistema é ajustada por meio de um registro e filtro de ar instalados antes da entrada no equipamento.

Para a fixação da peça, utilizou-se uma placa de três castanhas, garantindo uma fixação segura. A linha central de rotação foi ajustada de forma perpendicular à face da peça, passando pelo centro geométrico determinado a partir de dois diâmetros perpendiculares no plano da face. Na extremidade do braço do equipamento está localizado o apalpador com ponta de rubi, componente sensível que realiza o contato direto com a superfície da peça para a obtenção dos dados de circularidade.

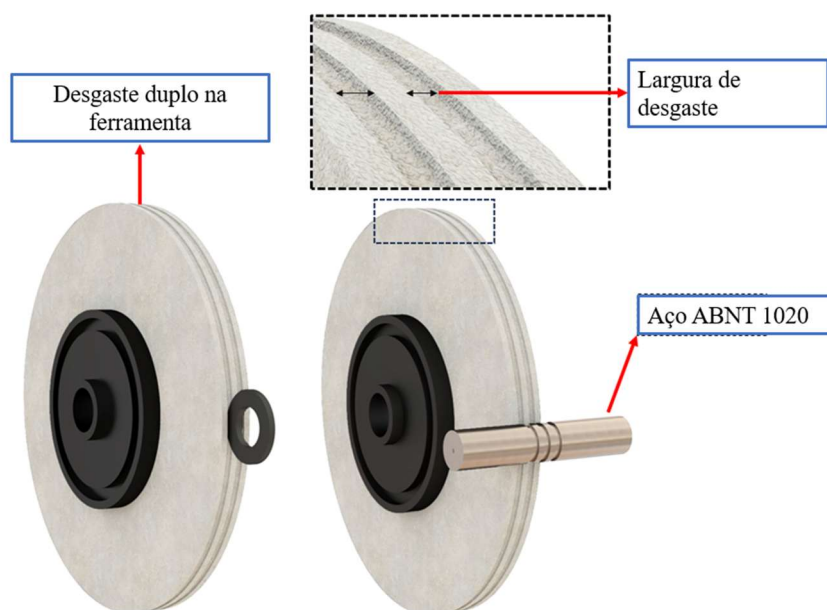
Antes das medições, as amostras passaram por uma sequência de banhos de limpeza, semelhante à utilizada nas medições de rugosidade, com o objetivo de remover partículas abrasivas que pudessem comprometer os resultados. Foram realizadas três medições por peça, ao longo de sua largura, com a primeira começando a 1,0 mm da face superior e as demais a 1,0 mm de distância da medição anterior.

3.4.3. *Desgaste diametral do rebolo*

A avaliação do desgaste diametral do rebolo foi realizada por meio do método indireto. Nessa técnica, ao final de dois ensaios, o rebolo desgastado era utilizado para retificar um corpo de prova em aço ABNT 1020, com 35 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento. Esse procedimento possibilitava imprimir o perfil do rebolo na peça, permitindo a análise do desgaste ao comparar as regiões desgastadas com as áreas intactas da ferramenta, conforme ilustrado na Fig. 20. A retificação desse corpo de prova foi conduzida com lubrificação convencional, utilizando profundidade de corte de 0,5 mm e os demais parâmetros de usinagem iguais aos descritos na Tabela 6.

Após a retificação, o cilindro de aço com o perfil do rebolo foi analisado por meio de um rugosímetro portátil Surtronic 3⁺, em conjunto com o *software* TalyMap, versão Lite 3.1.4, ambos fornecidos pela Taylor Hobson. Para a separação da rugosidade, ondulação e erro de forma, foram adotados os seguintes parâmetros de medição: *cut-off* de 0,25 mm, comprimento de amostragem de 1,25 mm e filtro Gaussiano. Em cada amostra, foram realizadas três medições em regiões equidistantes, com 120° de espaçamento entre si. Os resultados foram expressos como média aritmética do desgaste no diâmetro da ferramenta, com seu respectivo desvio padrão.

Figura 20 – Desgaste do rebolo e método de impressão de sua superfície.



Fonte: Autor, 2025.

3.4.4. Potência consumida

O sinal de potência elétrica foi obtido a partir da corrente elétrica fornecida pelo inversor de frequência da máquina. O equipamento utilizado foi um inversor da marca WEG, modelo CFW 08, que possui uma saída de 10 V, por meio da qual é possível monitorar a variação da corrente elétrica durante o processo de retificação. Essa corrente é proporcional à potência elétrica consumida, permitindo a obtenção indireta do sinal de potência do processo.

Para isso, foi projetado e construído, em parceria com o Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS) da Faculdade de Engenharia da UNESP – Bauru, um circuito eletrônico denominado Curvopower 3. Esse dispositivo tem a função de converter os valores de corrente e tensão provenientes do motor em sinais de tensão compatíveis com a placa de aquisição de dados, possibilitando seu processamento posterior.

A aquisição dos dados foi realizada por meio de um notebook equipado com uma placa de aquisição de dados analógico-digital (A/D). O sensor foi conectado ao hardware, e os sinais adquiridos foram tratados utilizando o software LabView® 7.1 (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), da empresa National Instruments. Essa versão do LabView constitui um ambiente de desenvolvimento baseado em programação gráfica, amplamente utilizado para instrumentação virtual.

3.4.5. Emissão acústica

Para a medição da emissão acústica (EA), foi utilizado um sensor piezoelétrico acoplado a uma unidade de tratamento de sinais, modelo DM 42, ambos fabricados pela empresa SENSIS. Esses equipamentos permitem o monitoramento em tempo real do sinal de EA por meio de seu valor quadrático médio (RMS – *Root Mean Square*). A captação do sinal ocorre da seguinte forma: o sensor detecta as variações de tensão geradas pelas deformações durante a retificação e as envia ao módulo de EA, que as converte em sinais elétricos. Esses sinais são então transmitidos diretamente à placa de aquisição de dados instalada em um notebook, sem necessidade de processamento intermediário.

O sensor de EA foi fixado o mais próximo possível da peça, visando minimizar interferências e garantir maior precisão na leitura. Para isso, foi posicionado no cabeçote móvel da retificadora, próximo ao contraponto, possibilitando a detecção de variações no sinal acústico e sua correlação com as demais variáveis de saída do processo. Ensaios preliminares foram conduzidos para ajustar adequadamente o sistema de medição e garantir boa resposta do sinal RMS, evitando saturações.

Durante os ensaios de retificação, foram utilizados os seguintes parâmetros de configuração: ganho do sinal = 5; redução de ruído = 0; filtro passa-alta com frequência de corte equivalente a 10 kHz; e constante de tempo = 1 ms.

3.4.6. Custo e Poluição

O custo e a emissão de carbono (EC) de cada cenário de lubrificação é calculado a partir dos parâmetros de entrada da usinagem e da soma dos gastos com desgaste do rebolo, consumo de energia elétrica e aquisição e descarte do fluido de corte, apresentados nas Tabelas 6 e 7. Os cálculos foram desenvolvidos por Field; Kegg; Buescher, (1980) e aprimorados por Javaroni et al. (2020b) e Lopes et al. (2019). As Equações (3.1) a (3.4) são relativos ao custo do processo, enquanto as Equações (3.5) a (3.7) são para o cálculo das emissões de carbono.

$$C_{rebolo} = \frac{C_s \cdot V}{G} + \left[\frac{\pi \cdot b_s \cdot C_s}{N_d} \cdot (d_s \cdot a_d - a_d^2) \right] \quad (3.1)$$

$$C_{fluido} = \frac{v_{jet} \cdot a_e}{N_c \cdot v_w} \cdot (C_f + C_w) \quad (3.2)$$

$$C_{energia} = \frac{(P_C + P_{bo} + P_{ar}) \cdot C_e}{60000} \cdot \left(\frac{2R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (3.3)$$

$$C_{\text{método}} = C_{\text{rebolo}} + C_{\text{fluido}} + C_{\text{energia}} \quad (3.4)$$

$$EC_{\text{energia}} = \frac{(P_C + P_{bo} + P_{ar}) \cdot CE_e \cdot 3,6}{60000} \cdot \left(\frac{2R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (3.5)$$

$$EC_{\text{fluido}} = \frac{V_{jet} \cdot k_p \cdot CE_{oil}}{N_c} \cdot \left(\frac{2R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (3.6)$$

$$EC_{\text{método}} = EC_{\text{energia}} + EC_{\text{fluido}} \quad (3.7)$$

Tabela 7 – Parâmetros para os cálculos de custo e poluição.

Símbolo	Parâmetro	Unidade	Valor
C_r	Preço do rebolo	US\$	136,20
C_{ar}	Custo ar comprimido	US\$/m ³	0,0106
C_e	Custo energia	US\$/kWh	0,12 (Global Petro Prices, 2024)
CE_e	Emissão de carbono – energia	kgCO ₂ /MJ	0,128
CE_{oil}	Emissão de carbono – óleo de corte	kgCO ₂ /l	3,0616
C_s	Custo do rebolo usável	US\$/mm ³	0,00019747
C_w	Custo de descarte do óleo	US\$/l	0,085 (Demirbas; Kobya, 2017)
M	Custo da mão de obra	US\$/h	20 (Pusavec; Krajnik; Kopac, 2010)
			<i>Flood</i> Base / VCI / VCI+EP MQL Base / VCI / VCI+EP MQL + limpeza Base / VCI / VCI+EP
C_f	Custo do óleo de corte	US\$/l	0,4125 / 0,33 / 0,3506 13,75 / 11,0 / 11,6875 13,75 / 11 / 11,6875
V_{air}	Pressão do ar comprimido	m ³ /min	0 / 0 / 0 0,85 / 0,85 / 0,85 1,982 / 1,982 / 1,982

Fonte: Autor, 2025.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com os testes serão organizados, apresentados e discutidos nesta seção, arranjados conforme cada cenário de retificação. Serão analisadas a rugosidade superficial, erro de circularidade, desgaste diametral do rebolo, potência consumida, emissão acústica, custo e poluição, assim como uma análise geral do processo, levando em consideração diversos resultados.

4.1. Rugosidade superficial

A rugosidade superficial é uma característica de extremo interesse da indústria, pois é através da escolha dos parâmetros de textura superficial que se confere a peça de trabalho a funcionalidade desejada, como capacidade de carga, atrito, desgaste e eficiência de retenção de fluidos (Silva et al., 2020; Zeng et al., 2018). A rugosidade é diretamente influenciada por diversos fatores de usinagem, como velocidade de corte, avanço, tempo de centelhamento, condições de lubrificação e fluidos de corte (Bianchi et al., 2013b; Tavares et al., 2024).

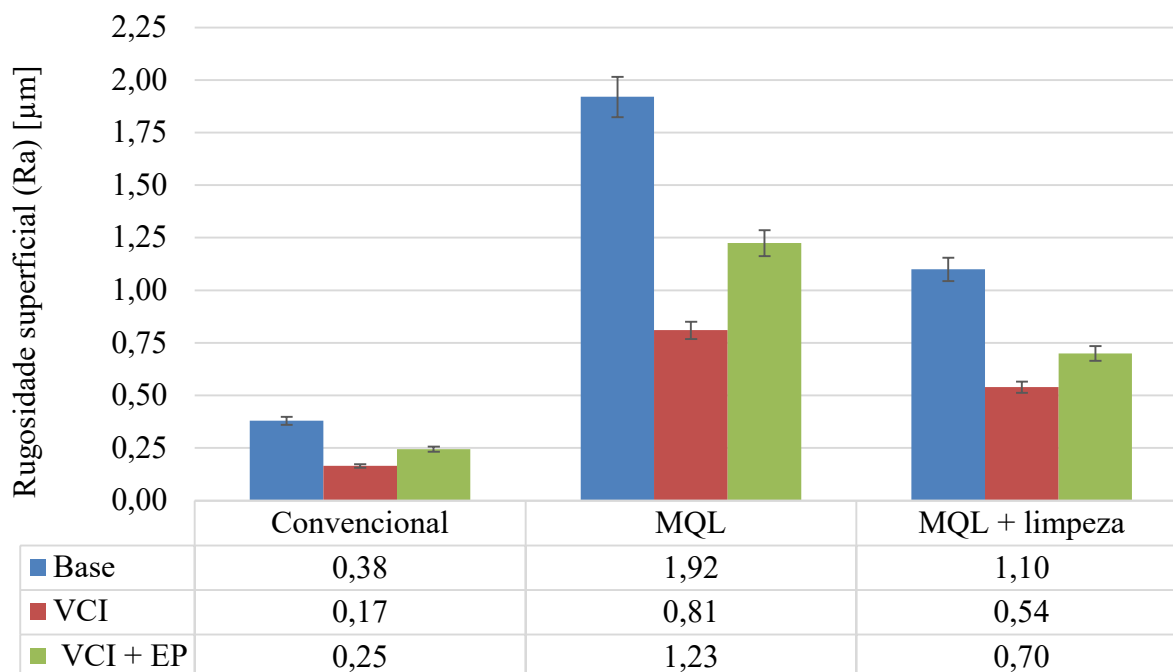
Neste trabalho, todos os parâmetros de usinagem foram mantidos constantes, exceto o fluido de corte e sua técnica de aplicação. Desta forma, foi possível avaliar a influência destes parâmetros na rugosidade das peças retificadas. A Fig. 21 resume os resultados obtidos para os diferentes cenários de retificação.

De acordo com Groover (2010), um processo de retificação típico, isto é, operando com parâmetros adequados ao material, gera rugosidade média (R_a) entre 0,1 e 2 μm , resultando em excelente acabamento superficial. Dessa forma, valores acima desse intervalo indicam alguma ineficiência no processo. Com base nos cenários analisados, o método convencional apresentou os menores valores de rugosidade, enquanto o MQL obteve os piores resultados, com rugosidade em média 398,7% superior ao sistema com fluido em abundância. Já a combinação entre MQL e sistema de limpeza (MQL+limpeza) apresentou desempenho intermediário, com valores de rugosidade em média 200,8% superiores ao método convencional, embora mais próximos a ele.

Essa grande discrepância está diretamente relacionada à capacidade de cada técnica em lubrificar, resfriar e limpar a região de corte. A presença de lubrificação na interface reduz o atrito entre peça e ferramenta, diminuindo a potência de corte necessária, atenuando vibrações e reduzindo a geração de calor, o que contribui para um corte mais uniforme e sem deformações (Javaroni et al., 2020a). Temperaturas elevadas também podem comprometer o processo ao gerar expansão térmica na peça, alterando sua geometria, além de degradar o ligante do rebolo,

facilitando a perda de grãos e acelerando o desgaste da ferramenta, o que impacta negativamente na qualidade da superfície usinada (Javaroni et al., 2020b; Malkin; Guo, 2007).

Figura 21 – Rugosidade superficial para diferentes condições de usinagem.



Fonte: Autor, 2025.

Segundo Oliveira et al. (2012), em temperaturas elevadas, ocorre o empastamento do rebolo devido ao acúmulo de cavacos em seus poros. Isso reduz a capacidade de corte da ferramenta, fazendo com que os grãos fiquem cobertos pelo material da peça, o que gera riscos, prejudica a superfície usinada e compromete o acabamento superficial. Nesse contexto, a remoção dos cavacos é essencial para evitar o empastamento do rebolo e garantir a qualidade superficial da peça.

O método convencional, por utilizar grande volume de fluido, consegue realizar adequadamente as três funções: lubrificação, resfriamento e limpeza da zona de corte. Isso permitiu que, ao utilizar o fluido VCI, a técnica convencional alcançasse o melhor resultado do estudo, com rugosidade de 0,17 μm .

Por outro lado, o MQL, embora ofereça boa capacidade de lubrificação, sofre com constante empastamento do rebolo, uma vez que não dispõe de eficiência adequada em resfriamento e limpeza, comprometendo assim seus resultados (Javaroni et al., 2020b). Com a aplicação do fluido VCI, obteve-se uma rugosidade de 0,81 μm , valor cinco vezes superior ao alcançado com a técnica convencional utilizando o mesmo fluido. Destaca-se que, com o uso

do fluido Base, o MQL atingiu valores próximos ao limite superior de rugosidade ($2\text{ }\mu\text{m}$) estabelecido na literatura para processos convencionais de retificação, o que pode indicar sérias limitações no uso dessa técnica para materiais de maior dureza.

Por fim, o sistema MQL+limpeza, apesar de não resfriar adequadamente a peça e o rebolo, mostrou-se eficiente devido à atuação do sistema auxiliar de limpeza, que atenua o empastamento. Com isso, promoveu-se uma melhora média de 40% em relação ao MQL tradicional, chegando a uma rugosidade de $0,54\text{ }\mu\text{m}$, quando usado em conjunto com o fluido VCI.

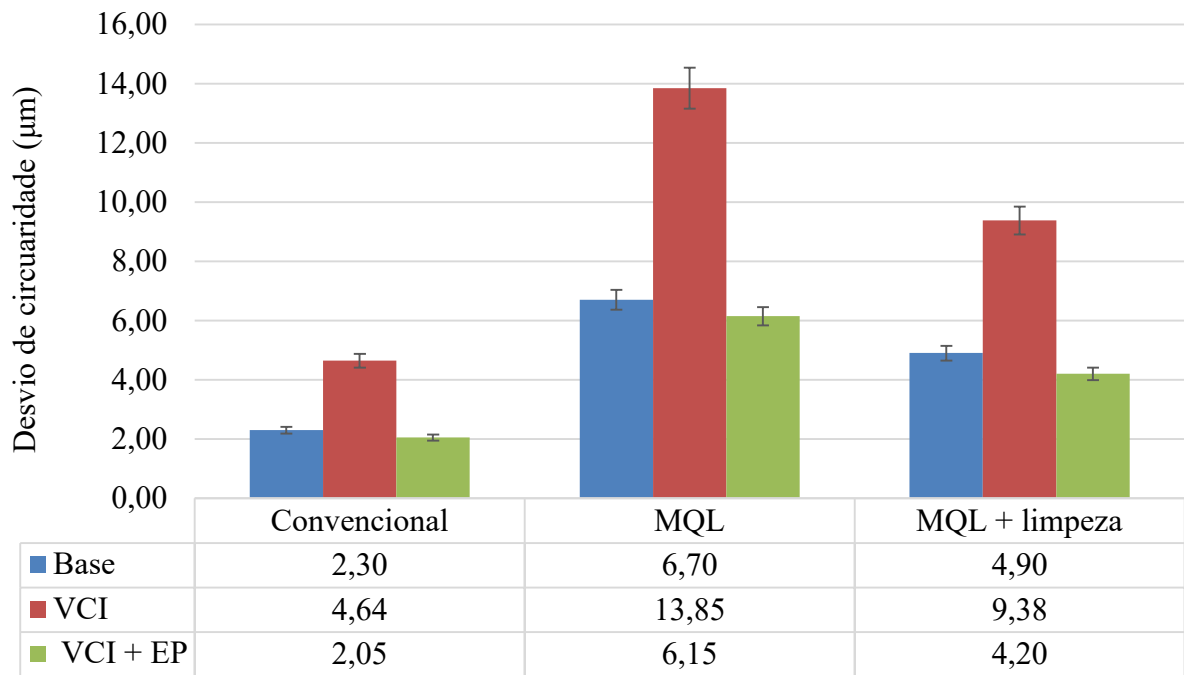
Analisando os fluidos de corte, o VCI foi o que apresentou os melhores acabamentos, enquanto o fluido Base gerou os piores resultados. O fluido com aditivo de extrema pressão (VCI+EP) teve desempenho intermediário. Uma possível explicação é que esse aditivo forma uma película mais espessa na interface de corte que reduz o contato direto entre grão abrasivo e peça, elevando a força de corte (Talon et al., 2019). Esse aumento intensifica o processo, promovendo vibrações e remoção irregular do material, o que prejudica a qualidade da superfície.

No entanto, ambos os fluidos com *V-active*® VCI possuem um agente lubrificante que, segundo Talon et al. (2020), se polimeriza conforme a intensidade do processo, aumentando a capacidade de lubrificação quando as forças de corte aumentam. Assim, mesmo com o impacto negativo da película protetora do VCI+EP, o agente lubrificante provavelmente compensa esse efeito, permitindo uma melhoria de 36,0% em relação ao fluido Base. Já o VCI, que não possui o aditivo de extrema pressão, também oferece a mesma capacidade de polimerização, resultando em um ganho de 55,0% comparado ao fluido convencional, devido à melhor lubrificação.

4.2. Desvio de circularidade

Com o avanço das tecnologias industriais e a exigência por soluções estruturais mais leves e eficientes, os requisitos de tolerância dimensional têm se tornado cada vez mais restritivos, especialmente na fabricação de componentes rotativos, como rotores de grande porte e motores elétricos. Nessas aplicações, a integridade geométrica das peças usinadas é essencial para garantir condições operacionais estáveis e livres de vibrações. Nesse contexto, a análise dos desvios de forma, como o erro de circularidade, torna-se um parâmetro crítico na avaliação da qualidade do processo de retificação (De Souza et al., 2004; Viitala, 2020). Os resultados obtidos ao longo deste estudo estão resumidos na Fig. 22.

Figura 22 – Desvio de circularidade para diferentes condições de usinagem.



Fonte: Autor, 2025.

Diferentemente dos demais parâmetros estudados, o fluido com apenas o aditivo VCI apresentou um resultado médio duas vezes inferior ao fluido Base, chegando a um desvio de circularidade de 13,9 μm para o método de MQL. Segundo uma hipótese estabelecida por Talon et al. (2019), os fluidos com a tecnologia *V-active*® VCI possuem capacidade de refrigeração inferior, quando comparados ao fluido Base, levando assim a um aumento da temperatura média na interface de corte. Rodrigues et al. (2024) complementam que a precisão do processo de retificação piora conforme o aumento da temperatura, já que há uma expansão do material, levando assim a um aumento do erro para esse tipo de fluido.

Entretanto, o fluido VCI com aditivo de extrema pressão (EP) não seguiu essa mesma tendência, ficando com um erro de circularidade em média 12,6% inferior entre todas as técnicas, quando comparado ao fluido Base. Segundo Marinescu et al. (2007), no processo de retificação atuam duas forças distintas no rebolo: uma componente tangencial e outra normal. A componente normal exerce influência significativa no erro de circularidade da peça, uma vez que é responsável por induzir deformações no material trabalhado. Talon et al. (2019) então explora que provavelmente a película do aditivo de extrema pressão gera uma camada de distribuição da força normal, consequentemente, reduzindo os erros de circularidade.

Com relação as técnicas de lubrificação, o sistema de MQL foi o que obteve os piores resultados, muito por conta de sua baixa capacidade de retirar calor da zona de corte, o

que aumenta as deformações causadas pela expansão térmica do material da peça e das forças de corte (Malkin; Guo, 2007; Marinescu et al., 2007). O resultado mais promissor para esta técnica foi utilizando o fluido VCI+EP, chegando em um erro 25,5% maior que para a técnica de MQL+limpeza com fluido Base.

Entre as demais técnicas avaliadas, o MQL+limpeza com fluido VCI+EP foi o que mais se aproximou do método convencional, apresentando desvios de circularidade 82,6% e 9,48% maiores em comparação ao fluido Base e o VCI, respectivamente. Conforme Moretti et al. (2023), uma possível hipótese para esta melhoria na precisão, em relação ao MQL, deve-se não apenas à película lubrificante formada pelo aditivo EP, que favorece a precisão geométrica do processo, mas também à ação mais eficiente de limpeza proporcionada pelo sistema de limpeza do rebolo. Esse sistema auxiliar previne o recobrimento dos grãos abrasivos, o que minimiza o desgaste irregular ao longo do perfil usinado.

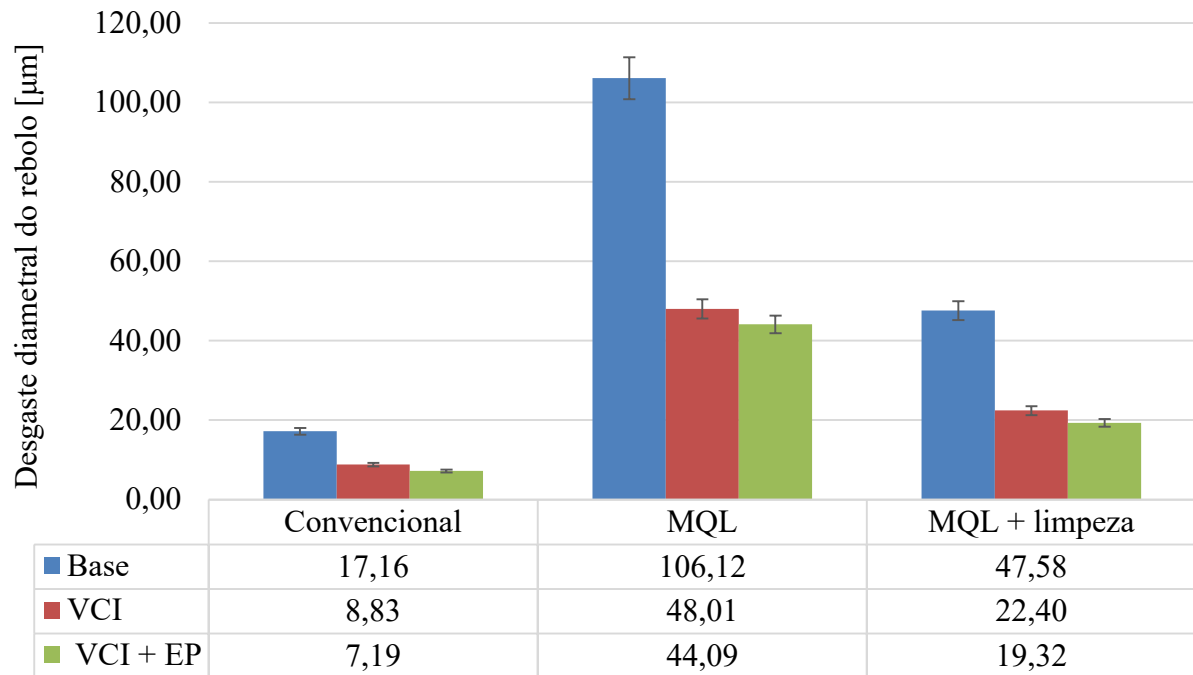
4.3. Desgaste diametral do rebolo

O desgaste da ferramenta de corte é um fenômeno inevitável no processo de retificação, resultado da combinação de esforços mecânicos e ação térmica que comprometem a integridade do ligante e provocam a quebra dos grãos abrasivos. Esse desgaste reduz a vida da ferramenta e, conseqüentemente, a eficiência do processo. Por isso, na indústria, busca-se minimizar o atrito na zona de corte, prolongando a durabilidade da ferramenta (Marinescu et al., 2016; Rodriguez et al., 2019a).

Dessa forma, os fluidos com maior capacidade de lubrificação, como os fluidos formulados com a tecnologia *V-active*® VCI, apresentaram os melhores resultados para o desgaste da ferramenta, com o fluido VCI reduzindo o desgaste em média 109,3% ao longo de todos os sistemas de lubrificação, quando comparado com o fluido Base, como mostra a Fig. 23. Isso porque, como hipotetizado por Talon et al. (2019), além da maior lubricidade que a camada polimerizada, criada pelo VCI, possui, ela também proporciona uma distribuição das forças de usinagem, o que resulta em um menor esforço para o ligante, evitando sua fratura e a perda prematura de grãos abrasivos.

Além disso, os testes mostraram uma interação positiva entre a camada polimerizada produzida pela tecnologia *V-active*® VCI e o filme de fluido resultante do aditivo de extrema pressão. Visto que o fluido VCI+EP promoveu um desgaste inferior da ferramenta em relação ao VCI sem aditivo, em média 15,9%. Corroborando para a hipótese que esse fluido possui uma maior lubricidade e distribuição das forças de corte sob o grão.

Figura 23 – Desgaste diametral do rebolo para diferentes cenários de usinagem.



Fonte: Autor, 2025.

Por conta disso, o método de MQL+limpeza apresentou resultados extremamente promissores. Quando comparado com o método convencional, a usinagem com limpeza resultou em um desgaste apenas 12,6% superior, mostrando que aliar os fluidos VCI aos métodos de mínima quantidade de lubrificante produz resultados satisfatórios, com um consumo de quase 100% menos óleo de corte.

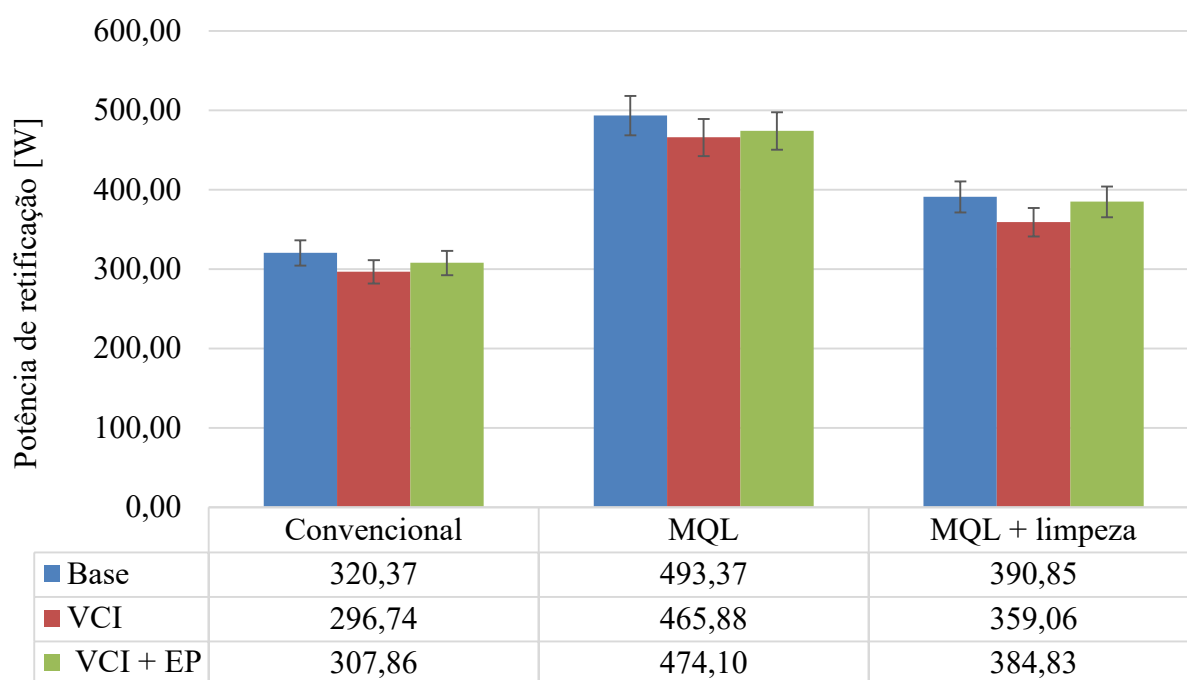
Entretanto, essa aproximação entre o sistema convencional e a técnica de mínima quantidade de lubrificante não se deve apenas ao fluido de corte, já que o MQL isolado mostrou os piores resultados, com um desgaste diametral médio quase cinco vezes superior ao sistema de fluido em abundância. Essa melhora é também consequência da ação do sistema auxiliar de limpeza do rebolo, pois, como explicado por Javaroni et al. (2020a) em seu estudo com métodos auxiliares ao MQL, esse sistema reduz bastante o efeito do empastamento do rebolo, o que diminui a porcentagem de grãos abrasivos recobertos por material durante a usinagem, controlando assim o atrito na interface ferramenta-peça, reduzindo sua temperatura e as forças de corte, o que diminui os esforços sobre os grãos e o ligante.

4.4. Potência consumida

O monitoramento da potência consumida é amplamente aplicado durante o processo de retificação no meio industrial, por conta de sua fácil instalação e baixo custo. Podendo detectar colisões e sobrecargas na máquina (Bianchi et al., 2018b).

A partir dos resultados dos ensaios, compilados na Fig. 24, observa-se que, mesmo com os novos fluidos de corte, o método em abundância (convencional) ainda apresentou os melhores resultados de potência consumida, com valores em média 54,9% e 22,7% inferiores aos das técnicas de MQL e MQL+limpeza, respectivamente. Essa diferença deve-se à maior capacidade de remoção de calor da zona de corte oferecida por esse método, o que evita a degradação das arestas de corte e das propriedades dos grãos abrasivos, facilitando assim o processo de usinagem. Além disso, a maior quantidade de fluido promove uma limpeza mais eficiente da zona de corte, reduzindo o efeito de empastamento no rebolo. Dessa forma, mais grãos abrasivos participam do corte, o que diminui o atrito geral do processo e, conseqüentemente, as forças de usinagem. (Ávila et al., 2023; Malkin; Guo, 2007).

Figura 24 – Potência consumida para diferentes cenários de usinagem.



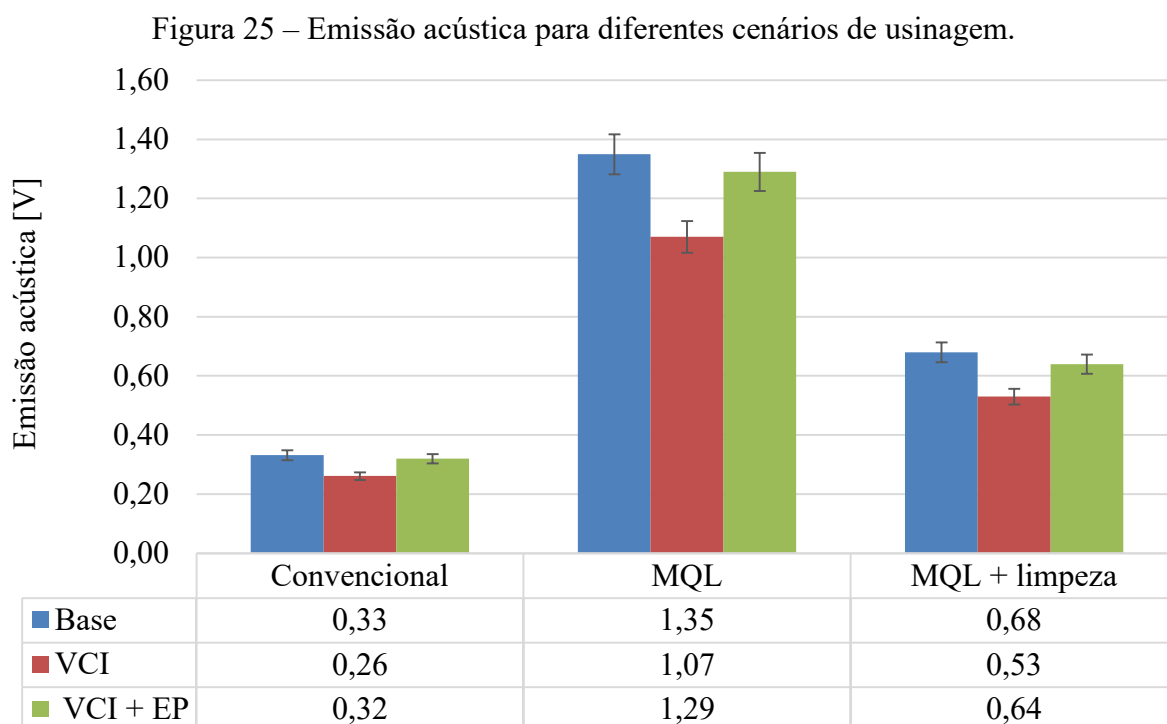
Fonte: Autor, 2025.

Ademais, em relação às diferentes formulações de fluidos de corte, nenhuma apresentou variação significativa nos resultados de potência, que permaneceram dentro do desvio padrão dos experimentos. Isso indica que, para os parâmetros de usinagem utilizados na

pesquisa (como profundidade de corte e avanço da ferramenta), a provável maior lubricidade proporcionada pelos fluidos com VCI não exerce influência significativa sobre este parâmetro de saída.

4.5. Emissão acústica

As análises de emissão acústica realizadas neste estudo limitaram-se ao valor quadrático médio (RMS) e à sua variação temporal durante o processo, com ênfase na comparação da resposta do processo aos diferentes cenários de lubrificação e fluidos. Não foram investigados em profundidade os efeitos das frequências de vibração nem outras análises mais detalhadas. Os resultados são apresentados na Fig. 25.



Fonte: Autor, 2025.

Os resultados de emissão acústica seguem a mesma tendência observada no parâmetro de potência consumida: o sistema MQL apresenta os piores desempenhos, enquanto o método convencional (*flood*) obtém os melhores resultados. Como explicam Bianchi et al. (2018), o sinal de emissão acústica é fortemente influenciado pelos mecanismos de corte do material - incluindo deformações plásticas e elásticas - e pelo atrito entre ferramenta e peça. Portanto, sistemas com maior capacidade de lubrificação, como o fluido em abundância, tendem a apresentar menor emissão acústica devido à redução do atrito na interface de corte. Embora

ofereça boa lubrificação ao romper a barreira de ar da ferramenta, a técnica MQL sofre com o empastamento do rebolo, que eleva significativamente o atrito na zona de corte, afetando negativamente a emissão acústica (Rodrigues et al., 2024).

A técnica MQL combinada com o sistema de limpeza (MQL+limpeza) apresentou resultados intermediários entre os demais sistemas de lubrificação, com destaque para sua aplicação conjunta com o fluido VCI - alcançando valores de emissão acústica aproximadamente 60% superiores ao sistema convencional com fluido Base, representando o melhor resultado entre as técnicas MQL. Esse desempenho decorre da eficiência de limpeza do sistema MQL+limpeza, que reduz o atrito na interface de corte, combinada com a ação lubrificante da camada formada pelo fluido VCI, que também contribui para a diminuição do atrito (Talon et al., 2019).

Além disso, entre os fluidos estudados, observou-se que o contendo apenas VCI apresentou os melhores resultados em todos os métodos de lubrificação, proporcionando redução de até 18,4% na emissão acústica no método convencional em comparação ao VCI+EP. Esse efeito decorre do filme lubrificante formado pela interação entre o aditivo de extrema pressão (EP) e o VCI na interface peça-ferramenta, que exige maior pressão para realizar o corte, aumentando o atrito na área de contato e, conseqüentemente, a emissão acústica do processo (Rodrigues et al., 2024).

4.6. Custo e poluição

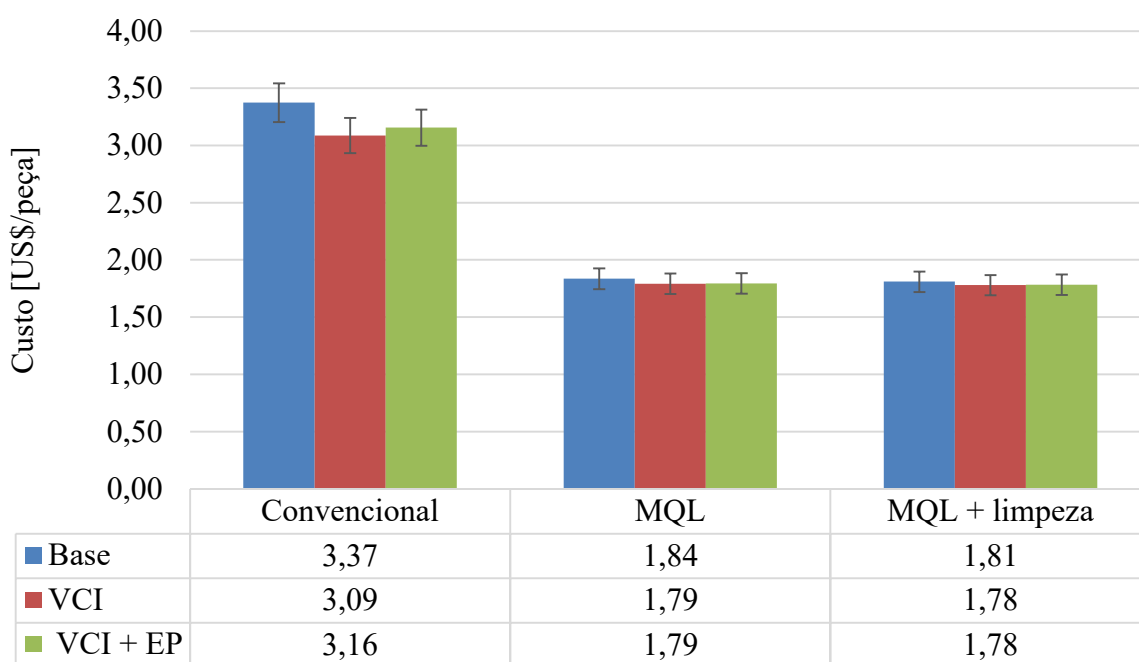
A análise abrangente dos custos associados ao desenvolvimento de novas tecnologias ou à otimização de processos industriais é essencial, conforme destacado por Lopes et al., (2023) em seu estudo. Essa necessidade decorre da tendência industrial de migrar para processos mais econômicos. Portanto, é imprescindível avaliar tanto a viabilidade financeira quanto a sustentabilidade de novas técnicas de usinagem, garantindo assim uma transição estratégica nos métodos produtivos adotados pela indústria.

Desse modo, com base nas Equações (3.1) a (3.7) foi possível estimar o impacto financeiro e ambiental de cada cenário de retificação. Os resultados foram agrupados na Fig. 26, para o custo por peça, e na Fig. 27, para a quantidade de CO₂ emitida por peça produzida.

A análise de custos demonstra que os métodos MQL são consideravelmente mais econômicos que o sistema convencional. O MQL sem sistema auxiliar apresenta redução 45,6% no preço por peça, enquanto a versão com sistema de limpeza alcança 46,4% de economia com o fluido Base, em comparação com o método convencional. Esta vantagem econômica decorre principalmente da drástica redução na quantidade de fluido de corte empregado, que demanda

menos processos de circulação, filtragem e reciclagem. Ao contrário do sistema convencional, no MQL o fluido atomizado evapora quando entra em contato com o calor gerado na zona de corte, dispensando os sistemas de recirculação e reciclagem, o que reduz significativamente os custos (Sato et al., 2019).

Figura 26 – Custo por peça para diferentes cenários de usinagem.



Fonte: Autor, 2025.

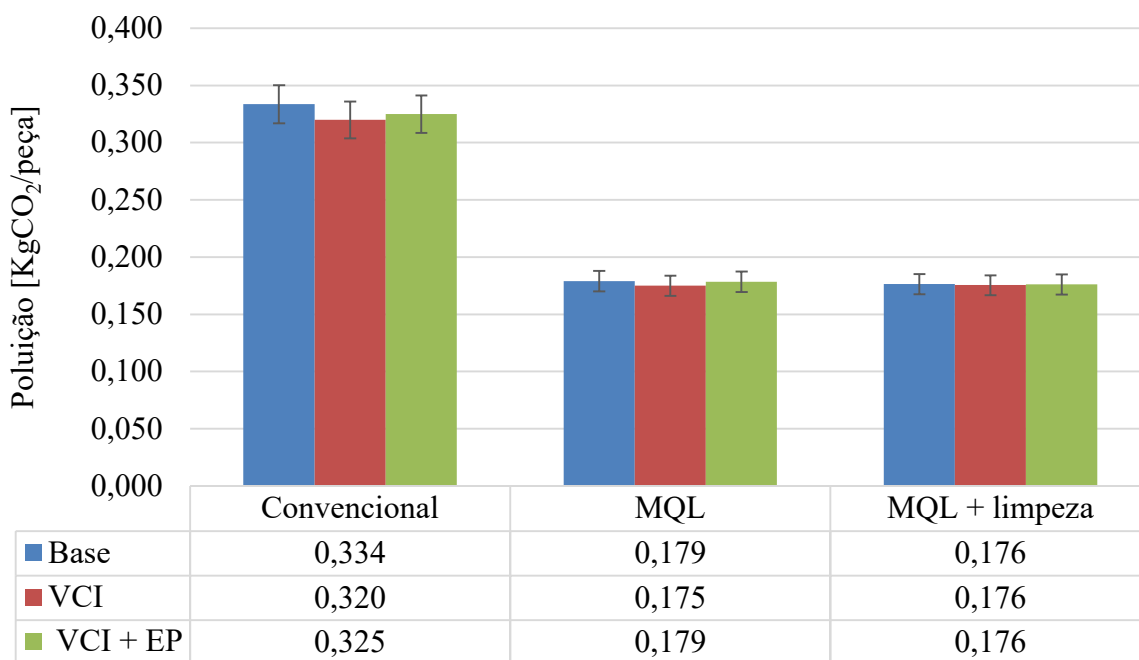
Com relação às emissões de CO₂, a aplicação do sistema de limpeza não apresenta impacto relevante, uma vez este tem baixo consumo energético e emprega ar comprimido, que não causa danos ambientais. Esta mínima diferença é comprovada pela comparação entre os métodos de MQL utilizando o fluido Base, onde o MQL+limpeza mostrou economia de apenas 1,42% - uma variação insignificante.

A comparação entre os diferentes cenários de usinagem revelou que o maior contraste em termos de poluição ocorre entre o método convencional com fluido Base e o MQL com VCI, que reduziu as emissões de CO₂ por peça em 47,6%, graças principalmente a menor vazão de fluido, somada a maior lubricidade do fluido, que diminui o desgaste da ferramenta. Padrão semelhante foi observado no custo por peça, com o método convencional sendo 45,0% mais caro que as técnicas MQL, que este não fica sujeito a custos de reciclagem e descarte de fluidos.

Quanto aos diferentes fluidos lubrificador-refrigerantes estudados, notou-se uma discreta redução de custos com a tecnologia *V-active*® VCI no método convencional em relação ao

fluido Base, em torno de 5,37%. Enquanto para MQL e MQL+limpeza as variações são mínimas (inferiores a 1,5%). Isso se deve ao aumento da vida útil da ferramenta e da maior eficiência do processo proporcionados pela camada polimerizada resultante da evaporação do VCI, mostrando que estes parâmetros não possuem impacto significativo nas equações para estas situações de usinagem.

Figura 27 – Poluição para diferentes cenários de lubrificação.



Fonte: Autor, 2025.

No aspecto ambiental, o método convencional mostrou-se claramente o mais poluente. Em comparação com as demais técnicas, suas emissões foram 45,6% e 46,1% superiores às do MQL e MQL+limpeza, respectivamente. Isso se deve a alta quantidade de óleo utilizada por este método, impactando bastante na quantidade de carbono liberado na produção e descarte do fluido (Benedicto; Carou; Rubio, 2017).

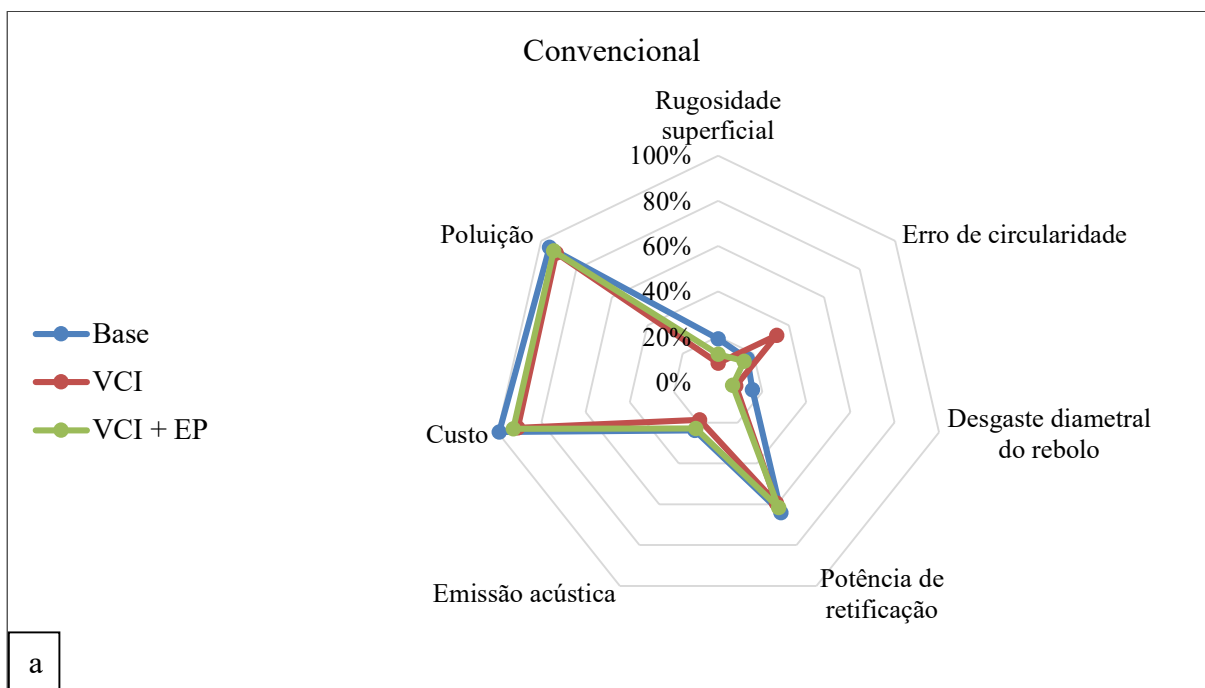
As diferentes composições dos fluidos com a tecnologia *V-active*® VCI mostrou ter impacto limitado nas emissões totais, com a formulação VCI apresentando os melhores resultados (0,32 kgCO₂/peça), sendo apenas 1,99% superior ao fluido VCI+EP no MQL. Este fenômeno explica-se pelo fato da tecnologia *V-active*® VCI não modificar substancialmente a composição química do fluido lubrificante, mantendo inalteradas as emissões de CO₂ durante sua produção e descarte (Bastidas; Cano; Mora, 2005).

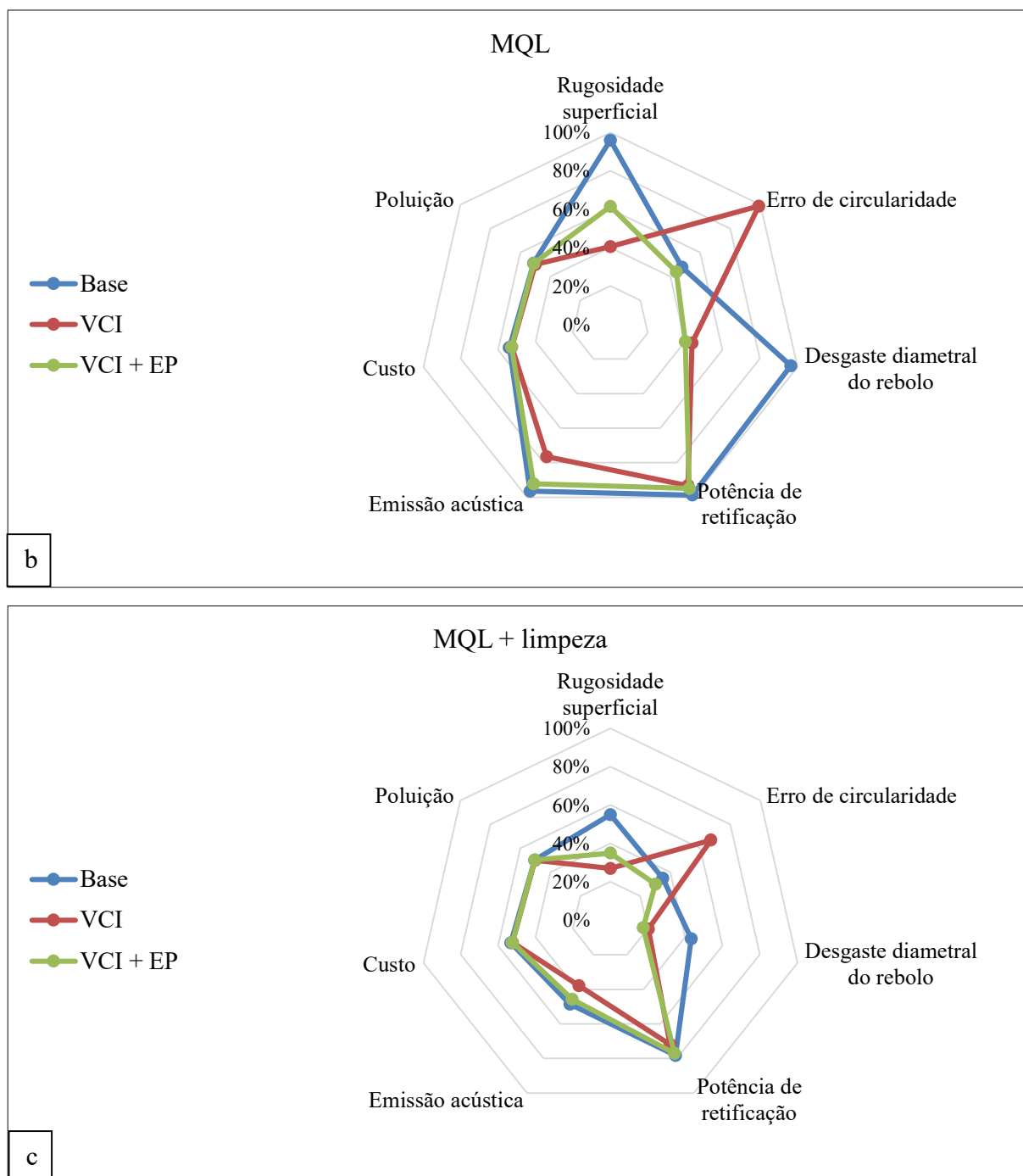
Padrão similar foi verificado na técnica MQL+limpeza, que apresentou variação mínima média de 0,48% nas emissões de CO₂ por peça. Demonstrando assim a maior influência que a variável de vazão tem sobre as equações.

4.7. Visão geral

Neste tópico, realiza-se uma análise comparativa entre todos os parâmetros de saída do processo, permitindo uma avaliação direta dos impactos associados a cada sistema de lubrificação. Essa abordagem multifacetada fornece informações valiosas sobre os pontos fortes e limitações de cada estratégia de usinagem, contribuindo para uma compreensão mais ampla e fundamentada na tomada de decisões no contexto industrial. As análises foram expressas em termos percentuais, com as variáveis de saída normalizadas em uma escala de 0 a 100%, apresentadas na Fig. 28.

Figura 28 – Resultados comparativos entre os diferentes fluidos de corte, a) para o método convencional, b) para o sistema de MQL e c) para o sistema de MQL+limpeza.





Fonte: Autor, 2025

A análise da Fig. 28a mostra que, no método convencional de lubrificação, o fluido VCI+EP apresentou desempenho geral semelhante ao fluido Base, com resultados promissores para parâmetros como circularidade e desgaste de ferramenta, sendo 12,5% e 138,9% superior ao fluido Base, respectivamente. Talon et al. (2019) atribuem os resultados semelhantes observados em seu estudo à interação entre o aditivo de extrema pressão e a polimerização dos fluidos VCI, que possivelmente formam uma película protetora ao redor dos

grãos abrasivos. Essa película tende a reduzir as forças de corte e a prolongar a vida útil da ferramenta, embora possa impactar negativamente o acabamento superficial — como o aumento de 55,1% observado nesta pesquisa.

Por outro lado, o fluido contendo apenas VCI demonstrou melhores resultados em termos de rugosidade superficial, sendo 130,3% superior, possivelmente se beneficiando da sua capacidade de adaptar a lubrificação na zona de corte de acordo com a severidade do processo, devido a sua polimerização (Talon et al., 2020). Essa característica também levou a uma redução 27,1% na emissão acústica durante a usinagem, que refletiu em um desgaste 94,3% menor em comparação com o fluido convencional. Entretanto, a ausência da película formada pelo aditivo EP afetou consideravelmente a circularidade das peças trabalhadas.

A aplicação das técnicas MQL, ilustradas nas Figs. 28b e 28c, demonstrou uma redução substancial nos custos e na poluição associados ao processo de retificação. Os resultados indicam que a produção dos diferentes fluidos gera impactos ambientais similares. O fluido contendo apenas *V-active*® VCI segue a mesma tendência quando utilizado abundantemente, melhorando o ruído e o acabamento superficial do processo, embora a circularidade seja prejudicada, especialmente nas técnicas MQL, devido à sua capacidade limitada de resfriamento, o que pode resultar em deformidades térmicas.

Assim como no método convencional, o fluido Base apresentou os maiores valores de rugosidade e desgaste de ferramenta nas técnicas MQL. Já o fluido VCI+EP mostrou os melhores resultados globais, com acabamento superficial próximo ao do VCI puro, mantendo baixos níveis de desgaste da ferramenta, desvios de circularidade e emissão acústica. Esses resultados destacam a importância de selecionar cuidadosamente a combinação ideal entre fluido e método de lubrificação para cada aplicação específica, considerando tanto os aspectos de desempenho quanto os impactos ambientais e econômicos.

5. CONCLUSÕES

Com base na análise dos resultados obtidos nos ensaios de retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 com rebolo de óxido de alumínio, foi possível avaliar de forma abrangente o desempenho de três fluidos de corte distintos, aplicados sob diferentes métodos de lubrificação. As principais conclusões estão organizadas conforme os objetivos específicos estabelecidos:

- Os fluidos com a tecnologia *V-active®* VCI (MV Aqua 100 e MV Aqua 182) apresentaram desempenho superior ao fluido Base (Grindex 10) em grande parte das variáveis de saída analisadas, independentemente do método de lubrificação. Essa superioridade foi especialmente evidente para os parâmetros de rugosidade superficial e emissão acústica, devido a camada polimerizada produzida por esses fluidos, que possivelmente melhora a lubrificação da zona de corte.
- Os resultados obtidos para as diferentes técnicas de lubrificação foram bastante modificados, em sua maioria, com a aplicação dos fluidos VCI, destacando-se o desempenho do MQL+limpeza com o fluido VCI+EP, cuja rugosidade aproximou-se da obtida com o método convencional. Por outro lado, o MQL isolado resultou nos maiores valores de rugosidade, circularidade e desgaste, o que reforça a importância de um sistema auxiliar de limpeza para garantir a eficiência do processo.
- O fluido VCI+EP, por conter aditivo de extrema pressão, apresentou os menores valores de desgaste diametral do rebolo. Quanto ao erro de circularidade, a adição do aditivo EP contribuiu para a redução dos desvios, mesmo que os fluidos VCI puros não tenham mostrado vantagens claras nesse parâmetro.
- A análise de emissão acústica indicou que os fluidos com *V-active®* VCI promovem menor agressividade no processo, principalmente quando combinados com sistemas auxiliares de limpeza. Já a potência de corte não apresentou variações significativas entre os fluidos.
- A análise de custo e emissão de CO₂ revelou que o método de lubrificação teve maior influência do que o fluido utilizado. Os sistemas MQL e MQL+limpeza mostraram-se mais sustentáveis, apresentando menores custos operacionais e menor impacto ambiental, com destaque para o uso dos fluidos VCI, que eliminaram a necessidade de processos posteriores de proteção e limpeza das peças.

Em síntese, a combinação da técnica de MQL com sistema de limpeza, associada ao uso de fluidos de corte com inibidores voláteis de corrosão *V-active®* VCI, demonstrou

excelente desempenho técnico e vantagens econômicas e ambientais, sendo uma alternativa promissora ao método convencional de lubrificação para a retificação do aço ABNT 4340.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas lacunas identificadas ao longo deste estudo, é possível delinear algumas direções promissoras para pesquisas futuras. Essas propostas visam aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos de atuação dos fluidos com tecnologia *V-active®* VCI, bem como otimizar seu uso no contexto da retificação.

- Investigar a formação e o comportamento dos filmes formados pelos fluidos *V-active®* VCI sobre o rebolo e a peça. Utilizando técnicas de caracterização de fluidos para compreender a atuação dos inibidores de corrosão na zona de corte, sua influência na lubrificação e no desgaste da ferramenta.
- Realizar análises mais aprofundadas da superfície usinada, incorporando parâmetros funcionais de rugosidade, perfilometria tridimensional e medições de tensões residuais. Esses dados podem oferecer uma visão mais completa dos efeitos térmicos e mecânicos durante a retificação, especialmente em condições severas.
- Estudar diferentes diluições e parâmetros de aplicação dos fluidos VCI no sistema MQL, identificando configurações mais eficazes que equilibrem desempenho técnico e sustentabilidade ambiental.
- Aprimorar os modelos existentes de custo e poluição com a inclusão de variáveis relacionadas ao ciclo completo de usinagem, considerando, por exemplo, a eliminação de etapas de pós-processo em função da ação anticorrosiva dos fluidos.

REFERÊNCIAS

ADOM, Philip Kofi. The socioeconomic impact of climate change in developing countries over the next decades: A literature survey. **Heliyon**, v. 10, n. 15, 15 ago. 2024.

ALEXANDRE, Felipe Aparecido *et al.* Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 1–4, p. 67–79, 17 abr. 2018.

ANDERSON, D.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 204, n. 1–3, p. 269–278, 11 ago. 2008.

ARUN, A. *et al.* Tool Condition Monitoring Of Cylindrical Grinding Process Using Acoustic Emission Sensor. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 5, p. 11888–11899, 1 jan. 2018.

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**, v. 129, n. 5, p. 2443–2456, 1 nov. 2023.

AZARHOUSHANG, B. *et al.* **Tribology and Fundamentals of Abrasive Machining Processes**. [S.l.: S.n.].

BALAN, A. S. S.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R. Minimum quantity lubricated grinding of inconel 751 alloy. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 28, n. 4, p. 430–435, 1 abr. 2013.

BARNETT, Jon. Security and climate change. **Global Environmental Change**, v. 13, n. 1, p. 7–17, 1 abr. 2003.

BARROS, Bianca Gomes *et al.* Utilization of teflon and aluminum oxide for wheel cleaning in Minimum Quantity Lubrication (MQL) grinding. **Materials Research**, v. 17, p. 23–32, 2014.

BASTIDAS, D. M.; CANO, E.; MORA, E. M. **Volatile corrosion inhibitors: A review**. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, 1 abr. 2005.

BENEDICTO, E.; CAROU, D.; RUBIO, E. M. Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems Used in Machining Processes. **Procedia Engineering**, v. 184, p. 99–116, 2017.

BENNETT, E. O. Water based cutting fluids and human health. **Tribology International**, v. 16, n. 3, p. 133–136, 1983.

BERETTA, S.; ROMANO, S. A comparison of fatigue strength sensitivity to defects for materials manufactured by AM or traditional processes. **International Journal of Fatigue**, v. 94, p. 178–191, 2017.

BIANCHI, E. C. *et al.* Optimization of minimum quantity lubrication in grinding with CBN wheels. *In: Machining and Machine-Tools: Research and Development. [S.l.: S.n.]*.

BIANCHI, Eduardo Carlos *et al.* Application of Minimum Quantity Lubrication in Grinding. **Sustainable Manufacturing**, v. 6914, p. 111–172, 2013b.

BIANCHI, Eduardo Carlos *et al.* Plunge cylindrical grinding with the minimum quantity lubrication coolant technique assisted with wheel cleaning system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 2907–2916, 1 mar. 2018a.

BIANCHI, Eduardo Carlos *et al.* Evaluating the effect of the compressed air wheel cleaning in grinding the AISI 4340 steel with CBN and MQL with water. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 2855–2864, 30 mar. 2018b.

BRINKSMEIER, E. *et al.* Metalworking fluids - Mechanisms and performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 64, n. 2, p. 605–628, 2015.

CHAPMAN, Lee. Transport and climate change: a review. **Journal of Transport Geography**, v. 15, n. 5, p. 354–367, 1 set. 2007.

CORDES, Susanne; HÜBNER, Fabian; SCHAARSCHMIDT, Thomas. Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 401–405, 2014.

DA SILVA, Andriago Elisiario *et al.* Behavior of austempered ductile iron (ADI) grinding using different MQL dilutions and CBN wheels with low and high friability. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 11–12, p. 4373–4387, 27 abr. 2020.

DAMBATTA, Y. S. *et al.* **Grinding with minimum quantity lubrication: a comparative assessment. International Journal of Advanced Manufacturing Technology** Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 1 set. 2023.

DANESHI, Amir; MÜLLER, Konstantin; AZARHOUSHANG, Bahman. Cylindrical plunge grinding of twist free surfaces by structured wheels. **Precision Engineering**, v. 51, p. 481–489, 1 jan. 2018.

DANIEL, Douglas Maiochi *et al.* Application of MQL with cooled air and wheel cleaning jet for greener grinding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 125, n. 1, p. 435–452, 2023.

DE MARTINI FERNANDES, Lucas *et al.* Thermal model for surface grinding application. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 5–8, p. 2783–2793, 24 out. 2019.

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**, v. 105, n. 10, p. 4211–4223, 13 dez. 2019.

DE SOUZA, C. N. *et al.* Analysis of diametrical wear of grinding wheel and roundness errors in the machining of steel VC 131. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 26, n. 2, p. 209–212, 2004.

DEBNATH, Sujan; REDDY, Moola Mohan; YI, Qua Sok. **Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review. Journal of Cleaner Production** Elsevier Ltd, , 15 nov. 2014.

DEMIRBAS, E.; KOBAYASHI, M. Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 105, p. 79–90, 1 jan. 2017.

DENKENS, B.; KÖHLER, J.; KÄSTNER, J. Chip formation in grinding: An experimental study. **Production Engineering**, v. 6, n. 2, p. 107–115, abr. 2012.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. [S.l.]: Artliber Editora, 2006.

DUFLOU, Joost R. *et al.* Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 2, p. 587–609, 1 jan. 2012.

EGEA, A. J. Sánchez *et al.* On the cutting performance of segmented diamond blades when dry-cutting concrete. **Materials**, v. 11, n. 2, p. 1–12, 2018.

FANG, Kan *et al.* A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction. *In: Elsevier*, 1 out. 2011. . Acesso em: 10 fev. 2020.

FIELD, M.; KEGG, R.; BUESCHER, S. Computerized Cost Analysis of Grinding Operations. **CIRP Annals**, v. 29, n. 1, p. 233–237, 1980.

FRANCELIN, Rafael Polato *et al.* Evaluation of the oil flow using the MQL technique applied in the cylindrical plunge grinding of AISI 4340 steel with cbn grinding wheel. **Revista Escola de Minas**, v. 71, n. 3, p. 397–402, 2018.

GARCIA, Mateus Vinicius *et al.* Grinding performance of bearing steel using MQL under different dilutions and wheel cleaning for green manufacture. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120376, jun. 2020.

GENOVEZ, M. C. **New concept for metallic protection against corrosion: V-active VCI**. [S.l.: S.n.].

Global Energy Review 2025 – Analysis - IEA. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>>. Acesso em: 25 maio. 2025.

GLOBAL PETRO PRICES. **Electricity Prices**. Disponível em: <https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/>. Acesso em: 14 nov. 2024.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. Seventh ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. v. 2

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

HAO, S.; RAMALINGAM, S.; KLAMECKI, B. E. Acoustic emission monitoring of sheet metal forming: characterization of the transducer, the work material and the process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 101, n. 1–3, p. 124–136, 14 abr. 2000.

HASÇALIK, A.; ÜNAL, E.; ÖZDEMİR, N. Fatigue behaviour of AISI 304 steel to AISI 4340 steel welded by friction welding. **Journal of Materials Science**, v. 41, n. 11, p. 3233–3239, 12 jun. 2006.

HASSUI, A.; DINIZ, A. E. Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 855–862, 2003.

HECKER, Rogelio L.; LIANG, Steven Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 755–761, jun. 2003.

HERMAN, Daniela; KRZOS, Jan. Influence of vitrified bond structure on radial wear of cBN grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, 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**, v. 156, n. 3, p. 255–268, 1 dez. 1994.

IAVARONE, Rafael Liberatti. Efeito da aplicação de fluidos de corte com inibidores voláteis de corrosão no desempenho da retificação do aço ABNT 4340 endurecido. 2024.

JAVARONI, Rafael Liberatti *et al.* Evaluation of a cooled wheel cleaning jet in minimum quantity lubrication grinding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 111, n. 5–6, p. 1303–1317, 10 nov. 2020a.

JAVARONI, Rafael Liberatti *et al.* Improvement in the grinding process using the MQL technique with cooled wheel cleaning jet. **Tribology International**, v. 152, p. 106512, 4 dez. 2020b.

JAWAHIR, I. S. *et al.* Cryogenic manufacturing processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 2, p. 713–736, 2016.

JAYAKUMAR, T. *et al.* A review of the application of acoustic emission techniques for monitoring forming and grinding processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 159, n. 1, p. 48–61, 10 jan. 2005.

KLOCKE, F.; EISENBLAETTER, G. Dry cutting. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 46, n. 2, p. 519–526, 1997.

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

KLOCKE, Fritz. Chip Formation (Abrasive Process). *In*: LAPERRIÈRE, Luc; REINHART, Gunther (Orgs.). **CIRP Encyclopedia of Production Engineering**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. p. 177–178.

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

KRANZ, Johanna *et al.* The (Un)political Perspective on Climate Change in Education—A Systematic Review. **Sustainability 2022, Vol. 14, Page 4194**, v. 14, n. 7, p. 4194, 1 abr. 2022.

KRUEGAR, M. K. *et al.* **New Technology in Metalworking Fluids and Grinding Wheels Achieves Tenfold Improvements in Grinding Performance**. [S.l.]: Oak Ridge National Lab., TN (US), 2000.

KUMAR, B. Satheesh; PADMANABHAN, G.; KRISHNA, P. Vamsi. Performance Assessment of Vegetable Oil based Cutting Fluids with Extreme Pressure Additive in Machining. **Journal of Advanced Research in Materials Science ISSN**, v. 19, n. 1, p. 1–13, 2016.

KUMAR, Sanjeev; SINGH, Dilbag; KALSI, Nirmal S. Analysis of Surface Roughness during Machining of Hardened AISI 4340 Steel using Minimum Quantity lubrication. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 2, p. 3627–3635, 2017.

KUPPUSWAMY, Ramesh *et al.* A study on intelligent grinding systems with industrial perspective. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 115, n. 11–12, p. 3811–3827, 11 ago. 2021.

KURAM, E. *et al.* Evaluation of New Vegetable-Based Cutting Fluids on Thrust Force and Surface Roughness in Drilling of AISI 304 Using Taguchi Method. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 26, n. 9, p. 1136–1146, set. 2011.

KWAK, Jae Seob; SIM, Sung Bo; JEONG, Yeong Deug. An analysis of grinding power and surface roughness in external cylindrical grinding of hardened SCM440 steel using the response surface method. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 3–4, p. 304–312, 1 mar. 2006.

LAGO, C. Estocolmo; RIO, Joanesburgo. O Brasil e as três conferências ambientais das Nações Unidas. **Fundação Alexandre de Gusmão (Funag), Ministério das Relações Exteriores. Brasília, DF**, 2006.

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

LI, Haogang *et al.* Extreme pressure and antiwear additives for lubricant: academic insights and perspectives. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 1 maio 2022.

LINKE, Barbara; KLOCKE, Fritz. Temperatures and wear mechanisms in dressing of vitrified bonded grinding wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 6, p. 552–558, 2010.

LOPES, José Claudio *et al.* Application of minimum quantity lubrication with addition of water in the grinding of alumina. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, n. 5–8, p. 1951–1959, 1 jul. 2018.

LOPES, José Claudio *et al.* Effect of CBN grain friability in hardened steel plunge grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, n. 1–4, p. 1567–1577, 7 jul. 2019.

LOPES, José Claudio *et al.* Performance of austempered ductile iron (ADI) grinding using diluted oil in MQL combined with wheel cleaning jet and different CBN grains friability. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 3–4, p. 1805 – 1818, 2020a.

LOPES, José Claudio *et al.* Application of MQL technique using TiO₂ nanoparticles compared to MQL simultaneous to the grinding wheel cleaning jet. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 5–6, p. 2205–2218, 17 jan. 2020b.

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**, v. 129, n. 11, p. 5691–5708, 1 dez. 2023.

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

MALKIN, S.; GUO, C. Thermal Analysis of Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 2, p. 760–782, 2007.

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

MAMIDI, Vamsi Krishna; XAVIOR, M. Anthony. A review on selection of cutting fluids. **Journal of Research in Science and Technology**, n. 1, 2014.

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

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

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

MARINESCU, Ioan D.; DOI, Toshiro K.; UHLMANN, Eckart. **Handbook of ceramics grinding and polishing**. Second edition ed. Oxford, UK ; Waltham, MA: William Andrew, 2015.

MARKET RESEARCH INTELLECT. **Water Soluble Cutting Fluids Market**. Disponível em: <<https://www.marketresearchintellect.com/product/global-water-soluble-cutting-fluids-market/>>. Acesso em: 14 nov. 2024.

MAUCIERI, Carmelo *et al.* A review on the main affecting factors of greenhouse gases emission in constructed wetlands. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 236, p. 175–193, 15 abr. 2017.

MCDONALD, Andrew; BAUER, Robert; WARKENTIN, Andrew. Design and validation of a grinding wheel optical scanner system to repeatedly measure and characterize wheel surface topography. **Measurement**, v. 93, p. 541–551, 2016.

MORETTI, Guilherme Bressan *et al.* Wheel cleaning jet (WCJ) strategy for green grinding: mitigating greenhouse impact in VP50IM steel machining with green silicon carbide wheel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 129, n. 5, p. 2125–2137, 1 nov. 2023.

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

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

ÖZDEMİR, N. Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed. **Materials Letters**, v. 59, n. 19–20, p. 2504–2509, 1 ago. 2005.

PAPAY, A. G. Antiwear and extreme-pressure additives in lubricants. **Lubrication Science**, v. 10, n. 3, p. 209–224, 1 maio 1998.

PUERTO, P. *et al.* Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. *In*: Elsevier Ltd, 2013.

PUSAVEC, Franci *et al.* Transitioning to sustainable production - Part II: Evaluation of sustainable machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 12, p. 1211–1221, ago. 2010.

PUSAVEC, Franci; KRAJNIK, Peter; KOPAC, Janez. Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 2, p. 174–184, jan. 2010.

RASIM, Matthias; MATTFELD, Patrick; KLOCKE, Fritz. Analysis of the grain shape influence on the chip formation in grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 226, p. 60–68, 2015.

RIBEIRO, Fernando Sabino Fontequ *et al.* Grinding performance by applying MQL technique: an approach of the wheel cleaning jet compared with wheel cleaning Teflon and Alumina block. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 11–12, p. 4415–4426, 27 abr. 2020a.

RIBEIRO, Fernando Sabino Fontequ *et al.* Grinding assessment of workpieces with different interrupted geometries using aluminum oxide wheel with vitrified bond. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 108, n. 3, p. 931–941, 25 maio 2020b.

RIBEIRO, Fernando Sabino Fontequ *et al.* New knowledge about grinding using MQL simultaneous to cooled air and MQL combined to wheel cleaning jet technique. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 109, n. 3–4, p. 905–917, 9 jul. 2020c.

RODRIGUES, Matheus de Souza *et al.* Evaluating the impact of corrosion inhibitors on grinding process efficiency. **Wear**, v. 558–559, 15 dez. 2024.

RODRIGUEZ, Rafael Lemes *et al.* Contribution for minimization the usage of cutting fluids in CFRP grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, n. 1–4, p. 487–497, 21 jul. 2019a.

RODRIGUEZ, Rafael Lemes *et al.* Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 271, n. October 2018, p. 357–367, 1 set. 2019b.

ROWE, W. Brian. **Principles of modern grinding technology**. Second edition ed. Norwich, NY: William Andrew, 2013. v. 1

RUZZI, Rodrigo de Souza *et al.* Effects of grinding-wheel cleaning system in application of minimum quantity lubrication technique. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 58, p. 116–128, 2020.

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**, v. 105, n. 5–6, p. 2057–2086, 2019.

SATO, Bruno Kenta *et al.* Influence of water in the MQL technique in the grinding of steel AISI 4340 using CBN wheels. **Revista Escola de Minas**, v. 71, n. 3, p. 391–396, 2018.

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**, v. 105, n. 5–6, p. 2167–2182, 21 dez. 2019.

SATO, Bruno Kenta *et al.* Evaluating the effect of MQL technique in grinding VP50IM steel with green carbide wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 121, n. 11, p. 7287–7294, 2022a.

SATO, Bruno Kenta *et al.* Novel comparison concept between CBN and Al₂O₃ grinding process for eco-friendly production. **Journal of Cleaner Production**, v. 330, 1 jan. 2022b.

SHAHABI, H. H.; RATNAM, M. M. Prediction of surface roughness and dimensional deviation of workpiece in turning: A machine vision approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 48, n. 1–4, p. 213–226, 27 abr. 2010.

SHEN, Bin; SHIH, Albert J.; TUNG, Simon C. Application of Nanofluids in Minimum Quantity Lubrication Grinding. **Tribology Transactions**, v. 51, n. 6, p. 730–737, 2008.

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**, v. 57, p. 83–101, 2012.

SILVA, Leonardo R. *et al.* Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 103287, maio 2020.

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.**, 2012.

SINHA, Manoj Kumar *et al.* An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 21, p. 124–133, 2016.

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

STEMMER, CASPAR ERICH. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos.** [S.l.]: Editora da UFSC, Florianópolis, 1992. v. II

STRÖMBERGSSON, Daniel *et al.* Acoustic emission monitoring of a mechanochemical surface finishing process. **Tribology International**, v. 112, p. 129–136, 1 ago. 2017.

SUI, Wentao; ZHANG, Dan. Four methods for roundness evaluation. **Physics Procedia**, v. 24, p. 2159–2164, 2012.

SUN, Zeyi; LI, Lin. Potential capability estimation for real time electricity demand response of sustainable manufacturing systems using Markov Decision Process. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 184–193, 15 fev. 2014.

SUTOWSKI, Paweł; ŚWIĘCIK, Robert. The estimation of machining results and efficiency of the abrasive electro-discharge grinding process of Ti6Al4V titanium alloy using the high-frequency acoustic emission and force signals. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, n. 1–4, p. 1263–1282, 26 jan. 2018.

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**, v. 104, n. 1–4, p. 1437–1448, 25 set. 2019.

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**, v. 108, n. 9–10, p. 2741–2754, 13 jun. 2020.

TAVARES, André Bueno *et al.* Evaluating the effect of WCJ with MQL in grinding VP50IM steel with black silicon carbide wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2024 135:7**, v. 135, n. 7, p. 3717–3736, 30 out. 2024.

TAWAKOLI, T. *et al.* An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 12–13, p. 924–932, out. 2009.

TAWAKOLI, T.; WESTKAEMPER, E.; RABIEY, M. Dry grinding by special conditioning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2007.

THORNTON, Philip K. *et al.* Climate variability and vulnerability to climate change: A review. **Global Change Biology**, v. 20, n. 11, p. 3313–3328, 1 nov. 2014.

TIAN, Lin *et al.* The influence of speed on material removal mechanism in high speed grinding with single grit. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 89, p. 192–201, 1 fev. 2015.

VCI BRASIL. **Fluidos Anticorrosivos para Usinagem V-active®**. Disponível em: <<https://vcibrasil.com.br/lp/fluido-anticorrosivo-de-usinagem-vci/>>. Acesso em: 14 nov. 2024.

VIITALA, Raine. Minimizing the bearing inner ring roundness error with installation shaft 3D grinding to reduce rotor subcritical response. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 30, p. 140–148, 1 ago. 2020.

VOROBYOVA, Viktoria; SKIBA, Margarita; CHYGYRYNETS', Olena. A novel eco-friendly vapor phase corrosion inhibitor of mild steel. **Pigment and Resin Technology**, v. 48, n. 2, p. 137–147, 27 fev. 2019.

WANG, Jinling *et al.* Development of grinding intelligent monitoring and big data-driven decision making expert system towards high efficiency and low energy consumption: experimental approach. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 35, n. 3, p. 1013–1035, 26 mar. 2024.

WEBSTER, J.; TRICARD, M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. **CIRP Annals**, v. 53, n. 2, p. 597–617, 1 jan. 2004.

WEGENER, K. *et al.* Conditioning and monitoring of grinding wheels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 2, p. 757–777, 2011.

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

YAN, Hengzhou Edward *et al.* Sustainability assessment during machining processes: Evidence from the econ-environmental modelling. **Journal of Cleaner Production**, v. 448, p. 141612, 5 abr. 2024.

YANG, Ping *et al.* A new continuous dynamic system for measuring the sphericity error of bearing balls. **Measurement Science and Technology**, v. 34, n. 5, 1 maio 2023.

ZENG, Quanren *et al.* Correlating and evaluating the functionality-related properties with surface texture parameters and specific characteristics of machined components. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 149, p. 62–72, 1 dez. 2018.

ZHANG, Xianpeng *et al.* Performances of Al₂O₃/SiC hybrid nanofluids in minimum-quantity lubrication grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 9, p. 3427–3441, 2016.

ZHENZHEN, Chen *et al.* Grinding performance evaluation of porous composite-bonded CBN wheels for Inconel 718. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 27, n. 4, p. 1022–1029, 1 ago. 2014.

ZHOU, Wenbo *et al.* Numerical investigation on the influence of cutting-edge radius and grinding wheel speed on chip formation in SiC grinding. **Ceramics International**, v. 44, n. 17, p. 21451–21460, 1 dez. 2018.

APÊNDICES

Apêndice A – Programa para retificação dos corpos de prova

LINHAS	FUNÇÕES
000	X 680.000
001	G 00.71
002	X (Posição de contato peça-rebolo + 0.2)
003	G 91
004	G 61
005	M 01
006	G 01.71
007	F 00001
008	G 04.02.00
009	X -0.2
010	G 04.05.00
011	X 0.01
012	X -0.11
013	G 04.08.00
014	X 0.01
015	X -0.11
016	G 04.08.00
017	G 25 N 11.16.99
018	G 25 N11.16.39
019	X 0.1
020	G 00.71
021	X 2.000
022	M 02
023	M 30

Fonte: Autor, 2025.

Observação: Na linha 002 do programa, é necessário inserir a posição na qual ocorre o contato do rebolo com o corpo de prova, somado 0.2 mm (fator de segurança). Assim, se, por exemplo, foi obtida a posição de contato em 392.700, deve-se colocar o comando X 392.900.

A linha 007 da programação estabelece a velocidade de avanço, sendo necessário selecionar analogicamente a porcentagem do avanço a ser utilizado durante o processo (10% a 200%).

Apêndice B – Programa para impressão do desgaste do rebolo

LINHAS	FUNÇÕES
033	X 680.000
034	G 00.71
035	X (Posição de contato cilindro-rebolo + 0.2)
036	G 91
037	G 61
038	M 01
039	G 01.71
040	F 00001
041	G 04.02.00
042	X -0.1
043	G 25 N 041.042.08
044	G 04.08.00
045	X 0.5
046	M 02
047	M 30

Fonte: Autor, 2025.

Observação: Na linha 035 do programa, é necessário inserir a posição na qual ocorre o contato do rebolo com o cilindro somado de 0.2 mm (fator de segurança). Assim, se, por exemplo, foi obtida a posição de contato em 392.700, deve-se colocar o comando X 392.900.