



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

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

BRUNO KENTA SATO

COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES REBOLOS APLICADOS NO
PROCESSO DE RETIFICAÇÃO UTILIZANDO
LUBRIRREFRIGERAÇÃO SUSTENTÁVEL

BAURU

2023



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



BRUNO KENTA SATO

COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES REBOLOS APLICADOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO UTILIZANDO LUBRIRREFRIGERAÇÃO SUSTENTÁVEL

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

Área de concentração: Processos de fabricação

Orientador: Prof. José Claudio Lopes
Coorientador: Prof. Eduardo Carlos Bianchi

BAURU

2023

S253c

Sato, Bruno Kenta

Comparação entre diferentes rebolos aplicados no
processo de retificação utilizando
lubrificação sustentável / Bruno Kenta

Sato. -- Bauru, 2023

128 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual
Paulista (Unesp),

Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: José Claudio Lopes

Coorientador: Eduardo Carlos Bianchi

1. Retificação. 2. MQL. 3. Empastamento. 4.
Sistema de limpeza do
rebolo. 5. Sustentabilidade. I. Título

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE BRUNO KENTA SATO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 07 dias do mês de julho do ano de 2023, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de BRUNO KENTA SATO, intitulada **COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES REBOLOS APLICADOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO UTILIZANDO LUBRIRREFRIGERAÇÃO SUSTENTÁVEL**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo / USP - São Carlos, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES

Aos meus antepassados que me deram a oportunidade de existir e consequentemente escrever o trabalho. Meus pais, Keiko e Luiz, em que tenho pleno orgulho pelo esforço e dedicação que tiveram na educação dos filhos. Kaori pela compreensão e paciência durante o período de elaboração deste trabalho

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Luiz Kenji Sato e Keiko Morigaki Sato por todo apoio e incentivos durante o período de formação acadêmica, moral e profissional, sem vocês isso não seria possível. Sou grato às minhas irmãs Yasmin Rye Morigaki Sato e Larissa Yunna Morigaki Sato pela felicidade proporcionada.

Agradeço a Kelly Kaori Moraoka pelo amor e carinho que foi concedido durante nossa jornada. Além de todo apoio e compreensão dado durante a realização do trabalho.

Agradeço ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UNESP Bauru por propiciar as condições necessárias para realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi e Prof. Dr. José Claudio Lopes agradeço de coração por todo o suporte fornecido durante o período de graduação e pós-graduação, foi de extrema importância para esse trabalho. Ressalto, minha admiração e carinho pelo vosso sucesso.

Agradeço a todos os docentes que fizeram parte da minha formação acadêmica. Professores são essenciais para nos educar e transmitir o conhecimento já adquirido pelas gerações passadas, vocês são a base para uma sociedade de sucesso.

À equipe técnica da UNESP meus sinceros agradecimentos, Hélio Aparecido de Souza pelo suporte durante os experimentos práticos e pelo conhecimento repassado, Dr. Hamilton José de Mello pelos conhecimentos teórico e prático transmitidos e pelas lições de vida ensinadas.

A todos os integrantes do Laboratório de Usinagem por Abrasão pelo companheirismo e auxílio durante a realização da pesquisa.

*“Pense o que quiser
Faça o que quiser
Mas não culpe os outros pelos seus resultados”
(Autor desconhecido)*

RESUMO

A Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) foi desenvolvida para possibilitar a implementação da sustentabilidade nos processos de usinagem. No presente estudo parâmetros como: vazão de fluido de corte, tipo de rebolo e o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo serão avaliados para atingir o melhor desempenho da técnica de MQL no processo de retificação. A comparação entre rebolos superabrasivo (CBN) e convencional (Al_2O_3), variação da vazão do fluido de corte (30 ml/h, 60 ml/h e 120 ml/h) e a utilização do sistema de limpeza será feita com base nos parâmetros de saída: rugosidade superficial, erro de circularidade, desgaste diametral do rebolo, análise confocal da superfície retificada, potência da retificação, emissão acústica e microscopia ótica. De forma inovadora, esse estudo apresenta o cálculo de custo por peça e a emissão de CO_2 por peça retificada para as diferentes condições analisadas. Em todos os parâmetros analisados o desempenho do rebolo de CBN foi superior ao rebolo de Al_2O_3 , apresentando, em média, rugosidade superficial 29% e um desvio de circularidade 9% menores em comparação com o rebolo de Al_2O_3 . Além disso, o desgaste do rebolo de CBN foi 127% menor, a emissão acústica 42% menor e a potência 13% menor em relação ao rebolo convencional. No entanto, o custo por peça apresentado pelo rebolo de Al_2O_3 é significativamente menor em comparação ao rebolo de CBN, independentemente do método de lubrificação utilizado. O custo da retificação utilizando MQL foi em média 72% menor ao utilizar o rebolo de Al_2O_3 . Além disso, o custo ao utilizar a refrigeração convencional foi 7% mais caro quando o rebolo de CBN foi utilizado.

Palavras-chave: Retificação, Mínima Quantidade de Lubrificante, Empastamento, Sistema de Limpeza do Rebolo.

ABSTRACT

Minimal Quantity of Lubrication was developed to achieve green manufacturing in machining process. In this study, parameters of cutting fluid flow, grinding wheel type and wheel cleaning system were evaluated to achieve the maximum potential of this technique in grinding process. The comparison of super abrasive (CBN) and conventional (Al_2O_3) grinding wheel, the cutting fluid flow (30 ml/h, 60 ml/h and 120 ml/h), and the wheel cleaning system were analyzed based on: surface roughness, roundness errors, grinding wheel wear, confocal of grounded surface, grinding power, acoustic emission and workpiece microscopy. In a novel way, this study compared the costs per piece and the carbon footprint in terms of CO_2 emission for both abrasive tool application. For all the parameters analyzed, the CBN grinding with MQL outperformed the Al_2O_3 grinding, showing a superior performance not only in terms of surface finishing, on average, 29% lower surface roughness and dimensional deviation 9% lower but also regarding tool efficiencies, such as 127% lower diametrical wear, 42% lower acoustic emission, and 13% lower grinding power. Despite that, the cost per piece was also evaluated for the different lubri-cooling conditions and tools, and the cost per piece recorded for Al_2O_3 grinding was substantially lower than CBN grinding, irrespective of the lubri-cooling method employed. The cost of grinding for all MQL techniques analyzed with aluminum oxide wheel was, on average, 72% less than grinding with CBN wheel. Besides, the conventional method with the CBN wheel was 7% more expensive than the aluminum oxide wheel.

Keywords: Grinding, Minimum quantity of lubricant, wheel clogging, wheel cleaning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo da potência na retificação cilíndrica externa de mergulho (ROWE, 2014)....	25
Figura 2. Principais parâmetros da retificação cilíndrica externa de mergulho (ROWE, 2014).	27
Figura 3. Forças envolvidas no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho (ROWE, 2014).	27
Figura 4. Etapas do processo de corte na retificação (ROWE, 2014).	28
Figura 5. Elementos do rebolo (ROWE, 2014).	32
Figura 6. Dureza em função da temperatura (ROWE, 2014).	33
Figura 7. Propriedades térmicas dos abrasivos (ROWE, 2014).	34
Figura 8. Exemplo de desgaste por atrito em um grão abrasivo Norton A46 (ROWE, 2014).	39
Figura 9. Quatro tipos de desgaste (ROWE, 2014).	40
Figura 10. Barreira de ar formada ao redor do perímetro do rebolo (MAO et al., 2013).	43
Figura 11. Imagens de microscópio ótico das amostras retificadas com R80: (a) 1 km/h, (b) 2 km/h (ZHOU et al., 2020).	51
Figura 12. Relação entre situação da superfície, queima, temperatura de processo (LIN et al., 2018).	52
Figura 13. Micrografia da subsuperfície da peça sobre diferentes pressões de retificação, (a) 1000 N; (b) 1500 N; (c) 2000 N (LIN et al., 2018).	53
Figura 14. Superfície com presença de micro rachaduras (LIN et al., 2018).	54
Figura 15. Microscopia Óptica de Varredura da superfície usinadas (a) 1 km/h, (b) 2 km/h, (c) 3 km/h, (d) 4 km/h (ZHOU et al., 2020).	56
Figura 16. Superfície do rebolo após a retificação: a) refrigeração convencional, b) MQL convencional e c) MQL com limpeza (OLIVEIRA et al., 2012a).	62
Figura 17. Fotografia da retificadora cilíndrica de mergulho disponível no LUA.	64
Figura 18. Aplicador ITW Accu-lube 76053D.	67
Figura 19. Princípio de Venturi aplicado no bocal de MQL (SATO et al., 2020).	67
Figura 20. Bocal utilizado na aplicação da técnica de MQL (DA SILVA et al., 2007).	68
Figura 21. Bocal utilizado no sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo.	69
Figura 22. Posicionamento do bocal de limpeza.	70
Figura 23. Posicionamento do sensor de emissão acústica.	71
Figura 24. Matriz de ensaios.	72
Figura 25. Rugosímetro e suporte utilizados para medir a rugosidade das peças.	76
Figura 26. Componentes do equipamento de circularidade com foco na fixação da peça.	77

Figura 27. Rebolo de CBN com desgaste após usinagem de um corpo de prova	78
Figura 28. Corpo de prova após impressão do desgaste.....	78
Figura 29. Representação da medição do desgaste.....	79
Figura 30. Posicionamento das peças para embutimento.....	80
Figura 31. Micrôdurometro utilizado na aferição da microdureza.....	82
Figura 32- Superfície da peça após a realização da medição de microdureza.	83
Figura 33. Rugosidade superficial para cada condição analisada	87
Figura 34. Erro de circularidade para cada condição analisada.	89
Figura 35. Desgaste diametral do rebolo para cada condição analisada.	91
Figura 36. Sinais de emissão acústica (RMS) medidos durante os experimentos de cada condição analisada.....	92
Figura 37. Confocal da superfície retificada em diferentes condições.....	94
Figura 38. Média aritmética de potência medida durante os experimentos para cada condição analisada.	96
Figura 39. Microestrutura em perfil da superfície retificada a) refrigeração convencional com CBN, b) refrigeração convencional com Al ₂ O ₃ , C) MQL 30ml/h com CBN e d) MQL 30ml/h com Al ₂ O ₃	98
Figura 40. Custo por peça utilizando o rebolo de CBN para cada métodos de lubrificação avaliados.....	99
Figura 41. Custo por peça utilizando o rebolo de Al ₂ O ₃ para cada métodos de lubrificação avaliados.....	100
Figura 42. Custo por peça para cada condição avaliada.....	101
Figura 43. Emissão de carbono por peça utilizando o rebolo de CBN nos diferentes métodos de lubrificação.....	102
Figura 44. Emissão de carbono por peça utilizando o rebolo de Al ₂ O ₃ nos diferentes métodos de lubrificação.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características das classes de fluido de corte (WICKRAMASINGHE et al., 2020).	44
Tabela 2. Comparação entre diferentes métodos de lubrificação.....	49
Tabela 3. Parâmetros de retificação.....	72
Tabela 4. Variáveis consideradas para cálculo de custo e emissão de carbono	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNC	Controle numérico computadorizado
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva
EESC/USP	Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
FEB	Faculdade de Engenharia de Bauru
LADAPS	Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais
LUA	Laboratório de Usinagem por Abrasão
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MQL	Mínima quantidade de lubrificação
NUMA	Núcleo de Manufatura Avançada
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius	(°C)
°INPM	Grau Instituto Nacional de Pesos e Medidas	(°INPM)
μ	Coeficiente de atrito	(-)
μm	Micrometro	(μm)
A	Área média no topo dos grãos abrasivos	(mm^2)
A/D	Analógico/digital	(-)
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)
d_e	Diâmetro equivalente	(mm)
d_s	Diâmetro do rebolo	(mm)
d_w	Diâmetro da peça	(mm)
e_c	Energia específica	(J/mm^3)
F_a	Força axial	(N)
F_n	Força normal	(N)
F_t	Força tangencial	(N)
G	Relação G	(-)
gf	Gramma-força	(gf)
h_{eq}	Espessura equivalente de corte	(μm)
HV	Dureza Vickers	(HV)
HR _C	Dureza Rockwell C	(HR _C)
K	Força de corte unitária	(N)
kgf	Quilograma-força	(kgf)
l/min	Litro por minuto	(l/min)
l_c	Comprimento de contato	(μm)
m	Metro	(m)

m/s	Metro por segundo	(m/s)
ml/h	Mililitro por hora	(ml/h)
mm	Milímetro	(mm)
mm/min	Milímetro por minuto	(mm/min)
Mn	Manganês	(-)
Mo	Molibidênio	(-)
MPa	Mega Pascal	(MPa)
Ni	Níquel	(-)
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.	Para análise	(-)
Q'_w	Taxa específica de remoção de material no tempo	(mm ³ /mm.s)
Q_w	Taxa de remoção de material no tempo	(mm ³ /s)
R_a	Rugosidade média aritmética	(μ m)
RMS	Root Mean Square	(-)
R_q	Rugosidade média quadrática	(μ m)
R_y	Rugosidade máxima	(μ m)
R_z	Rugosidade total	(μ m)
Si	Silício	(-)
SiC	Carbeto de silício	(-)
t_s	Tempo de centelhamento	(s)
v_d	Velocidade de dressagem	(mm/min)
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 ou velocidade de trabalho	(m/s)
Z_s	Volume de rebolo gasto	(mm ³)
Z_w	Volume de material removido	(mm ³)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Motivação	22
1.2 Objetivo geral.....	23
1.3 Objetivos específicos.....	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 Processo de Retificação	24
2.1.1 Retificação externa de mergulho.....	26
2.2 Interação do grão abrasivo com a superfície da peça	27
2.3. Parâmetros da retificação	28
2.3.1 Espessura equivalente do cavaco	28
2.3.2 Taxa de remoção	29
2.3.3 Energia específica	29
2.3.4 Velocidade de avanço.....	30
2.3.5 Profundidade de corte (a_p).....	30
2.3.6 Comprimento de contato	31
2.4 Rebolo	31
2.4.1 Grãos abrasivos	32
2.4.2 Propriedades do grão abrasivo	36
2.4.3 Ligante.....	37
2.4.4 Dureza do rebolo	37
2.4.5 Desgaste do rebolo	38
2.4.6 Dressagem	40
2.5 Fluidos de corte.....	41
2.5.1 Emulsões	44
2.5.2 Problemas da utilização de fluidos de corte	44
2.6 Soluções para minimização do uso de fluidos de corte.....	46
2.6.1 Mínima quantidade de lubrificante (MQL).....	47
2.6.2 Parâmetros da Mínima Quantidade de Lubrificante	50

2.7 Danos térmicos.....	51
2.8 Morfologia da superfície usinada.....	55
2.9 Empastamento do rebolo	57
2.10 Alternativas para a limpeza da superfície de corte do rebolo	58
2.10.1 Limpeza da superfície de corte do rebolo por sistema secundário de fluido de corte	59
2.10.2 Limpeza da superfície de corte do rebolo com jato de ar comprimido	61
3 MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1 Equipamentos e procedimentos.....	64
3.1.1 Retificadora	64
3.1.2 Rebolos.....	64
3.1.3 Dressador.....	65
3.1.4 Corpo de prova	65
3.1.5 Sistema de lubrificação convencional	66
3.1.6 Sistema de Lubrificação por Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)	66
3.1.7 Sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido.....	68
3.1.8 Sistema de aquisição de dados de potência elétrica consumida.....	70
3.1.9 Sistema de aquisição de dados de emissão acústica.....	70
3.2 Parâmetros de entrada do processo de retificação	71
3.3 Procedimento de ensaio.....	74
3.4 Variáveis de saída	75
3.4.1 Rugosidade superficial	75
3.4.2 Desvio de circularidade	76
3.4.4 Preparação de amostras para microdureza e análise metalográfica	79
3.4.5 Microscopia óptica das peças	81
3.4.6 Microdureza	81
3.3.7 Potência elétrica consumida	83
3.3.8 Emissão acústica	83
3.3.9 Microscopia confocal	83

3.3.10 Custo por peça	84
3.3.11 Emissão de carbono por peça	85
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
4.1 Rugosidade superficial	87
4.2 Erro de circularidade	88
4.3 Desgaste diametral do rebolo	90
4.4 Emissão acústica	92
4.5 Morfologia da superfície retificada.....	93
4.6 Potência de retificação.....	95
4.7 Microscopia ótica	97
4.8 Custo por peça	98
4.9 Emissão de carbono	101
5. CONCLUSÕES.....	103
6. PRODUÇÕES CIENTÍFICAS.....	104
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	106
REFERÊNCIAS.....	107
APÊNDICES.....	126

1. INTRODUÇÃO

O mercado de abrasivos movimenta cerca de 10 bilhões de euros por ano, no qual 36% são referentes aos rebolos (LINKE, 2015b). Entre os grãos abrasivos convencionais mais comuns estão o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carbetto de silício (SiC). Além dessa classificação, existem os superabrasivos, como o Nitreto Cúbico de Boro (CBN) e o diamante, que são capazes de entregar excelente acabamento superficial com baixo desgaste, graças à sua maior resistência mecânica e térmica (RODRIGUEZ et al., 2020; SATO et al., 2019, 2020; TAWAKOLI et al., 2011).

O CBN se destaca pela sua alta condutividade térmica de 1300 W/m.K, superior aos 40 W/m.K apresentados pelo Al_2O_3 . Isso permite uma melhor dissipação de calor durante a retificação (KLOCKE et al., 2015). No entanto, Oliveira et al., (2009) apontaram que o custo dos rebolos de CBN e as adaptações necessárias para o uso desse tipo de ferramenta representam 57% das razões pelas quais as indústrias ainda não utilizam esse abrasivo. Assim, apesar da superioridade do CBN em relação aos grãos convencionais, o custo ainda é um fator limitante para a adoção dessa tecnologia, o que mostra a necessidade de aprimorar ainda mais seu desempenho com métodos alternativos.

Durante o processo de formação do cavaco, há elevado atrito e pressão no contato entre ferramenta e peça, provocando altos esforços que geram alta quantidade de energia térmica que aquece a região de contato entre rebolo e peça (DE MARTINI FERNANDES et al., 2019; DING et al., 2018; KAKAÇ; PRAMUANJAROENKIJ, 2009; LOPES et al., 2019b; RODRIGUEZ et al., 2019c; SADEGHI et al., 2009). Caso o calor gerado no processo não seja dissipado de forma eficiente, o material retificado pode ser submetido a temperaturas capazes de modificar as propriedades mecânicas do metal por meio de deformações térmicas e mudanças microestruturais (LOPES et al., 2019a; PAKNEJAD; ABDULLAH; AZARHOUSHANG, 2017; TAWAKOLI et al., 2009). Para dissipar o calor gerado no processo e assim evitar que o material sofra danos térmicos é utilizado fluido de corte, que na maioria das vezes é uma emulsão de água e óleo (BRINKSMEIER et al., 2015). A utilização de fluido de corte aplicado em alta vazão na zona de corte é conhecido como refrigeração convencional. Essa técnica é a mais popular no ambiente industrial por apresentar ótima capacidade em refrigerar o processo, lubrificar a zona de corte e expulsar resíduos para fora do processo de usinagem (JAVARONI et al., 2020a; MATTHEW, 2009; REDDY; GHOSH, 2014; RIBEIRO et al., 2020b; SCHWARZ et al., 2015; SINHA et al., 2016; SINOT; CHEVRIER; PADILLA, 2006; TALON et al., 2021).

Por outro lado, o fluido de corte é extremamente tóxico ao meio ambiente e nocivo à saúde humana. Usualmente, substâncias como formaldeídos, alcanoaminas e materiais orgânicos voláteis estão presentes em sua composição, o que causa dermatite, problemas respiratórios e até câncer em alguns casos de acordo com a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer. Além disso, o fluido de corte deve passar por processos complexos antes de ser descartado, pois essa substância tem potencial para poluir o solo e água, afetando assim a fauna e flora do local onde é descartado. O descarte adequado do fluido de corte é caro, além disso, indenizações por condições insalubres e tratamento de saúde para os funcionários expostos ao produto acabam tornando sua utilização dispendiosa (DEBNATH; REDDY; YI, 2014, 2016; JABBAR et al., 2017; KURAM et al., 2013; SHOKOOHI; KHOSROJERDI; RASSOLIAN SHIADHI, 2015).

De acordo com Fang et al. (2011) 85% da energia consumida pela usinagem é utilizada por sistemas de recirculação de fluido e outros equipamentos que não realizam o corte do material de fato. Além disso, os processos de usinagem representam cerca de 90% da energia consumida pelas indústrias (DUFLOU et al., 2012; SUN; LI, 2014). Dessa forma, constata-se que energia consumida pelos periféricos utilizados pela usinagem representa uma parcela significativa da eletricidade total consumida pelas indústrias. Para se ter uma ideia, esse setor consumiu por volta de 32 bilhões MJ em 2017 com previsão de consumir 26 trilhões de MJ em 2030. Este consumo energético é muito preocupante para a sociedade, uma vez que a Agência Internacional de Energia (IEA) afirmou que o setor de produção de eletricidade foi responsável por cerca de 40% das emissões de CO₂ em 2017, representando aproximadamente 13.600 Mt de CO₂. Outro ponto importante é a quantidade de CO₂ emitida durante a fabricação do fluido de corte, que atingiu cerca de 2300 Mt de CO₂ em 2016 (SAID et al., 2019). Visto que o uso da refrigeração convencional necessita de vários equipamentos de recirculação, que gastam muita energia, além de consumir grande quantidade de fluido de corte, que em sua fabricação há emissão de grande quantidade de CO₂ demonstra que sua utilização contribui para o aquecimento global. Ademais, os impactos na saúde humana e ao meio ambiente estão entre os malefícios da utilização de fluidos de corte em abundância. Tais pontos ressaltam a importância do estudo de novas tecnologias que substituam o método convencional de lubrificação-refrigeração.

Nesse cenário, Jawahir et al., (2016) e Garcia et al., (2020) afirmaram que os métodos de criogenia, nanofluidos e principalmente a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) são alternativas promissoras para substituir a refrigeração convencional. A técnica de criogenia consiste na utilização de fluidos não poluentes em baixas temperaturas, com isso há alta capacidade de remoção de calor da zona de corte, evitando danos térmicos ao material e

aumentando a produtividade do processo. Entre os fluidos mais utilizados por esse método estão: nitrogênio líquido, dióxido de carbono supercrítico e hélio líquido. Os nanofluidos por outro lado aumentam a condutividade térmica do fluido pela adição de nanopartículas em um fluido base (LOPES et al., 2020b).

A técnica de MQL consiste em partículas de óleo atomizadas em uma matriz de ar comprimido gerando um aerossol que é precisamente direcionado a zona de corte. Dessa forma, uma quantidade mínima de lubrificante é utilizada, no entanto, uma boa lubrificação do processo é gerada. Pesquisas aplicaram a técnica de MQL na retificação, mas constataram que o baixo efeito refrigerante e o acúmulo de resíduos no processo (empastamento) ainda afetam os resultados do processo (BELENTANI et al., 2013; BIANCHI et al., 2018c; CHETAN; GHOSH; VENKATESWARA RAO, 2015; DA SILVA et al., 2020; DE MORAES et al., 2019; JAVARONI et al., 2020b, 2020c; LOPES et al., 2020a, 2020c; PEREIRA et al., 2016; RIBEIRO et al., 2020d; RODRIGUEZ et al., 2021; WANG et al., 2017).

A vazão de fluido de corte aplicada pela técnica de MQL (30 a 200 ml/h) é muito menor comparada com a refrigeração convencional (1,8 a 30,6 l/h considerando apenas o óleo presente na emulsão) (BRINKSMEIER et al., 2015; SILVA et al., 2013). Assim, há uma redução de 88,9-99,9% de óleo quando a técnica de MQL substitui a refrigeração convencional, reduzindo os gastos com aquisição e descarte, além de reduzir a emissão de CO₂ durante a fabricação do óleo, beneficiando assim a indústria e o meio ambiente. Usualmente a refrigeração convencional utiliza emulsões de água e óleo como fluido de corte, em torno de 3% de óleo na maioria das vezes. Dessa forma, a vazão de fluido de corte chega a 1020 l/h no método convencional, necessitando assim de sistemas de armazenamento, recirculação e descarte para esse grande volume de fluido. Por outro lado, o MQL utiliza uma quantidade mínima de fluido, o que simplifica a armazenagem e aplicação de fluido de corte, reduz o consumo de energia, dispensa sistemas de descarte e simplifica o processo, beneficiando a indústria e o meio ambiente.

Uma camada de ar ao redor do rebolo é formada devido às altas rotações da ferramenta durante o processo de retificação. Essa camada impede que o fluido de corte penetre eficientemente na zona de corte. Estudos afirmam que cerca de 5-40% do fluido de corte aplicado pela refrigeração convencional penetra de fato na zona de corte, com isso a eficiência de aplicação é baixa, em outras palavras, um desperdício de fluido de corte e energia (DANIEL et al., 2020; ZHANG et al., 2020b).

A técnica de MQL tem eficiência em penetrar a barreira de ar para entregar o fluido de corte na zona de corte, visto que o jato de ar que contém as gotículas de óleo possui alta

velocidade. Outro ponto interessante é a ocorrência do efeito Rebinder na técnica de MQL. A atomização do fluido quebra o líquido em minúsculas gotículas, nas quais o tamanho facilita sua penetração no relevo superficial da peça. Assim, o óleo impede que as micro irregularidades da superfície se fechem durante as deformações de corte, tornando-se concentradores de tensão e, portanto, reduzindo o estresse de corte (DAVIM, 2008; MORAES et al., 2019; SADEGHI et al., 2010). A ISO 14000 considera a técnica de MQL como um método ambientalmente correto, além disso a bibliografia cita que o MQL é uma excelente alternativa para a refrigeração convencional (JAVARONI et al., 2020b; KAPŁONEK et al., 2020; KHAN et al., 2018; LI; LI, 2016; LOPES et al., 2020a; MIA et al., 2018; RIBEIRO et al., 2020c; SANCHEZ et al., 2010; TAWAKOLI; HADAD; SADEGHI, 2010).

Apesar da excelente lubrificação provida, a técnica de MQL apresenta um baixo poder refrigerante, visto que a dissipação térmica é proveniente da convecção forçada de ar, enquanto no método convencional há grande quantidade de água envolvendo a zona de corte (DA SILVA et al., 2020; SETTI et al., 2015). Assim, a utilização de MQL na retificação pode expor o material usinado a altas temperaturas, causando danos a peça. Além disso, as altas temperaturas e o acúmulo de resíduos no processo ocasionam o empastamento do rebolo, em que os poros são preenchidos com resíduos e os grãos abrasivos são cobertos. A redução de grãos abrasivos ativos durante a remoção de material faz com que o esforço sobre os grãos aumente, de forma a aumentar os mecanismos de desgaste de macro fratura e soltura de grãos (MARINESCU et al., 2012; RIBEIRO et al., 2020a; RODRIGUEZ et al., 2020). Além do desgaste prematuro, o empastamento do rebolo aumenta a potência de corte e reduz a qualidade superficial da superfície retificada. Assim, apesar de mitigar os problemas ambientais causados pela refrigeração convencional, o MQL ainda apresenta gargalos a serem resolvidos antes de sua aplicação em larga escala no setor industrial (baixo poder refrigerante e alta ocorrência de empastamento) (BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017; HADAD, 2015; MIA et al., 2018; MORETTI et al., 2020; PEREIRA et al., 2016; SINHA et al., 2017; TUNC; GU; BURKE, 2016).

Para lidar com o empastamento do rebolo a aplicação de um jato de ar incidindo na superfície do rebolo apresentou ótimos resultados nos trabalhos de Lopes et al. (2020a) e Ribeiro et al. (2020b). O jato de ar aplicado em alta velocidade expulsa grande parte dos resíduos alojados na superfície do rebolo, com isso a porosidade permite a entrada de fluido de corte na zona de contato e fica disponível para alojar os resíduos gerados durante a remoção de material. Além disso, os grãos abrasivos que antes estavam cobertos pelo empastamento são descobertos, melhorando a distribuição da força de corte entre os grãos ativos, reduzindo os

macros desgastes. A diminuição do empastamento também reduz os esforços de corte e melhora a qualidade superficial da peça. Nota-se que a adoção do sistema de limpeza com ar comprimido é simples, apresenta um baixo custo e melhora os resultados da retificação.

Rodriguez et al. (2020a) estudaram a aplicação de MQL com o sistema de limpeza de ar comprimido e obtiveram bons resultados com o método analisado. Portanto, o sistema de limpeza combinado com MQL pode dar origem a um método lubrificação sustentável que pode substituir definitivamente o convencional em toda a indústria, beneficiando a sociedade, os funcionários, o meio ambiente e até mesmo a própria indústria. Demonstrando esse potencial, o uso do sistema de limpeza aliado ao MQL reduziu em média 40% a rugosidade da superfície e 50% o desgaste do rebolo em comparação com o MQL tradicional com base nos trabalhos que comparam essas técnicas, se aproximando significativamente dos resultados obtidos com o convencional (BIANCHI et al., 2018b; LOPES et al., 2019b, 2020a; RODRIGUEZ et al., 2019b). No entanto, a literatura sobre o sistema de limpeza associado a MQL ainda é escassa, considerando que não há estudos comparando diretamente diferentes tipos de rebolos, como convencionais e CBN, além dos poucos que estudam a quantidade ótima de óleo necessária para obter bons resultados aplicando MQL.

Esta pesquisa tem como objetivo comparar o desempenho de rebolos CBN e Al_2O_3 , o método convencional com MQL, com e sem o sistema de limpeza e diferentes quantidades de vazão de óleo (30, 60 e 120 ml/h) no processo de retificação cilíndrica. A peça analisada é composta de aço AISI 4340 temperado e revenido e os parâmetros de saída são o parâmetro médio de rugosidade superficial (R_a), erro de circularidade, desgaste diametral do rebolo, emissão acústica, potência de retificação, análise de custo e emissão de CO_2 . Além disso, a microscopia confocal foi aplicada na peça e a microscopia eletrônica de varredura foi usada na superfície ativa do rebolo. Além disso, a comparação dos dois tipos de rebolos sob as mesmas condições de retificação é rara na literatura, o que pode ajudar na avaliação de resultados com CBN ou Al_2O_3 na indústria. Além disso, a análise de custo do método lubrificação é extremamente escassa nos trabalhos relacionados à retificação, o que pode trazer uma nova forma de análise para esse campo de pesquisa e mostrar o custo para a indústria aplicar esses métodos estudados. Finalmente, MQL e o sistema de limpeza são ótimas alternativas ao método convencional com fluido de corte abundante, o que beneficia a indústria, a sociedade e o meio ambiente. A novidade deste estudo é a comparação entre os rebolos de retificação CBN e Al_2O_3 , analisando os resultados do processo, os custos envolvidos e a emissão de carbono, parâmetros essenciais para a viabilidade do processo. Assim, este trabalho pode expandir a limitada

literatura referente a esses insumos aplicados para beneficiar a indústria, a sociedade e a preservação do meio ambiente.

1.1 Motivação

A conscientização mundial a respeito do meio ambiente, acelerou as pesquisas relacionadas à redução da poluição. Outro ponto, foram as leis e regulamentações que surgiram para limitar a poluição causada pelas indústrias, de forma que cada vez mais esse setor tende a buscar a sustentabilidade em seus processos produtivos. Por esses motivos, metodologias alternativas à aplicação convencional do fluido de corte em abundância nos processos de usinagem estão sendo desenvolvidas para evitar os efeitos negativos de sua utilização. Entre os problemas causados pelo fluido de corte estão: alto custo de aquisição, manutenção e descarte, problemas de saúde causados nos trabalhadores que entram em contato com o mesmo e poluição do meio ambiente.

A Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) ameniza drasticamente os efeitos negativos do fluido de corte. No entanto, através de pesquisas em banco de dados nacionais e internacionais nas plataformas Scopus, Google Scholar, Science Direct e outros, observou-se que existem lacunas nos estudos relacionados a aplicação da técnica de MQL na retificação para que a análise se torne mais completa. Com base na revisão bibliográfica observou-se que o MQL apresenta ótimos resultados em processos de usinagem com geometria definida. Já para o processo de retificação a técnica apresenta baixa refrigeração e não expelle os resíduos pra fora do processo de forma adequada. Assim, a técnica de MQL necessita de novas tecnologias e ajustes nos parâmetros para atingir seu pleno potencial.

O desafio atual é entregar ótimos resultados aplicando a técnica de MQL na retificação. No entanto, além da qualidade da peça, outros fatores são extremamente importantes para que a análise seja completa. O custo do processo é um parâmetro extremamente importante para as indústrias, é baseada na análise de custos que as companhias analisam a viabilidade de implementação de uma nova tecnologia. Além disso, avaliar o impacto da nova tecnologia ao meio ambiente se torna indispensável para entregar processos que evitam a poluição.

De maneira inédita, o presente estudo apresenta análise de custo e emissão de carbono para avaliar cada condição analisada, possibilitando assim analisar a qualidade, custo e impacto no meio ambiente. Com base nesta metodologia de análise, dilemas como a escolha da ferramenta (abrasivos convencionais ou superabrasivos) se tornam mais simples de se resolver.

1.2 Objetivo geral

Otimizar o desempenho dos rebolos de CBN e Al_2O_3 na retificação do aço endurecido utilizando Mínima Quantidade de Lubrificante.

1.3 Objetivos específicos

- Comparar a qualidade das peças produzidas pelos rebolos de CBN e Al_2O_3 em termos de rugosidade superficial, circularidade e morfologia da superfície;
- Analisar o custo do processo e emissão de carbono para cada condição analisada;
- Definir os parâmetros ideais para a retificação visando qualidade, custo e sustentabilidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo será apresentada a revisão bibliográfica realizada durante o desenvolvimento da pesquisa. Ressalta-se que o conhecimento obtido durante essa etapa da pesquisa foi extremamente importante para o sucesso do trabalho. Serão apresentados os temas relevantes à pesquisa, como: retificação, fluido de corte, mínima quantidade de lubrificante e variáveis de saída.

2.1 Processo de Retificação

A retificação é um processo de usinagem por abrasão de geometria não definida. Nessa classificação também se cita: polimento, lapidação, afiação e processos de super acabamento. O processo de retificação é considerado um processo estratégico para as tecnologias de ponta por entregar peças de alta qualidade e com alto valor agregado, isso porque esse processo entrega precisão dimensional, exatidão geométrica e qualidade superficial (SETTI et al., 2015). A remoção do material por abrasão é um dos precursores da usinagem, apenas disso essa classe de processos continua essencial na cadeia produtiva (LINKE, 2015b). De acordo com Dotto et al., (2019) a retificação representa cerca de 70% de todos os processos de precisão.

A retificação é aplicada no final da cadeia produtiva para corrigir variações dos processos anteriores, exemplos: torneamento, fresamento e tratamentos térmicos. Nota-se que a retificação é utilizada apenas quando necessário e em peças que já possuem um alto valor, assim erros durante essa etapa são custosos (ROWE, 2014). Dotto et al., (2019) explicam que o processo de retificação é considerado crítico e complexo, visto que o corte é realizado por várias arestas de corte distribuídas aleatoriamente. B. S. Linke, (2015) complementou que durante o processo grãos de diversos tamanhos, geometrias e diferentes propriedades físicas estão em contato com o material.

De acordo com Linke B. S. Linke, (2015) retificação é um dos mais importantes processos de acabamento no qual é decisivo para a performance funcional do componente, nesse processo se utiliza o rebolo constituído por grãos abrasivos, ligantes e porosidade. Atualmente existem diversos tipos de grãos abrasivos e ligantes, os quais devem ser combinados para garantir maior eficiência do processo. Marinescu et al., (2007) resumiram os principais elementos da retificação e suas influências em: peça (geometria, dureza do material, velocidade da peça, rigidez e propriedades químicas e térmicas), ferramenta (estrutura, dureza, rigidez, velocidade, propriedades químicas e térmicas, tamanho de grão e ligante), método de

lubrificação (vazão, velocidade, pressão, propriedades físicas, químicas e térmicas) e máquina (precisão, rigidez, estabilidade térmica, absorção de vibrações).

A retificação apresenta uma alta energia específica, isto é, consome grande quantidade de calor para remover uma pequena quantidade de material. Grande parte da energia consumida no processo é transformada em calor, devido aos diversos mecanismos de interação entre rebolo e peça, com isso as temperaturas do processo podem ser altas em casos em que a dissipação térmica se torna ineficiente (MAO et al., 2013). De acordo com Rowe, (2014) tipicamente a energia específica no processo de retificação varia de 15 a 700 J/m³, tal parâmetro varia de acordo com a dureza do material retificado e o grau de afiação do rebolo.

Durante o processo de retificação a potência varia, o ciclo de potência na retificação cilíndrica é retratada pela Figura 1 (ROWE, 2014).

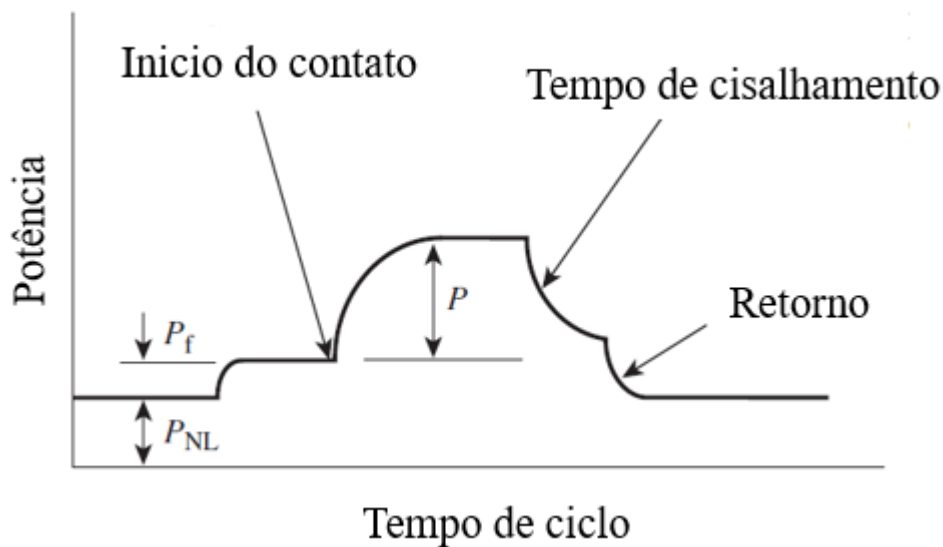


Figura 1. Ciclo da potência na retificação cilíndrica externa de mergulho (ROWE, 2014).

P_{nl} representa a potência dissipada quando não há cargas no eixo motor, dessa forma é constituída pelas ineficiências dos rolamentos e arrasto das partes moveis. P_f ocorre com o acionamento do fluido de corte que passa a criar força de arrasto na ferramenta de corte. Após início do corte uma potência adicional é demandada, a potência de retificação, a qual é direcionada para efetuar a remoção de material. A potência decai no período denominado Spark-out é utilizado para corrigir as distorções induzidas durante o movimento de avanço, intervalo de tempo sem avanço ou retração do rebolo, assim corrige as distorções dimensionais (MARINESCU et al., 2012).

2.1.1 Retificação externa de mergulho

A retificação cilíndrica externa de mergulho tem como objetivo produzir superfícies cilíndricas, nessa classificação o movimento da peça é rotativo. A Figura 2 apresenta quais são os movimentos na retificação cilíndrica externa de mergulho, a velocidade de corte (v_s), velocidade da peça (v_w), profundidade real de corte (a_e) e velocidade de avanço (v_f). A Figura 3 apresenta as forças envolvidas no processo de retificação. Quando o sentido de rotação da peça e rebolo são opostos a retificação é chamada de concordante, já quando os sentidos de rotação são iguais é discordante (ROWE, 2014).

Na retificação discordante (sentido da rotação da peça igual a rotação do rebolo) os grãos abrasivos penetram com máxima profundidade no início da interação vão reduzindo a profundidade durante o contato. Já na retificação concordante (sentido da rotação da peça oposto ao sentido de rotação do rebolo) os grãos abrasivos iniciam o contato com a superfície da peça com profundidade de penetração zero e vão aumentando esse parâmetro até a máxima penetração no final da interação. A variação do sentido relativo entre ferramenta e peça impactam na energia específica, forças de retificação, qualidade superficial, desgaste do rebolo e tendência a queima (ROWE, 2014).

Na retificação concordante a exigência dos grãos abrasivos é menor e o deslizamento dos mesmos sobre a superfície da peça é maior, com isso os grãos abrasivos tendem a perder a afiação o que aumenta as forças de corte e reduz a vida útil da ferramenta. Na retificação discordante o impacto inicial dos grãos abrasivos com a peça promove a microfratura dos abrasivos o que favorece a auto afiação dos grãos e reduz o desgaste do rebolo (ROWE, 2014).

A entrega do fluido de corte tende a ser mais eficiente na retificação concordante pois o sentido das velocidades da peça e do rebolo é voltado para a zona de corte (ROWE, 2014).

Na retificação cilíndrica externa de mergulho o movimento do rebolo em direção a peça é o avanço de mergulho. Usualmente esse avanço é muito menor que a velocidade da peça e a velocidade da peça é muito menor que a velocidade de corte, com isso a remoção de material é realizada de forma espiral (ROWE, 2014).

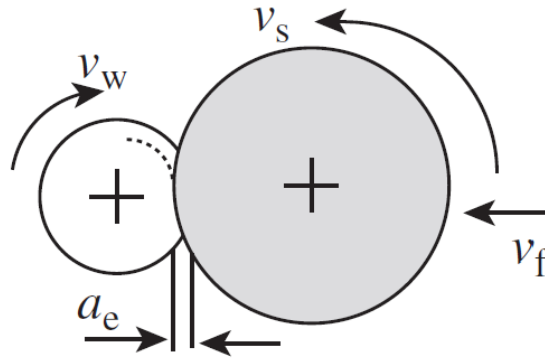


Figura 2. Principais parâmetros da retificação cilíndrica externa de mergulho (ROWE, 2014).

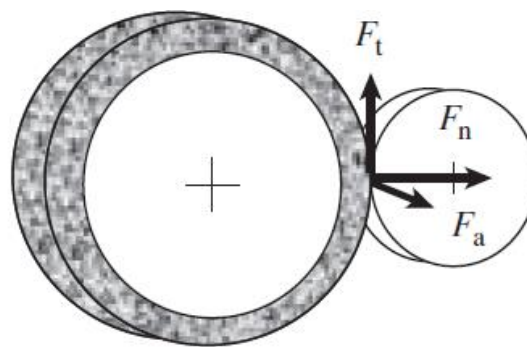


Figura 3. Forças envolvidas no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho (ROWE, 2014).

2.2 Interação do grão abrasivo com a superfície da peça

A energia demandada durante o processo de retificação é consumida em três diferentes tipos de mecanismo (i) corte puro ou por cisalhamento, (ii) deformações plásticas, (iii) atrito e deslizamento. Devido a aleatoriedade da distribuição de grão abrasivos no volume da ferramenta não é possível controlar a interação dos grãos abrasivos com a superfície da peça, dessa forma, durante a operação existem grãos que removem material com eficiência, os que apenas deformam o material e outros que apenas atiram com a superfície da peça (MACEROL; FRANCA; KRAJNIK, 2020).

De acordo com Rowe (2014) durante o corte os grãos abrasivos passam por três etapas: deslizamento, deformação e remoção de material. Durante o processo um grão abrasivo pode apenas deslizar sobre a peça, pode deslizar e deformar o material ou deslizar, deformar e remover o material, isso vai depender de sua geometria e seu posicionamento em relação a peça.

Rowe (2014) representou as etapas de corte pela Figura 4. No processo de retificação o grão abrasivo permanece fixo na ferramenta e seu percurso é predefinido, definido pelo movimento relativo entre a peça e rebolo. No início do contato, o grão abrasivo deforma

elasticamente o material, em seguida ocorre a deformação plástica do material e, por fim, a formação do cavaco. Durante o percurso do grão abrasivo sobre a superfície da peça, o material é deformado para as laterais da trajetória, causando elevações na superfície da peça.

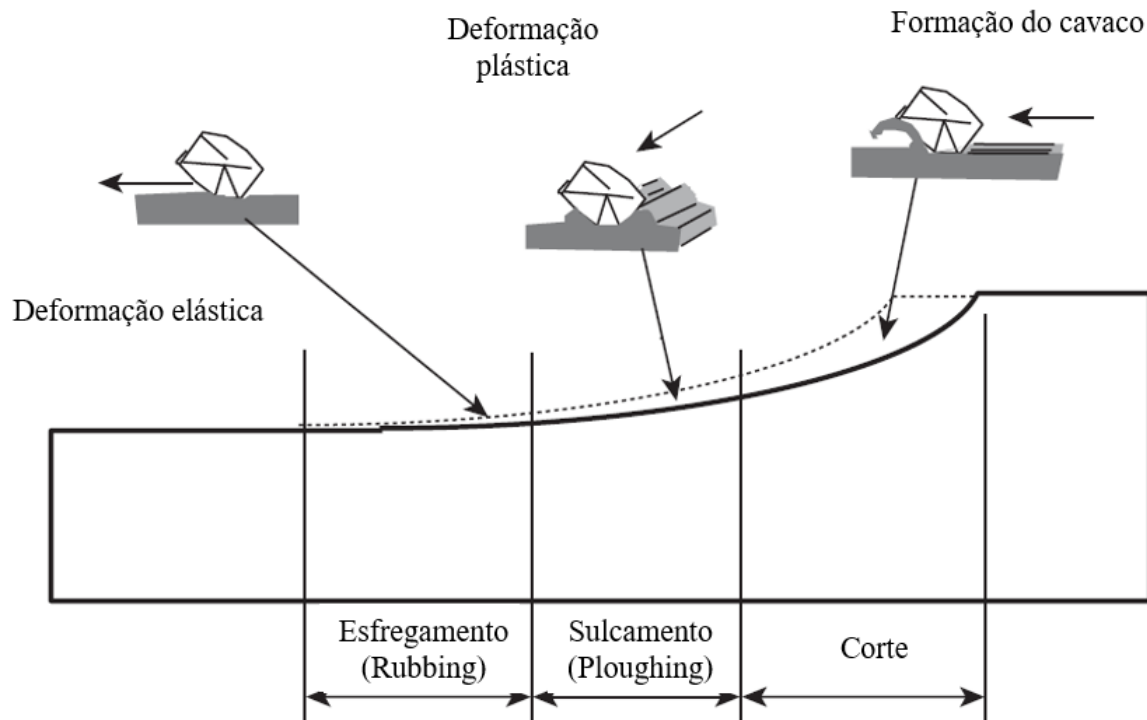


Figura 4. Etapas do processo de corte na retificação (ROWE, 2014).

Durante a deformação elástica a remoção de material é mínima, pois a força que causa a penetração do grão abrasivo sobre a peça é baixa. A deformação ocorre com o aumento da penetração e ainda não há remoção de material significativa. Nessa situação, a superfície da peça apresenta cristas laterais formadas nas laterais da trajetória do grão abrasivo, o termo em inglês é *side flow* (MARINESCU et al., 2007).

A remoção de material se inicia no momento em que o grão abrasivo atinge a profundidade crítica de corte, em profundidades de corte menores o grão abrasivo deforma plasticamente o material, expulsando-o para as laterais de sua trajetória (TAWAKOLI et al., 2009).

2.3. Parâmetros da retificação

2.3.1 Espessura equivalente do cavaco

Esse parâmetro representa a espessura da camada de material que emerge da zona de corte se o volume removido de material fosse uma camada sólida. A espessura equivalente do

cavaco é menor que a profundidade de material removido programada, isso porque durante o processo de corte o sistema sofre deformações que diminuem a profundidade de corte. A espessura equivalente de cavaco é calculada pela equação 1 (ROWE, 2014).

$$h_{eq} = a_e \times \frac{v_w}{v_s} \quad (1)$$

A profundidade real de corte (a_e) é calculada subtraindo da profundidade de corte programada as deformações do sistema, o desgaste do rebolo e se adiciona as expansões térmicas.

2.3.2 Taxa de remoção

A taxa de remoção representa a quantidade de material removida a cada instante de tempo, tal parâmetro tem grande influência nos resultados obtidos e na energia consumida no processo. A equação 2 apresenta o cálculo para determinação da taxa de remoção (ROWE, 2014).

$$Q = b_w \times a_e \times v_w \quad (2)$$

Onde o b_w é a largura da peça, o a_e é a profundidade de penetração do rebolo e o v_w é a velocidade da peça.

2.3.3 Energia específica

Uma vez que as interações entre o abrasivo e a peça respeitam a lei da conservação da energia, a energia específica pode ser utilizada para quantificar a energia consumida no processo e medir o grau de interação entre o abrasivo e a peça durante a retificação. A energia específica é proporcional às forças da retificação e também é relacionada às propriedades do material usinado e dos parâmetros utilizados na retificação (REN; ZHANG; ZHOU, 2009).

A energia específica é o produto da potência da retificação sobre a taxa de remoção, esse parâmetro evidencia a eficiência do processo em remover material (ROWE, 2014).

$$e_c = \frac{P}{Q} \quad (3)$$

A retificação é um processo intenso em termos de energia, em outras palavras é um processo que requer uma grande quantidade de energia para remover um volume de material, comparado a outros processos de usinagem. Praticamente toda essa energia é transformada em calor, que fica concentrado na região de corte, com isso o processo pode atingir altas temperaturas (ALAGUMURTHI; PALANIRADJA; SOUNDARARAJAN, 2007).

2.3.4 Velocidade de avanço

A velocidade de avanço ou de mergulho da ferramenta, segundo Marinescu et al. (2007), corresponde à velocidade do rebolo na direção normal à superfície da peça no ponto em que se dá o contato entre ambos. Este parâmetro afeta diretamente o acabamento da peça e as forças de corte, sendo que quanto maior a velocidade de avanço, maiores as forças de corte e, conseqüentemente, maior a rugosidade superficial da peça (GE et al., 2019).

2.3.5 Profundidade de corte (a_p)

Segundo Malkin e Guo (2008), a profundidade de corte (a_p) equivale a profundidade que o rebolo entra na peça em relação à sua superfície, com uma velocidade de avanço v_f , durante uma revolução completa da mesma, sendo representada pela Equação 4:

$$a_p = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \quad (4)$$

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

No entanto, a equação 4 desconsidera o desgaste da ferramenta, deflexões no sistema e outras variações, como dilatações térmicas, velocidade de corte, velocidade da peça, entre outros. Assim, a profundidade real de corte (a_e) pode ser calculada pela equação 5 (ROWE, 2014).

$$a_e = a_p - x - a_s + x_{exp} \quad (5)$$

Onde: a_p é a profundidade de corte programada, x a deflexão do sistema, a_s o desgaste do rebolo e x_{exp} a expansão térmica da peça e elementos da máquina. Visto que os termos dessa equação são difíceis de mensurar, é necessário realizar a medição da peça logo após o processo para se determinar a profundidade real de corte (ROWE, 2014).

2.3.6 Comprimento de contato

O comprimento de contato (l_c) pode ser entendido como a extensão do contato entre a peça e o rebolo durante o processo. Tal parâmetro define a quantidade de grãos em contato com o material retificado. Quanto maior o comprimento de contato, maior a quantidade de grãos que irão suportar as forças de corte e, portanto, menor a pressão sobre cada grão. Desta forma, se o comprimento de contato é maior, pode-se também aumentar a porosidade do rebolo e o tamanho dos grãos, o que resulta em uma diminuição do número total de grãos do rebolo e em uma melhor dissipação de calor, já que o aumento na porosidade favorece a remoção de cavacos e a ação do fluido de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). O comprimento de contato é definido pela Equação 7.

$$l_c = \sqrt{a_e \cdot d_e} \quad (7)$$

Onde: a_e é a profundidade real de corte e d_e o diâmetro equivalente.

2.4 Rebolo

A ferramenta de corte utilizada para remover material no processo de retificação é o rebolo, constituído por grãos abrasivos, ligante, porosidade e em alguns casos um corpo metálico, conforme observado na Figura 5. Usualmente, rebolos de grãos superabrasivos são constituídos por uma fina camada de abrasivos sobre o corpo do rebolo que pode ser fabricado em alumínio, aço, bronze, resinas sintéticas com enchimento metálico, fibras com resinas ou cerâmicas. Os rebolos fabricados atualmente proporcionam altas taxas de remoção e precisão que não eram imaginados décadas atrás, graças ao desenvolvimento de ferramentas de corte cada vez mais aprimoradas. No caso da retificação, a combinação do abrasivo correto, do ligante apropriado, da porcentagem de porosidade presente no rebolo e no design otimizado resultam em um rebolo de alta performance (ROWE, 2014).

A estrutura, composição química, topografia da superfície de corte e comportamento durante o processo são fatores que determinam o desempenho do rebolo em termos de qualidade superficial, integridade superficial, estabilidade no processo e produtividade.

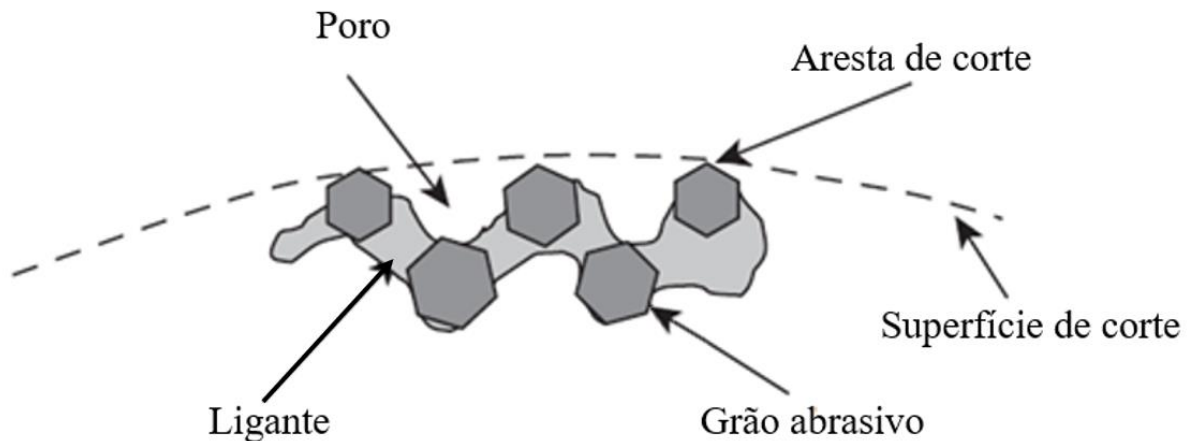


Figura 5. Elementos do rebolo (ROWE, 2014).

O comportamento da ferramenta irá depender do tamanho dos grãos abrasivos, do espaçamento entre eles e de seus formatos. Grãos maiores e mais espaçados resultam em pior qualidade superficial e menores esforços de corte, já grãos com granulometria fina e menos espaçados resultam em melhor acabamento superficial e maiores forças de corte (ROWE, 2014).

Os grãos abrasivos sustentados pelo ligante são responsáveis pela formação de cavaco, os poros são necessários para transportar o fluido e remover o cavaco gerado para fora da zona de corte (WINTER et al., 2015).

Uma vez que os abrasivos são distribuídos aleatoriamente sobre a superfície de corte, não é controlado o número de arestas de corte em contato com a peça, mas sabe-se que esse número se eleva conforme a profundidade de corte aumenta.

2.4.1 Grãos abrasivos

A finalidade do grão abrasivo é remover material através da formação de cavaco, para isso a dureza do grão abrasivo deve ser maior que a dureza do material. Além disso, a auto afiação dos abrasivos em condições de maiores forças de corte é desejada. As principais propriedades que definem o desempenho do grão abrasivo são: dureza, resistência em altas temperaturas, tenacidade e friabilidade. As outras características como tamanho, geometria, morfologia definem a quantidade de grãos abrasivos ativos no processo (LINKE, 2015a).

Os grãos abrasivos formam as arestas de corte do rebolo, assim a propriedade desejada para esse elemento é a dureza, que deve permanecer estável mesmo em altas temperaturas e ser

estável quimicamente com o material a ser usinado (MARINESCU et al., 2007). Dessa forma, a seleção dos grãos abrasivos é realizada com base no material a ser usinado e qualidade superficial desejada (LINKE, 2015b).

A queda de dureza com o aumento da temperatura ocorre na maioria dos abrasivos como visto na Figura 6, com exceção Dióxido de Silício que se transforma em uma estrutura de maior resistência em altas temperaturas (ROWE, 2014).

Além da estabilidade térmica é desejado que o abrasivo possua uma alta condutividade térmica, para evitar desgaste e reduzir a temperatura da zona de corte. Uma baixa condutividade térmica impede que o calor gerado no processo na zona de corte seja dissipado pela ferramenta, com isso a temperatura do abrasivo aumenta e o mesmo perde dureza e se desgasta rapidamente. Na Figura 6 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** os abrasivos com maior condutividade térmica são o diamante e o CBN, de acordo com Rowe (2014) a condutividade térmica depende da pureza do material assim a condutividade térmica desses dois materiais é apresentada em um intervalo.

Friabilidade é a propriedade do abrasivo em se fraturar quando submetido a forças de compressão. Grãos de alta friabilidade renovam suas arestas de corte constantemente, assim o rebolo sofre autoafiação durante o processo de corte (ROWE, 2014).

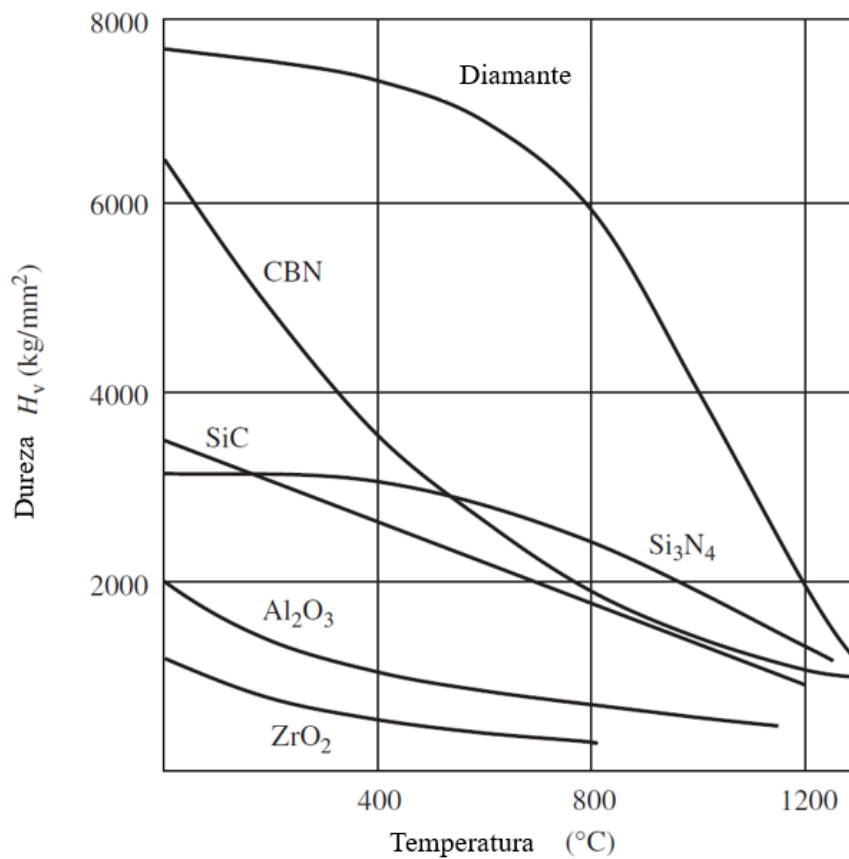


Figura 6. Dureza em função da temperatura (ROWE, 2014).

Abrasivo	Condutividade térmica (W/mK)	Densidade (Kg/m³)	Calor específico (J/kgK)
Diamante	600-2000	3520	511
CBN	240-1300	3480	509
Carbeto de Silício	100	3210	710
Óxido de Alumínio	35	3980	765

Figura 7. Propriedades térmicas dos abrasivos (ROWE, 2014).

Os abrasivos são divididos em dois principais grupos: superabrasivos e abrasivos convencionais. Essa divisão foi feita baseando-se na grande diferença de dureza entre os materiais resultando em uma considerável diferença no desgaste do rebolo e nas estratégias de retificação. Outro fator que diferencia os abrasivos é o custo, um rebolo feito de superabrasivo é de 10 a 100 vezes mais caro que o abrasivo convencional (Marinescu et al., 2007).

Os abrasivos convencionais apresentam menor dureza, no entanto, apresenta um custo mais acessível. Atualmente os rebolos de Al_2O_3 e SiC são amplamente aplicados na indústria, pois suas tecnologias já estão difundidas nesse setor.

Óxido de Alumínio (Al_2O_3)

O óxido de alumínio é utilizado em uma diversidade de materiais ferrosos, incluindo metais. Dependendo de sua pureza e preparação do abrasivo, os grãos podem ser mais resistentes ou mais afiados (Rowe, 2014).

Sua estrutura é baseada no $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ que é uma estrutura cristalina hexagonal, além dessa estrutura a alumina pode conter outros óxidos que são adicionados ou impurezas. O processo de obtenção de tal abrasivo começa com a bauxita, que é a principal matéria prima. O Al_2O_3 pode ser feita de três maneiras. A bauxita é desidratada pelo processo de calcinação e pode ser fundida diretamente com coque e ferro em um forno elétrico, pode ser purificada pelo processo Bayer e em seguida ser fundida ou pode ser sinterizada depois da compressão (MALKIN; GUO, 2008).

Dentre todos esses vários tipos de óxidos de alumínio uma característica geral de todos é a baixa condutividade térmica, um fator limitante no processo de retificação (MARINESCU et al., 2007).

De acordo com Marinescu et al. (2007) existem vários tipos de Al_2O_3 devido a possibilidade de adicionar diferentes óxidos em sua solução sólida, isso permite controlar facilmente suas propriedades. No caso do Al_2O_3 branco apresenta maior pureza e alta friabilidade, com isso é aplicada em rebolos vitrificados de alta precisão.

Os superabrasivos apresentam propriedades superiores aos abrasivos convencionais. Esse grupo é constituído pelo diamante e Nitreto Cúbico de Boro (CBN). O custo desses abrasivos é maior que os abrasivos convencionais, são utilizados para retificar materiais de alta resistência ou para aumentar o intervalo entre os processos de afiação, com isso os custos do processo reduzem.

CBN

O Nitreto Cúbico de Boro, sintetizado pela primeira vez por Wentorf em 1960, é o segundo material mais duro e apresenta vantagens em relação ao diamante: maior tenacidade e maior estabilidade química com o aço, dessa forma é amplamente aplicado na retificação de aços (YUN et al., 2020). Sua dureza é de $4,5 \text{ kg/mm}^2$, isto é, aproximadamente metade da

dureza do diamante e o dobro da dureza de abrasivos convencionais. Tais características são vantagens para utilização do CBN em processos de alta eficiência, a utilização de altas velocidades de corte e usinagem de materiais com alta resistência são aplicações em que o CBN possui vantagem em relação aos abrasivos convencionais (KUFFA; KUSTER; WEGENER, 2017).

Esse abrasivo é obtido de forma sintética submetendo Nitreto de Boro a temperaturas de até 2500 °C e pressões de 100.000 atm dependendo do catalizador utilizado (WENTORF, 1961). Klocke, (2009) apresentou a sintetização do CBN pela reação do Cloreto de Boro com Amônia na presença de um catalizador na temperatura de 1800 °C a 2700 °C e pressão de 50 kbar a 90 kbar.

Quando submetido a altas temperaturas o CBN forma uma camada de óxido de boro que previne a oxidação do abrasivo até 1300 °C (ROWE, 2014). No entanto, quando submetido em laboratório a altas temperaturas (1000 °C) na presença de água a camada de óxido não é formada e o abrasivo começa perder massa e trincar, tal reação não foi observada em experimentos de retificação onde o abrasivo foi submetido a altas temperaturas e fluido de corte (KLOCKE, 2009). O Nitreto Cúbico de Boro é usualmente aplicado na retificação de aços ferramenta, pois é quimicamente estável com o ferro e é capaz de usinar aços liga com dureza superior a 55 HRC. Além disso, o CBN apresenta baixo desgaste o que possibilita atingir alta tolerância geométrica e dimensional. Seu alto coeficiente de condutividade térmica aumenta a porcentagem da energia térmica dissipada pela ferramenta, com isso a probabilidade de ocorrência de danos térmicos a peça é reduzida (KLOCKE, 2009).

2.4.2 Propriedades do grão abrasivo

A granulometria determina o tamanho do grão abrasivo, usualmente são utilizadas peneiras com a escala *Mesh* para selecionar os grãos de determinadas dimensões. Basicamente o tamanho dos grãos abrasivos e sua concentração definem o número de arestas de corte, que por sua vez impacta espessura equivalente do cavaco. Usualmente, quanto menor o tamanho dos grãos abrasivos, menor é a rugosidade e maiores são os esforços de corte. Conforme o tamanho dos grãos aumentam pior é a qualidade superficial resultante. Tais fatos demonstram que a seleção correta do tamanho dos grãos é fundamental para um desempenho adequado do processo (LINKE, 2015a). Zhang et al., (2020a) avaliaram três tamanhos de grãos abrasivos na retificação de topo para verificar o impacto desse parâmetro nos resultados do processo de retificação. O coeficiente de atrito médio (razão entre força tangencial e a força normal)

aumentou com a redução do tamanho de grãos, da mesma forma o volume de material removido pelo rebolo com menor granulometria, indicando que, menores dimensões de grãos abrasivos, aumentam a participação de deformações plásticas e escorregamento nos mecanismos de remoção de material.

O formato e geometria do grão abrasivo afeta diferentemente na geometria das arestas de corte e a forma em que o grão abrasivo sofre a fratura. Para definição da geometria existem diversas características como arredondamento das arestas e elipticidade (LINKE, 2015a).

A tenacidade do grão abrasivo define a capacidade do grão abrasivo na absorção de impactos e propagação de trincas, tal propriedade controla como a fratura do grão se comportará quando em contato com o material usinado. A fratura pode ser de partículas grandes ou pequenas, resultando em uma superfície rugosa ou lisa, com uma aresta de corte ou mais arestas de corte. Usualmente, grãos com maior friabilidade e duros tendem a ser utilizados em processos de acabamento e grãos maiores e de maior robustez são utilizados em processos pesados de alta remoção. Alta tenacidade resulta em menores taxas de desgaste, mas não possuem uma boa autoafiação, com isso as forças de corte e atrito aumentam conforme os grãos abrasivos ficam cegos. Já grãos com alta friabilidade mantem as forças de corte devido a renovação constante das arestas de corte, no entanto, a vida útil do rebolo é menor e erros dimensionais são plausíveis de acontecer (LINKE, 2015a).

2.4.3 Ligante

O ligante é responsável por criar a fixação entre os grãos abrasivos. O ligante é dimensionado para manter o grão abrasivo fixo no rebolo até que perca a afiação, dessa forma a ferramenta gera novas arestas de corte que substituem as arestas cegas. Visto isso, o ligante é diretamente relacionado a qualidade e produtividade do processo, pois determina o mecanismo de desgaste da ferramenta e a taxa de renovação de grãos. (KLOCKE, 2009).

Os ligantes são classificados em: resinoides, vitrificados e ligantes metálicos. Cada classe de ligantes possui vantagens para um tipo de aplicação. Os ligantes resinoides possibilitam a aplicação de altas velocidades de corte e altas remoções de material, assim sua principal aplicação é no corte por abrasivo e retificação de desbaste. Os ligantes metálicos são aplicados em conjunto com os superabrasivos, apresentam alta resistência e condutividade térmica (KLOCKE, 2009).

Os ligantes vitrificados possuem alto modulo de elasticidade, são resistentes às altas temperaturas e quimicamente estáveis a óleos e água. O rebolos vitrificados são sensíveis a

impactos visto que possui elevado módulo de elasticidade (KLOCKE, 2009). Essa classe é composta por frita de vidro, argila, feldspato e bórax, tais elementos são misturados com água e aglutinante (ex. dextrin) prensados em moldes e aquecidos e resfriados em taxas e temperaturas controladas para garantir assentamento ideal do material (ROWE, 2014). Existe a possibilidade de criar ferramentas com alto nível de porosidade, utilizando materiais para criar porosidade induzida, devido à alta resistência do material vitrificado. Com a estrutura aberta o ferramental melhora o acesso do fluido de corte a zona de contato, permitindo melhor lubrificação e refrigeração do processo.

2.4.4 Dureza do rebolo

A dureza do rebolo é definida como a habilidade de resistir ao desprendimento dos grãos abrasivos, isto é a capacidade do ligante de reter o grão abrasivo. Assim quanto maior a dureza menor vai ser a quantidade de grãos que se desprenderão (MALKIN; GUO, 2008).

A dureza do rebolo geralmente indica a maneira como a ferramenta irá se desgastar. Um rebolo com dureza baixa irá se desgastar rápido e um rebolo de dureza elevada por sua vez irá se desgastar devagar. Essa característica depende do volume de ligante presente no rebolo. Quanto maior o volume de ligante, menor será a quantidade de porosidade tornando o rebolo mais duro. A dureza não pode ser modificada na dressagem, pois é uma característica intrínseca do rebolo. Os rebolos com alta dureza, não perdem a forma facilmente por reterem os grãos abrasivos por mais tempo, no entanto tendem a perder a afiação e com isso queima facilmente. Os rebolos com baixa dureza têm a habilidade de desprender os grãos abrasivos gastos, renovando assim as arestas de corte, mantendo a afiação do rebolo (ROWE, 2014).

A porosidade e a estrutura do rebolo estão relacionadas. Um rebolo com alta porosidade terá uma estrutura aberta e uma menor porção de ligante que um rebolo com porosidade regular com uma mesma estrutura. Um rebolo com alta porosidade tende a ser mole enquanto um rebolo com baixa porosidade tende a ser duro. Rebolos com estrutura aberta são essenciais para retificação com alta taxa de remoção, uma vez que as grandes quantidades de poros acomodam o cavaco, além de auxiliar a transportar fluido de corte para zona de corte (ROWE, 2014).

2.4.5 Desgaste do rebolo

O desgaste do rebolo prejudica a precisão do processo, pois o grão desgastado não possui a geometria adequada e nem a distribuição adequada. Uma vez que esses parâmetros não são atingidos é necessário realizar o processo de dressagem (YOSHIDA et al., 2021)

Existem quatro mecanismos de desgaste dos grãos abrasivos, onde a predominância de cada mecanismo de desgaste depende das condições de usinagem e da natureza do abrasivo.

O desgaste por atrito ocorre quando os esforços impostos sobre o grão abrasivo são pequenos, além de depender do tipo de interação entre grão abrasivo e material. A Figura 8 apresenta um exemplo de desgaste por atrito.

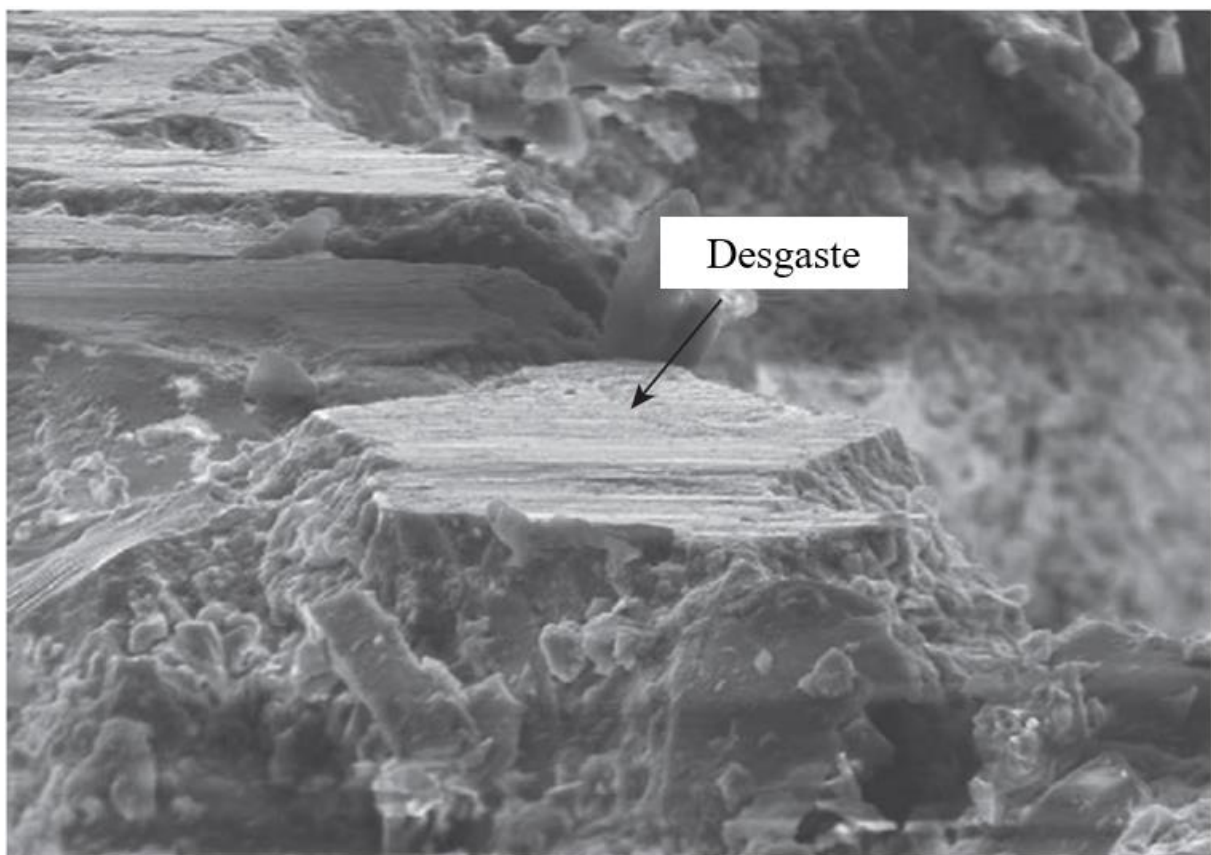


Figura 8. Exemplo de desgaste por atrito em um grão abrasivo Norton A46 (ROWE, 2014).

A remoção do grão abrasivo por completo é outro tipo de desgaste, que ocorre quando as forças de interação entre grão abrasivo e peça superam a resistência de retenção por parte do ligante. Usualmente a probabilidade desse mecanismo de desgaste ocorrer em rebolos com estrutura aberta é maior que em rebolos com menor porosidade, devido a maior proporção de área de contato entre ligante e grão abrasivo no último caso.

O desgaste por micro fraturas ocorre devido à natureza cristalina do grão abrasivo e do local onde os esforços se concentram. Esse mecanismo de desgaste é o mais desejado por manter a afiação dos grãos abrasivos em altos esforços com baixas taxas de desgaste.

O desgaste por macro fraturas também depende da estrutura cristalina e da intensidade de esforços implicados sobre o grão abrasivo, no entanto, nesse caso, maiores fragmentos são removidos do rebolo.

O desgaste do rebolo quando não identificado pode levar a erros na profundidade de corte, erros na dimensão final da peça, aumento das forças de corte.

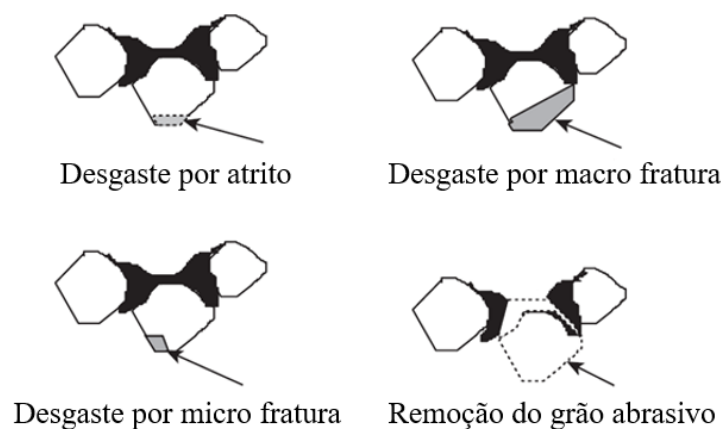


Figura 9. Quatro tipos de desgaste (ROWE, 2014).

2.4.6 Dressagem

Durante o processo de retificação é inevitável que o grão abrasivo sofra desgaste e empastamento, como consequência a temperatura e esforços de corte aumentam potencializando as chances de ocorrer danos térmicos e prejudicar a qualidade superficial. Além disso, o desgaste é prejudicial à acuracidade geométrica e dimensional da peça (DENG; XU, 2019).

O formato e distribuição das arestas de corte do rebolo pode ser modificado pelo processo de dressagem, que consiste em criar um formato e topografia desejados no rebolo (MARINESCU et al., 2007). Rowe, (2014) afirmou que o processo de dressagem corrige distorções no formato especificado do rebolo, cria afiação nas arestas de corte além de manter as mesmas distribuídas uniformemente na superfície de corte, remove o ligante em volta do grão abrasivo e remove a camada de empastamento do rebolo. Dotto et al., (2019) citam que durante o processo de retificação o rebolo desgasta e a capacidade de corte é reduzida, assim o processo de dressagem é utilizado para restaurar os padrões de corte da ferramenta.

DENG e XU, (2019) afirmaram que o processo de dressagem é fundamental para determinar a micro topografia da superfície de corte e a geometria do rebolo e consequentemente a performance do rebolo. Em resumo, a dressagem tem função de afiação e perfilamento. O perfilamento consiste na remoção do grão abrasivo e ligante para atingir o dimensional e a geometria desejada para o rebolo, tais fatores servem como referência para transmitir precisão dimensional e geométrica para a peça retificada. A afiação cria aspereza na superfície de corte do rebolo, para isso remove os grãos abrasivos dispensável e ligante para expor os grãos abrasivos. A dressagem de superabrasivos é classificada em três tipos: dressagem mecânica (com dressador conglomerado, dressagem paralela e dressagem com rebolo copo), dressagens especiais (dressagem por descarga elétrica, dressagem eletrolítica durante o processo e dressagem por pulso laser) e combinação de tipos de dressagem (dressagem por laser e mecânica, dressagem química e mecânica, dressagem mecânica assistida por ultrassom).

A dressagem deve ser realizada no tempo correto, intervalos entre dressagem maiores que o ideal prejudicam a qualidade das peças e em intervalos mais curtos resultam menor vida útil da ferramenta. O tempo de dressagem usualmente é determinado pela experiência do operador, sendo esse critério subjetivo não é possível padronizar e otimizar tal parâmetro (YOSHIDA et al., 2021).

Não é possível medir diretamente o desgaste do rebolo, assim, essa característica é mensurada por métodos indiretos. Os principais métodos de monitoramento das condições do rebolo são pela força e pelo calor gerado. Outros métodos, foram desenvolvidos para tal fim: utilização de sensores para monitorar a pressão da barreira de ar formada ao redor do rebo, instalação de termopares no rebolo, monitoramento da emissão acústica e redes neurais (YOSHIDA et al., 2021).

2.5 Fluidos de corte

Os fluidos de corte são utilizados nos processos de usinagem para melhorar a qualidade superficial e aumentar a precisão dimensional da peça (WICKRAMASINGHE et al., 2020). De acordo com Kirsch, (2017) intrinsicamente durante o processo de retificação muito atrito ocorre entre ferramenta e peça, gerando calor concentrado na zona de corte. Nadolny e Kierás, (2020) afirmam que durante a implementação de um processo de usinagem é importante considerar os aspectos térmicos do processo, pois a energia térmica gerada pelo contato da ferramenta com o material é suficiente para modificar a estrutura da camada superficial do material e capaz de

prejudicar a vida útil da ferramenta. De acordo com Irani et al., (2005) a alta geração de calor é um fator limitante para o processo de retificação. Nos processos em que a temperatura atinge níveis elevados, a integridade da peça é comprometida, além de prejudicar no dimensional da peça e induzir tensões residuais que prejudicam a vida útil da peça (LAVISSE et al., 2018). Na retificação as principais funções do fluido de corte são: criar uma camada estável e lubrificante com o intuito de reduzir o atrito entre os grãos abrasivos e peça, bem como entre o ligante e peça; resfriamento do material usinado e da superfície de corte do rebolo; limpar a superfície de corte do rebolo; remover os resíduos gerados no processo para fora do área de corte; formar filme protetivo contra corrosão para os componentes da máquina e peça usinada; prevenir crescimento de bactérias no meio.

Na retificação o efeito de refrigeração do fluido de corte é de extrema importância para evitar danos térmicos à peça, visto que o processo consome grande quantidade de energia para remover material, grande parte dessa energia é transformada em calor, que se não dissipado de forma adequada tem potencial para causar danos à peça (KIRSCH, 2017). A retificação é um dos últimos processos na cadeia de adição de valor, dessa forma erros causados nessa etapa são custosos. Assim, é de extrema importância evitar que danos térmicos ocorram nessa etapa. A aplicação de fluido reduz a possibilidade de tal fato ocorrer, ademais possibilita maiores taxas de remoção, reduzem o desgaste do rebolo e melhoram a qualidade do produto final (HEINZEL et al., 2020).

Entre as propriedades controladas em um fluido de corte está a viscosidade, que mensura a resistência do fluido à sua deformação. Tal propriedade está diretamente correlacionada com a capacidade de formação do filme lubrificante entre ferramenta e peça. Já fluidos com baixa viscosidade tendem a possuir um efeito refrigerante maior, menor arrasto, são mais facilmente separados do cavaco e mais simples de filtrar, no entanto, tendem a gerar névoa e apresentam menores temperaturas de combustão (KLOCKE, 2009).

Aplicação de fluido de corte em abundância é a principal metodologia utilizada, consiste em um fluxo contínuo de fluido de corte direcionado para a zona de corte. Para controlar a temperatura do processo, utiliza-se alta vazão ou alta pressão de fluido de corte no processo (LAVISSE et al., 2018). Estudos encontraram que na retificação, apenas de 5% a 20% da vazão de fluido de corte é utilizada para lubrificar a zona de corte, essa porcentagem é denominada “vazão útil (ENGINEER; GUO; MALKIN, 1992; LAVISSE et al., 2018). De acordo com Morgan et al., (2008) rebolos com maior porcentagem de porosidade apresentam melhor entrega de fluido de corte, além disso, por meio de simulações computacionais verificaram que para obter máximo aproveitamento da vazão de fluido de corte, o mesmo deve ser aplicado com

uma velocidade de 80-100% da velocidade de corte. No entanto, de acordo com as simulações apresentadas por Heinzl et al., (2015) o fluido de corte apresenta maior eficiência de resfriamento quando aplicado a uma velocidade de 70 a 90% da velocidade de corte. Lavis et al., (2018) concluíram em sua pesquisa que a utilização de fluido de corte reduziu em 30% o atrito ferramenta-peça, além disso, verificou que menores vazões e velocidades de aplicação do fluido de corte reduziram a eficiência de lubrificação e refrigeração do método.

O fluxo de ar que se forma ao redor do rebolo em rotação impede a entrada do fluido de corte na zona de contato, reduzindo a vazão útil. Tal efeito ocorre com o movimento da superfície porosa em alta velocidade que causa movimentação dos gases ao seu redor criando uma barreira de gases ao redor da superfície de corte do rebolo (HEINZEL et al., 2020). Na zona de contato o fluxo de ar é impedido de continuar sua trajetória, com isso um fluxo reverso é formado, aumentando a dificuldade de penetração do fluido de corte no contato entre ferramenta e peça (MAO et al., 2013). A Figura 10 ilustra a barreira de ar formada durante o processo de retificação.

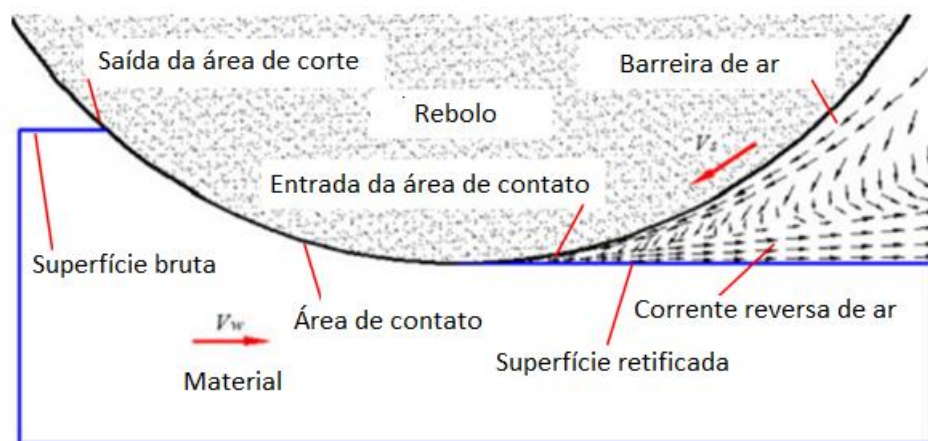


Figura 10. Barreira de ar formada ao redor do perímetro do rebolo (MAO et al., 2013).

Mandal et al., 2011) propuseram a utilização de um jato de ar comprimido próximo a zona de corte para criar uma barreira pneumática e reduzir o fluxo de ar ao redor da ferramenta de corte. A utilização de uma chapa posicionada próximo da superfície de corte do rebolo demonstrou melhor a eficiência do processo, melhorando sua produtividade e qualidade (MAJUMDAR et al., 2018).

Estudos demonstraram que aplicação de fluido em excesso (vazão alta) é menos eficiente do que a aplicação correta em menores quantidades, pois na retificação é necessário que o fluido atue na zona de contato e não em suas mediações. Para isso o escoamento laminar

é mais indicado para essa aplicação, onde em condições ideais o fluido preencheria completamente a zona de contato (HEINZEL et al., 2020).

Wickramasinghe et al., (2020) resumiram as propriedades de cada classe de fluido de corte na Tabela 1. Características das classes de fluido de corte Tabela 1.

Tabela 1. Características das classes de fluido de corte (WICKRAMASINGHE et al., 2020).

	Óleos	Emulsões	Semi sintético	Sintético
Aspecto	Oleoso	Leitoso	Translúcido	Transparente
Lubrificação	Excelente	Bom	Bom	Ruim
Controle de oxidação	Excelente	Baixo	Bom	Bom
Resfriamento	Baixo	Bom	Bom	Excelente
Inflamável	Alto	Baixo	Baixo	Baixo
Controle microbiológico	Excelente	Baixo	Bom	Excelente

2.5.1 Emulsões

Emulsões consistem na mistura de óleo em água com o auxílio de um agente emulsificante, sendo que o óleo fica disperso na água em minúsculas gotículas. Usualmente esse tipo de fluido de corte é utilizado em processos onde o efeito refrigerante é demandado. A emulsão é composta em sua maioria por água e no máximo 10% de volume de óleo, com isso, suas propriedades refrigerantes são similares às da água, cuja capacidade térmica é duas vezes maior que de óleos e condução térmica quatro vezes maior que dos óleos (KLOCKE, 2009). A adição de água melhora o efeito refrigerante do fluido de corte devido a sua capacidade térmica (4,184 J/g°C) (WICKRAMASINGHE et al., 2020).

De acordo com Debnath e Reddy e Yi, (2014) as emulsões possuem alto efeito refrigerante provido pela água, ao mesmo tempo que o óleo reduz o potencial da água em causar oxidação nos metais. Além disso, as emulsões não são inflamáveis, possuem baixo potencial de gerar névoa, possuem um baixo custo de aquisição, visto que grande parte é água. No entanto, as emulsões são o ambiente ideal para a proliferação de bactérias e fungos visto que grande parte de sua composição é água. O crescimento descontrolado dessas populações ocasiona separação da mistura água-óleo, corrosão nas superfícies metálicas, baixo poder lubrificante e características físicas indesejadas.

2.5.2 Problemas da utilização de fluidos de corte

A utilização de fluidos de corte nas operações de usinagem é questionável pelos malefícios à saúde humana e meio ambiente. Fluidos de corte de base mineral são responsáveis por causar: irritação de pele, doenças respiratórias e câncer nos operadores (WICKRAMASINGHE et al., 2020).

Singh et al., (2020) listaram os problemas causados pelo fluido de corte:

- Impacto ambiental pela quebra das moléculas do fluido durante a operação de trabalho pelas altas temperaturas liberando monóxido de carbono e dióxido de carbono;
- Problemas de saúde causados pelas substâncias tóxicas presentes no fluido de corte e pelo crescimento de bactérias, tais substâncias são cancerígenas e causam irritações dermatológicas;
- Poluição de recursos naturais quando não tratado antes do descarte;
- Necessidade de espaços dedicados para armazenamento, filtragem, resfriamento e reciclagem do fluido utilizado.

Rodriguez et al., (2019a) citaram que os custos com armazenamento, filtragem, descarte apropriado, energia de bombeamento, empregados para manutenção e com os sistemas de circulação variam de 8 a 16% do custo do processo. Hamran et al., (2020) reportaram que o custo com fluidos de corte na indústrias automobilistas varia de 16% a 18% do custo total de produção. Entre os custos envolvidos para a manutenção da aplicação em abundância de fluido de corte estão o consumo de água, resfriamento, equipamento de filtragem, bomba de circulação e tubulação.

O fluido de corte serve como meio para o crescimento de bactérias e fungos, principalmente os fluidos a base de água. O estabelecimento de colônias de bactérias ou fungos prejudicam o efeito lubrificante do fluido e propiciam a separação das fases (água e óleo) (SHOKOOHI; KHOSROJERDI; RASSOLIAN SHIADHI, 2015).

A complexidade na formulação dos fluidos de corte resulta na irritação e alergia quando em contato com a pele do operador. Além disso, fluidos a base de petróleo que contêm compostos heterocíclicos e policíclicos são cancerígenos e podem causar câncer de pele (DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

Os fluidos de corte são suscetíveis ao crescimento de bactérias o que leva a presença de massas bacterianas e endotoxinas na atmosfera do ambiente fabril. Para evitar o crescimento exacerbado de microrganismos são adicionados aditivos biocidas, que apesar de evitarem o

problema descrito acima ocasionam outros empecilhos tais como: problemas no descarte e em alguns casos são possíveis cancerígenos por liberarem formaldeído (DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

2.6 Soluções para minimização do uso de fluidos de corte

O fluido de corte é amplamente utilizado para reduzir as forças de corte nos processos de usinagem, no entanto apresenta baixa eficiência, tem potencial para causar danos ao meio ambiente, é danoso para saúde humana e é considerado desperdício de recursos. Visto isso, pesquisas subdivididas em três ramificações surgiram para evitar tais problemas buscando: melhorar as propriedades dos fluidos de corte, usar com assistência de métodos alternativos e alterando a geometria da ferramenta (YU et al., 2019).

Melhorar as propriedades dos fluidos de corte para reduzir as forças de corte e melhorar os resultados obtidos. Elanchezhian et al., (2015) utilizaram nitrogênio líquido como fluido de corte na retificação do material Ti-6Al-4V com rebolo de CBN, como resultado as forças de corte reduziram em comparação com a refrigeração convencional (de 8% a 27% a força tangencial e 3% a 12% na força normal), a rugosidade média melhorou 38% e a temperatura do processo foi minimizada em 55%. A aplicação de fluidos em baixa temperatura, criogenia, tem o objetivo de aumentar a dissipação de calor na zona de corte. Tal fato é de extrema importância para o processo de retificação e evita que a dureza dos grãos abrasivos seja reduzida devido às altas temperaturas. A aplicação de nitrogênio líquido na usinagem é segura e ambientalmente correta, pois o nitrogênio é um elemento inofensivo para os seres vivos e não polui (constitui 79 % da atmosfera terrestre) (MANIMARAN; PRADEEP KUMAR; VENKATASAMY, 2014). Nanopartículas são utilizadas como aditivos para melhorar as propriedades do fluido de corte. São responsáveis por aumentar a capacidade de transferência de calor e capacidade de acumular calor. Vird et al., (2020) utilizaram nanopartículas de Al_2O_3 misturadas com óleo de girassol e arroz na retificação do aço Inconel 718 com MQL, como resultado a utilização de nanopartículas melhorou a rugosidade superficial, relação G, energia da retificação e o coeficiente de atrito. De acordo com Khatai et al., (2020), a utilização de óxidos metálicos como nanopartículas para aplicação com fluidos de corte possui a vantagem de maior condutividade térmica, potencial de ser misturado no fluido de corte, mais molhável e mais viscoso. Os principais tipos de nanopartículas metálicas são: Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Óxido de Titânio (TiO_2), Óxido de Silício (SiO_2), Óxido de Ferro (Fe_3O_4), Óxido Férrio (Fe_2O_3), Óxido Cúprico (CuO), Óxido de Zinco (ZnO) e Óxido de Zircônia (ZrO_2).

Aplicar métodos alternativos para melhorar o desempenho de fluidos de corte. Yu et al., (2016) concluíram em seu trabalho que a utilização do método de dressagem eletrolítica (*Electrolytic in-process dressing – ELID*) reduziu as forças de corte e melhorou o acabamento superficial das peças. Shein et al., (2015) analisaram o desempenho da retificação assistida pela vibração ultrassônica na retificação de cerâmica, tal técnica possui um bom custo benefício na usinagem de materiais frágeis e duros, pois a vibração presente no sistema causa microfraturas na peça. A vibração ultrassônica aumenta o desgaste da ferramenta, no entanto, são geradas micro arestas de corte nos grãos abrasivos que mantêm a ferramenta afiada durante o processo, dessa forma as forças de corte não aumentam com o aumento de volume removido. Lee et al., (2018) estudaram a aplicação de nano fluidos com lubrificação eletrostática, tal técnica consiste em polarizar o fluido com carga oposta a peça, com isso as gotas de fluido são atraídas para zona de corte devido a força eletro hidrodinâmica. Tal tecnologia demonstrou reduzir as forças de corte, melhorar a superfície usinada e a condição da ferramenta.

De acordo com Singh et al., (2020) a definição de usinagem sustentável é transformar os recursos disponíveis em produtos com o mínimo impacto ao meio ambiente, para isso, a eficiência deve ser máxima e os resíduos mínimos. Para Hamran et al., (2020) o principal objetivo da manufatura sustentável é a produção de produtos a um custo aceitável, juntamente com a redução de impactos ambientais e evitando gastos de energia e recursos naturais, além de eliminar os riscos à saúde do operador.

Os estudos apresentados são parte dos muitos estudos que surgiram com a percepção dos danos causados pelo fluido de corte. Visando restringir o consumo dessa substância países se uniram para criar regulamentações (SINGH; AGGARWAL; SINGH, 2020):

- Controle de substâncias perigosas para saúde (COSHH) instruções para minimizar a utilização de fluidos de corte na Inglaterra;
- Normas técnicas de procedimentos relacionados a substancias perigosas (TRGS) na Alemanha
- Decreto 259/1998 de 29 de setembro na Espanha
- Protocolo de Quioto
- Acordo de Paris

2.6.1 Mínima quantidade de lubrificante (MQL)

A mínima quantidade de lubrificante surgiu com o conceito de otimizar a quantidade de fluido de corte aplicado no processo de usinagem para eliminar os problemas ambientais, social

e econômico gerados pela aplicação em abundância de fluido de corte (HAMRAN et al., 2020). Surgiu para resolver as desvantagens da usinagem a seco, fazendo um balanço entre qualidade e impactos ambientais, sociais e econômicos (SINGH et al., 2020). A técnica, também conhecida como quase usinagem a seco (*Near dry machining*), possui vazão de fluido de corte entre 50 a 500 ml/h que comparado com a refrigeração em abundância representa uma redução de 10000 vezes (CHETAN; GHOSH; VENKATESWARA RAO, 2015).

Basicamente o sistema é constituído por: compressor de ar comprimido, reservatório de fluido de corte, tubos, sistema de controle de vazão e bocal. Tais componentes transformam o fluido de corte em pequenas gotículas por meio do processo de atomização por ar comprimido, o resultado é o aerossol que é direcionado para a zona de corte. O processo de atomização pode ocorrer em uma câmara externa (atomizador) e posteriormente a mistura ser direcionada para o bocal ou ocorrer no bocal de aplicação. Independentemente de sua utilização, o fluido de corte é succionado para dentro da câmara de atomização pelo efeito de Venturi, pois uma zona de baixa pressão é formada no interior do componente devido a passagem de ar comprimido. O efeito refrigerante da técnica ocorre pela convecção forçada provida pelo ar comprimido direcionado para superfície de corte e o efeito lubrificante ocorre pela formação do filme formado pelo fluido de corte nas superfícies envolvidas no processo (HAMRAN et al., 2020; SHARMA; TIWARI; DIXIT, 2016; SINGH et al., 2020)

A técnica possui eficiência na lubrificação do processo, pois facilmente as gotículas penetram a barreira hidrodinâmica que se forma em volta do rebolo. Usualmente, o volume e velocidade das gotículas decaem conforme se distanciam do centro do jato, devido a interação com a vizinhança (AWALE; VASHISTA; KHAN YUSUFZAI, 2020).

Singh et al., (2020) comparam os pontos positivos e negativos da aplicação em abundância de fluido de corte na Tabela 2, Mínima Quantidade de Lubrificante e usinagem a seco.

Visto que a aplicação em abundância de fluido de corte representa de 10 a 17% do custo de usinagem (consumo de água, resfriador, equipamento de filtração, bombeamento, encanamento e descarte) a técnica de mínima quantidade de lubrificante demonstrou capacidade de economia de 15% do custo de usinagem. Tal fato faz com que a técnica apresente potencial, pois apresenta resultados compatíveis a lubrificação em abundância e apresenta um custo próximo da usinagem a seco (FURNESS et al., 2006).

De acordo com Hamran et al., (2020) a técnica de MQL demonstra melhorar a qualidade superficial e reduzir as forças de corte, além de aumentar a vida útil da ferramenta. No entanto,

a técnica ainda enfrenta desafios para atingir seu máximo potencial: efeito refrigerante ineficiente, limitações na usinagem de materiais de baixa usinabilidade e ineficiência na remoção de cavacos.

Tabela 2. Comparação entre diferentes métodos de lubrificação.

Parâmetro	Aplicação em abundância	Mínima Quantidade de Lubrificante	Usinagem a seco
Vazão de fluido de corte	Alta vazão de fluido de corte (8 - 10 litros/min)	Mínima vazão de fluido de corte (50 - 330 ml/h)	N/A
Pressão	Necessário pressão para bombear fluido	Baixa requerida baixa	N/A
Recirculação	Necessidade de sistemas de recirculação	N/A	N/A
Tipos de cavacos	Cavacos encharcados com fluido de corte	Cavacos com baixa quantidade de lubrificante	Cavacos livres de fluido de corte
Corrosão	Probabilidade de corrosão	Baixa probabilidade de corrosão	N/A
Danos ambientais	Probabilidade de contaminação de água, solo e poluição da atmosfera	Baixa contaminação de solo e água devido o baixo consumo	N/A
Danos à saúde dos operadores	Potencial para causar problemas respiratórios, catarata e asma	Baixa probabilidade de causar problemas de saúde	N/A
Problemas com descarte	Necessidade de tratamentos especiais para descartar o fluido e cavacos	N/A	N/A
Usinabilidade	Excelente	Boa	Limitados em altas velocidades de corte
Qualidade do produto	Excelente	Boa	Limitados em altas velocidades de corte
Vida útil de ferramenta	Excelente	Boa	Limitados em altas velocidades de corte
Custo	Alto	Moderado	Aumento dos custos com usinagem

A quantidade de resíduos gerados pela técnica de MQL é tão insignificante que não é suficiente para que seja coletado e reaproveitado. Dessa forma, os aditivos que geralmente são adicionados nos fluidos de corte, quando aplicados de forma convencional, para maior conservação são dispensáveis. Usualmente são adicionados bactericidas, fungicidas, e

germicidas aos fluidos de corte para um controle do crescimento de bactérias de fungos, de acordo com Shokrani et al., (2012) os compostos químicos presentes nos aditivos são altamente tóxicos para o meio ambiente e os trabalhadores, sendo que muito dos biocidas apresentam formaldeídos em sua composição um componente cancerígeno. Por não necessitar de um controle de bactérias, pois é utilizado apenas uma vez, o lubrificante do MQL não contém tais aditivos, sendo menos tóxico ao meio ambiente e a saúde do trabalhador.

2.6.2 Parâmetros da Mínima Quantidade de Lubrificante

O desempenho da técnica de MQL é baseado nos parâmetros de entrada utilizados, entre eles estão: fluido de corte, vazão de fluido de corte, pressão do ar comprimido, posicionamento do bocal (ângulo e distância) e tipo de bocal utilizado.

É recomendado que os fluidos aplicados pela técnica MQL sejam biodegradáveis, altamente estáveis e com um alto poder lubrificante. Usualmente para essa aplicação, são selecionados óleos vegetais e sintéticos (HAMRAN et al., 2020). Os óleos vegetais apresentam maior absorção de pressão e apresentam menor vaporização.

Tawakoli et. al., (2010) concluíram em seu artigo que o posicionamento do bocal para aplicação do aerossol formado pelo MQL influi diretamente no desempenho da técnica. A distância adequada será determinada de acordo com o bocal selecionado e o formato do spray geral, é de extrema importância que se forme um filme lubrificante sobre os grãos abrasivos antes da zona de contato. Para as condições avaliadas, os autores concluíram que o bocal deve estar posicionado a 80 mm da zona de corte com uma angulação de 10°-20° em relação a superfície da peça.

Mao et al., (2013) avaliaram o posicionamento do bocal de MQL em três condições: direcionado para zona de corte, paralelo à superfície da peça 20 mm acima da zona de corte e 20 mm acima da zona de corte com ângulo de 15°. Notaram que o pior resultado ocorreu com o bocal diretamente direcionado para zona de corte devido ao fluxo reverso gerado pela barreira de ar ao redor do rebolo. Já o melhor resultado foi com o bocal ligeiramente inclinado e deslocado para cima da zona de corte, tal condição favorece os dois mecanismos de lubrificação que ocorre pela técnica de MQL, o molhamento da superfície de corte com lubrificante e a entrega do lubrificante diretamente na zona de corte. Os autores concluíram que menores distâncias entre o bocal de MQL e a zona de corte resultaram em melhores resultados e reduziram as forças de corte, pois conforme a distância do bocal com a zona de corte aumenta mais disperso é o spray e menor é a velocidade da névoa. No estudo a pressão do ar comprimido

influenciou diretamente nos resultados, já que maiores pressões resultam em maior capacidade de penetração na zona de corte.

Awale et al., (2020) avaliaram o efeito da vazão de fluido de corte, pressão e distância do bocal de MQL. Verificaram que a vazão de fluido de corte é o parâmetro que mais impactou nos resultados (62,44%), a pressão do ar comprimido utilizada na técnica teve impacto de 17,28% e a distância de posicionamento do bocal 15,1%. A angulação do bocal que proporcionou melhores os resultados foi de 12° em relação ao plano horizontal.

2.7 Danos térmicos

Intrinsecamente o processo de retificação ocorre com alto esforços térmicos e mecânicos, onde durante o corte alta quantidade de energia térmica é gerada e transferida para a peça, o que ocasiona mudanças químicas e físicas no material usinado.

De acordo com Zhou et al., (2020) a queima da superfície da peça é associada a formação de óxidos na superfície do material Fe_2O_3 e Fe_3O_4 . Essa formação de óxidos é visível pela coloração escura na superfície retificada, a coloração irá depender da espessura da camada de óxidos, onde quanto mais espessa será mais azulada e menos espessa será amarronzada, conforme Figura 11.

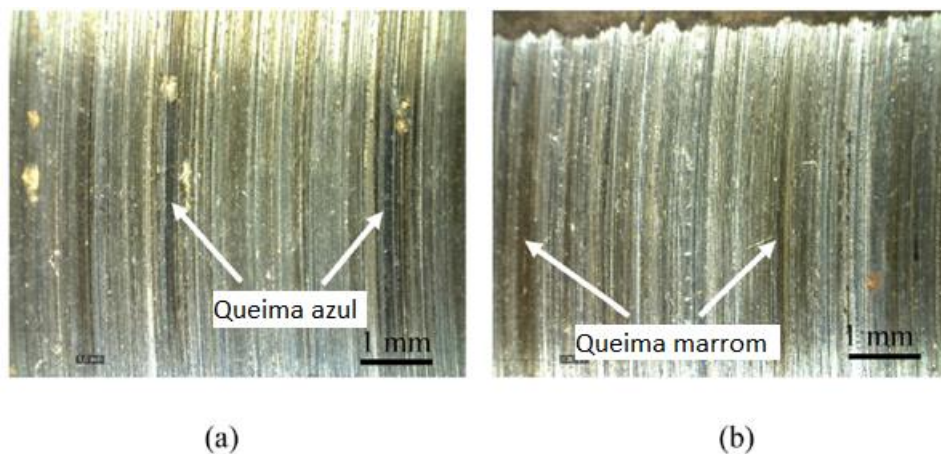


Figura 11. Imagens de microscópio ótico das amostras retificadas com R80: (a) 1 km/h, (b) 2 km/h (ZHOU et al., 2020).

Para Lin et al., (2018) a temperatura em que o processo ocorre influencia diretamente na coloração da superfície retificada, a Figura 12 apresenta um resumo das conclusões do autor durante a retificação do aço para trilhos de trem U71Mn. Na faixa de temperatura de 600 a 735 °C ocorre uma queda na dureza da superfície do material, pois nessa faixa ocorre o a “queima de revenimento”.

	Normal	Amarelado	De amarelado para azulado	Roxo
Queima				
Temperatura	$\leq 471^{\circ}\text{C}$	$471-600^{\circ}\text{C}$	$600-735^{\circ}\text{C}$	$\geq 735^{\circ}\text{C}$
Dureza	Dureza aumenta de 290 para $500\text{HV}_{0.5}$		Dureza diminui (revenimento)	Dureza aumenta $\geq 800\text{HV}_{0.5}$ (Transformação de fase para martensita)
Rugosidade	Rugosidade média aumenta			Rugosidade média diminui

Figura 12. Relação entre situação da superfície, queima, temperatura de processo (LIN et al., 2018).

A formação da camada branca na superfície da peça pode ser explicada por dois mecanismos. O primeiro é o atrito entre ferramenta e peça que gera alta energia térmica e deslocamentos na microestrutura do material pelas deformações plásticas. O outro mecanismo é que a temperatura em que o material atinge excede a temperatura de austenitização do material seguido de um rápido resfriamento causa a retempera do material. No primeiro mecanismo a espessura da camada branca é uniforme por toda a sub camada do material. Já a retempera do material origina camada branca de maior espessura e em formado de arco, como observado na Figura 13.

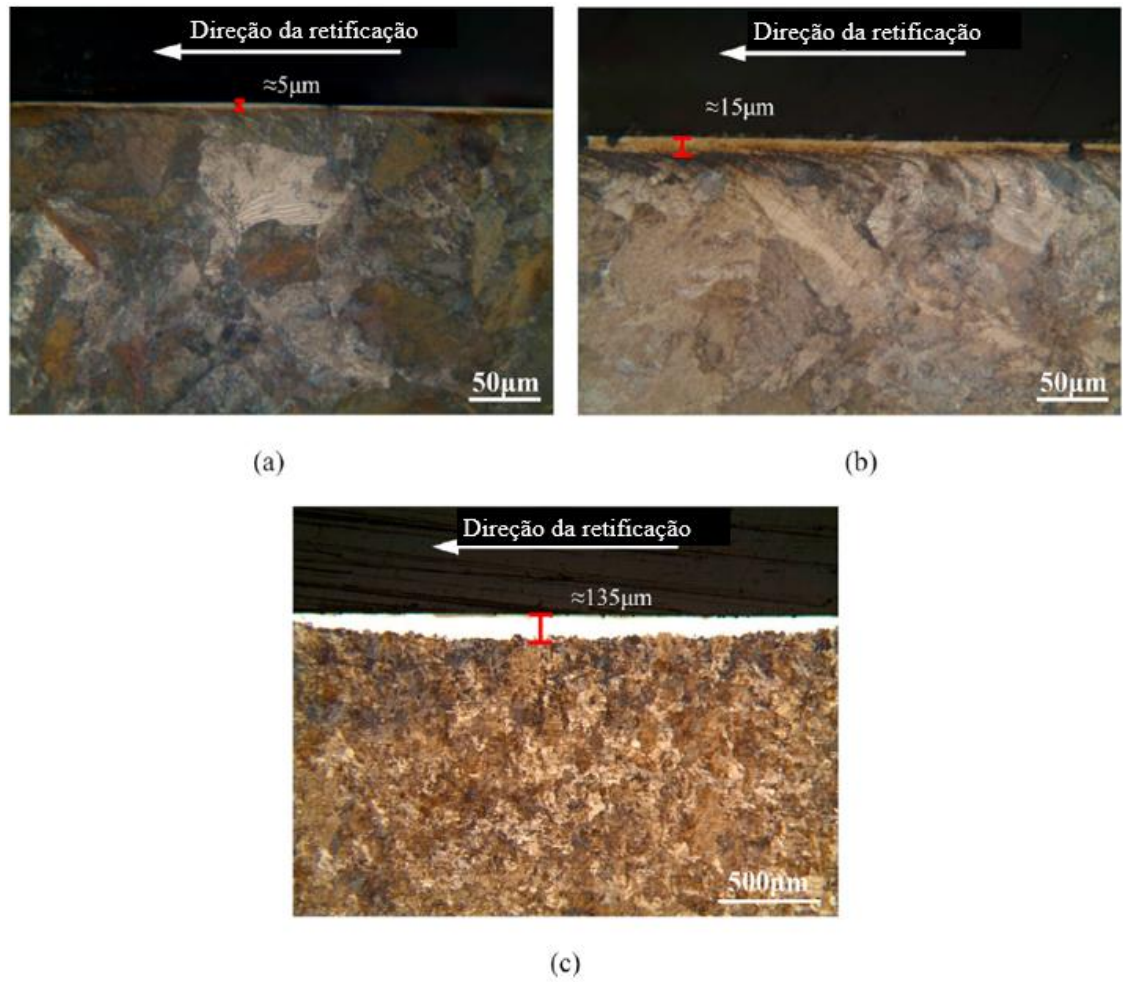


Figura 13. Micrografia da subsuperfície da peça sobre diferentes pressões de retificação, (a) 1000 N; (b) 1500 N; (c) 2000 N (LIN et al., 2018).

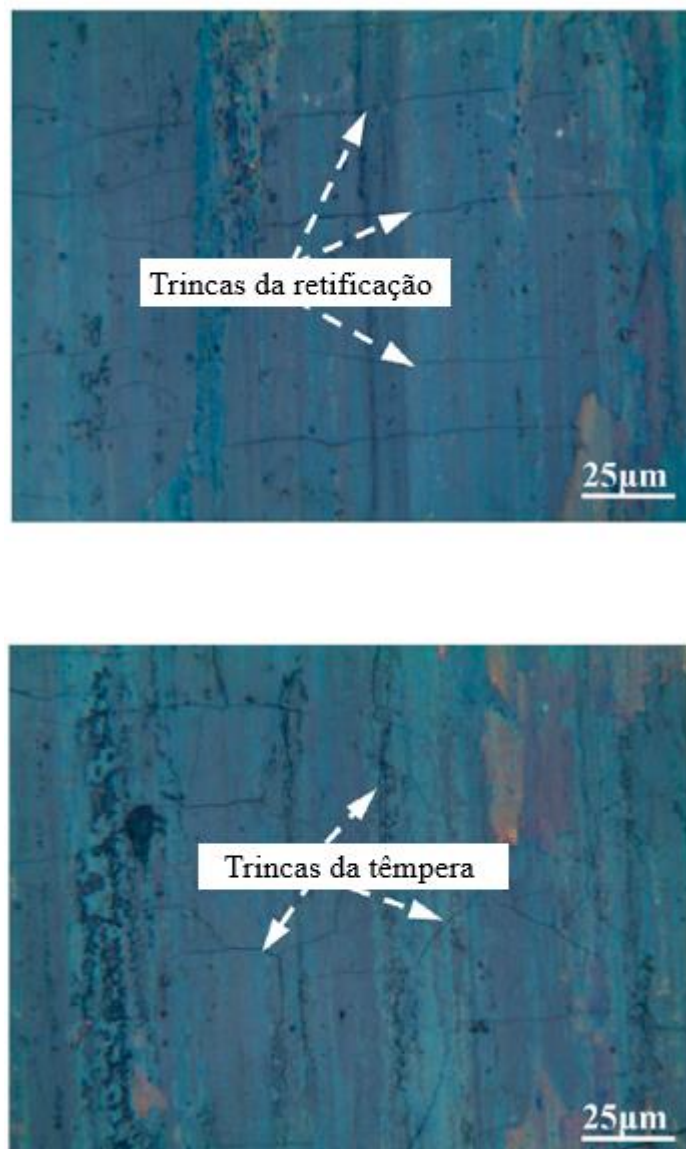


Figura 14. Superfície com presença de micro rachaduras (LIN et al., 2018).

Outro dano térmico é a geração de trincas na superfície da peça, que podem ser trincas de retificação ou trincas de têmpera. As trincas geradas pela remoção de material são perpendiculares a direção de corte, já as trincas geradas pelo processo de retêmpera formam uma estrutura de rede. As trincas provenientes da remoção do material são causadas quando a tensão de tração induzida pelo processo de corte na superfície de corte (sentido oposto ao sentido de corte) é maior que o limite de resistência a ruptura, provocando trincas perpendiculares à direção de corte. Outro fator que gera trincas é o material submetido ao superaquecimento e resfriado rápido. Isso faz com que a camada externa da peça tenha uma taxa de resfriamento maior que o interior da peça que continua a se expandir induzindo tensões de

tração na superfície do material, pois o volume da martensita é maior que da austenita (LIN et al., 2018).

2.8 Morfologia da superfície usinada

Durante o processo de retificação os grãos abrasivos podem cortar, deformar ou riscar a superfície usinada. O termo “side flow” é referente a formação de cristas laterais ao percurso do grão abrasivo na peça, isso ocorre pois o material é aquecido durante o processo de retificação, assim, a pressão exercida pelo abrasivo sobre o material faz com que o mesmo seja deformado e flua para as laterais da trajetória. Tal efeito é considerado um defeito, pois afeta a resistência a fadiga do componente (ZHOU et al., 2020). A Figura 15 apresenta alguns exemplos de defeitos superficiais.

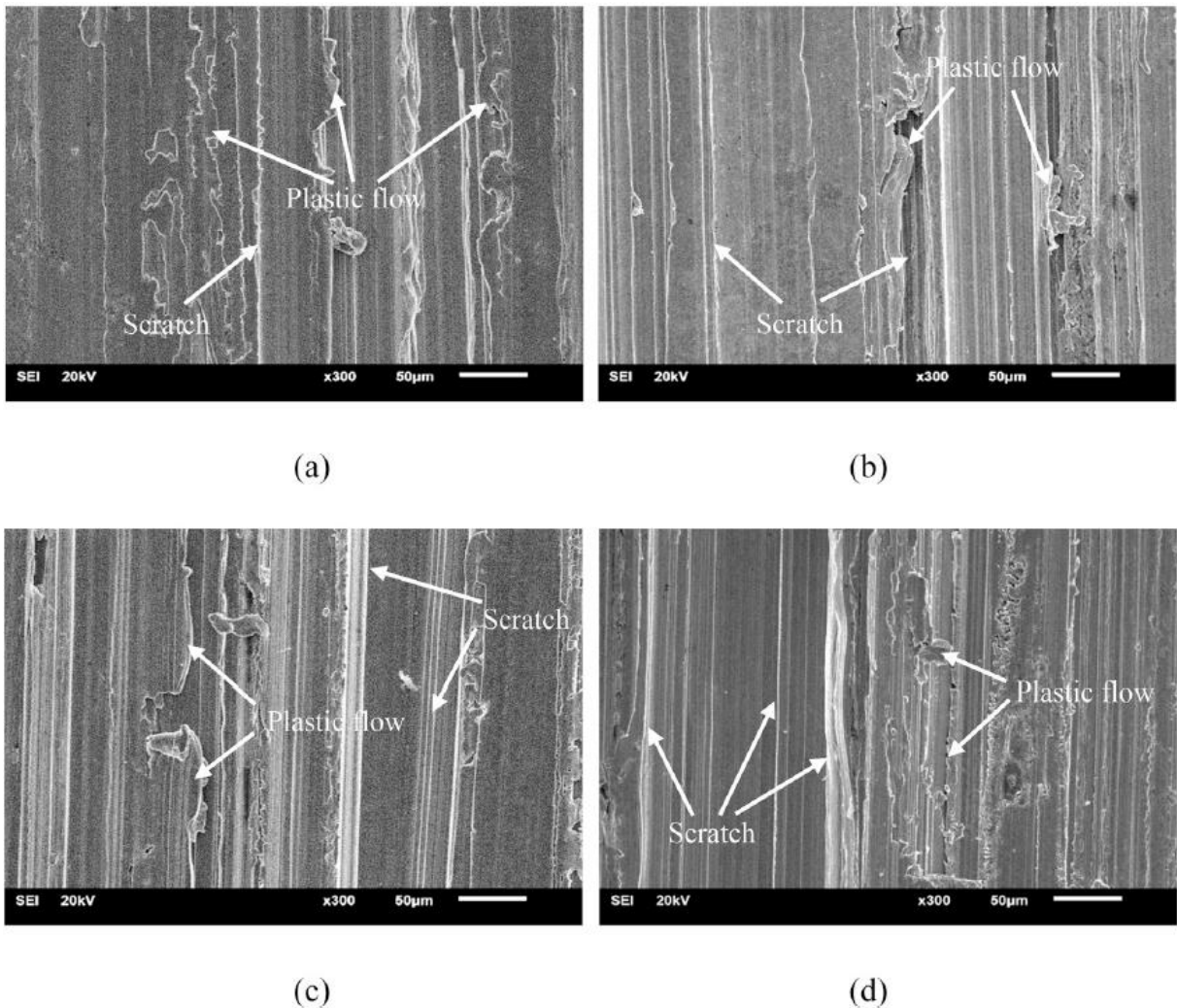


Figura 15. Microscopia Óptica de Varredura da superfície usinadas (a) 1 km/h, (b) 2 km/h, (c) 3 km/h, (d) 4 km/h (ZHOU et al., 2020).

Defeitos na superfície da peça como “side flow”, deformação plástica, adesão e marcas de desprendimentos de grãos abrasivos indicam baixa lubrificação e ocorrência de atrito excessivo entre peça e grãos desgastados. Tais ocorrências indicam predominância de deformações plásticas e sulcamento como mecanismos de remoção de material, os quais demandam uma alta energia e performam um corte de baixa qualidade (SADEGHI et al., 2010).

Tawakoli et al., (2009) afirmam que a formação de cavaco ocorre, apenas se a profundidade de penetração da aresta de corte for igual ou superior à profundidade crítica de corte, caso contrário, a superfície do material é deformada elasticamente e plasticamente. O defeito conhecido como “side flow” ocorre devido a penetração insuficiente do grão abrasivo na peça, com isso durante o percurso da aresta de corte o material é expelido para as laterais da trajetória.

2.9 Empastamento do rebolo

Intrinsicamente, os cavacos são alojados nos poros do rebolo levando a primeira fase do empastamento do rebolo (SATO et al., 2020)

A grande quantidade de energia térmica gerada no processo de retificação faz com que a temperatura aumente demasiadamente, aumentando a aderência de partículas metálicas nos poros da superfície de corte do rebolo. Os cavacos que aderem a essa superfície impedem a penetração de fluido de corte na zona de corte, prejudicando a refrigeração e lubrificação do processo. Dessa forma a temperatura do processo se eleva, causando danos térmicos às peças, piorando o acabamento superficial e aumentando o desgaste do rebolo (BELENTANI et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2012a).

De acordo com Sinot et al., (2006) os materiais de alta ductilidade apresentam grande dificuldade de serem retificados, por apresentarem grande tendência de se aderirem ao rebolo. O tipo de rebolo, a velocidade e o avanço afetam o fenômeno de empastamento. Altas velocidade e avanços causam maiores forças de compressão no cavaco agravando o fenômeno.

De acordo com Cameron et al., (2010) o fenômeno de empastamento do rebolo, entope a porosidade do rebolo agravando os danos térmicos a peça.

Quando o processo de corte se inicia na retificação os cavacos gerados são removidos pelo fluido de corte em abundância quando se utiliza o método convencional de refrigeração. Ao se utilizar a técnica de MQL os cavacos não são totalmente removidos do processo, e os remanescentes se misturam com o óleo utilizado no MQL e formam uma borra que se aloja nos poros da superfície de corte do rebolo (BELENTANI et al., 2013). No decorrer do processo a quantidade de borra presente na porosidade da superfície de corte aumenta de forma a começar a impedir que novos cavacos sejam alojados no processo e comecem a atritar com a peça. Isso faz com que a potência consumida de corte aumente, a rugosidade e circularidade da peça piorem e o rebolo se desgaste prematuramente (BELENTANI et al., 2013).

De acordo com Heinzl e Kolkwitz, (2019) o empastamento eleva a temperatura e as forças do processo de retificação pelo aumento do atrito, com isso sua ocorrência resulta em maiores cargas mecânicas e térmicas na peça usinada.

Heinzl et al., (2020) em seu artigo citam quatro ocorrências de empastamento:

Alojamento de cavaco na porosidade: os cavacos formados durante o processo se acumulam nos poros do rebolo e não são expelidos pelo fluido de corte.

Depósitos nos grãos: uma fina camada de material da peça adere na superfície dos grãos abrasivos. Tal camada é formada devido às altas temperaturas e pressões, causando adesão do material no grão abrasivo.

Camadas tribo químicas: são camadas com espessura de micron que se formam no top dos grãos abrasivos desgastado, são compostas por uma mistura de óxidos, incluindo óxido de ferro. São causadas pelas forças que forçam os elementos a aderirem na superfície do grão abrasivo.

Soldagem: A soldagem é subsequente aos tipos de empastamento anteriores, após o material metálico aderir nos grãos abrasivos ocorre o atrito entre material metálico aderido no grão abrasivo e cavaco, essa interação ocorre em pressões suficientes para causar a soldagem do cavaco no material aderido. Assim, conforme o processo ocorre maior volume de cavacos são soldados formando uma estrutura de camadas.

O tipo de material a ser retificado influencia no empastamento do rebolo, onde, nos casos metálicos, quanto mais dúctil o material, maiores são as chances de ocorrer o empastamento, especialmente depósitos nos grãos e soldagem. Aços tratados termicamente podem causar o empastamento do rebolo (ex. ABNT 4340, ABNT 4140, ABNT 4337), por possuírem uma combinação de resistência e tenacidade tornam o material com uma baixa usinabilidade, assim as forças de corte são elevadas e a carga térmica alta, favorecendo o depósito do material sobre os grãos e a soldagem (HEINZEL et al., 2020).

Os parâmetros de ferramenta também impactam na severidade do empastamento (tipo de abrasivo, tamanho do grão, ligante e porosidade) (HEINZEL et al., 2020).

O CBN apresenta uma maior resistência ao desgaste e menor incidência de empastamento quando usado para retificação materiais metálicos, pois apresenta maior dureza, maior tenacidade a fratura, maior condutividade térmica e menor afinidade química. No entanto, durante a retificação de materiais ductilidade moderada, especialmente com altas taxas de remoção, são plausíveis de ocorrer depósitos metálicos sobre os grãos abrasivos e ligante. Por ocorrer em altas temperaturas tal fato tem potencial para causar empastamento por soldagem com alta severidade, causando a perda de grãos abrasivos e desgaste prematuro da ferramenta (HEINZEL et al., 2020).

2.10 Alternativas para a limpeza da superfície de corte do rebolo

Entre as soluções apresentadas por Sinot, chevrier e Padilla, (2006) para evitar a ocorrência do fenômeno de empastamento estão:

Utilizar um rebolo de estrutura aberta, dessa forma a quantidade de porosidade aumenta, e assim maior o volume entre os grãos abrasivos e maior a capacidade de alojar os cavacos. No entanto, rebolos com estrutura aberta perdem sua resistência e assim o ligante pode fraturar, causando um desgaste prematuro do rebolo.

Remover a superfície empastada dressando o rebolo, no entanto, muitas vezes a camada empastada pode atingir 10 μm e dessa forma dressar muitas vezes o rebolo pode aumentar o custo do processo.

Utilizar um sistema de limpeza do rebolo com o fluido de corte. Nesse método o fluido é aplicado com uma alta pressão, dessa forma remove os resíduos gerados no processo e reduz a quantidade de cavacos alojados na porosidade da superfície de corte do rebolo.

De acordo com Heizel e Antsupov, (2012) o entupimento do rebolo por cavacos pode ser reduzido otimizando os parâmetros do processo, como o fornecimento de fluido, o design do rebolo e o condicionamento da ferramenta.

Existe uma falta de conhecimento sobre a determinação dos parâmetros de limpeza da superfície de corte do rebolo e como monitorá-la. Dessa forma existe um receio na aplicação do método por parte das indústrias (OLIVEIRA et al., 2012b).

2.10.1 Limpeza da superfície de corte do rebolo por sistema secundário de fluido de corte

Em seu estudo Cameron et al., (2010) observaram que quando o método de limpeza da superfície de corte do rebolo com fluido de corte foi utilizado a queima das peças foi menos severa em comparação com a retificação ocorreu sem a limpeza. Esse fato é associado ao fato que os cavacos alojados no rebolo fazem com que as forças de corte aumentem e aumente a probabilidade de queimas severas ocorrerem.

Webster, (2008) em um estudo de caso de uma fábrica de eixos de comando de válvulas explicitou a importância que um sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo pode ter. A empresa estava perdendo muitas peças devido a trincas que surgiam após o processo de retificação. Observou-se que as ferramentas abrasivas estavam com indícios de cavacos alojados na porosidade da superfície de corte do rebolo. A empresa optou por instalar bocais de alta pressão tangencialmente ao rebolo para realizar a limpeza do rebolo. Essa opção atendeu as expectativas da empresa que deixou de inspecionar as peças com um corante fluorescente, economizando com o teste, com a mão de obra e com a diminuição das peças com defeito um total de trezentos mil dólares.

Apesar das grandes vantagens observou-se que a potência consumida no processo pelo eixo do motor foi aumentada de 30 a 50% pela força de frenagem causada pela pressão do fluido. Outras dificuldades desse método é o complexo sistema de aplicação, no qual necessita de uma bomba de alta potência, um grande reservatório e um sistema de filtragem (Sinot et al., 2006).

De acordo com Heinzl e Antsupov, (2012) o fluido quando aplicado com baixa pressão pode até ser eficaz na lubrificação e refrigeração do processo, no entanto, provavelmente não será suficiente para remover os cavacos alojados na porosidade da superfície de corte do rebolo. Em alguns casos industrias é utilizado um segundo bocal destinado a limpeza da superfície de corte do rebolo. O autor cita pressões de 100 bar e vazões de 400 l/min para uma efetiva limpeza, nesse caso a bomba necessária para fornecer tais condições devem ser robusta. Como resultado da adição de um bocal secundário destinado para limpeza da superfície de corte do rebolo há uma diminuição nas forças de corte, um aumento da vida da ferramenta e uma melhora na qualidade da peça.

A colisão do líquido (fluido de corte) com o sólido (rebolo) gera uma pressão de estagnação (p_s) é calculada de acordo com a equação de Bernoulli, equação 8 (HEINZEL; ANTSTUPOV, 2012).

$$p_s = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_j^2 \quad (8)$$

Onde ρ_f é a densidade do fluido e v_j é a velocidade do jato.

Heinzl e Antsupov, (2012) afirmaram que a distância de posicionamento do bocal influencia na eficiência do método de limpeza. A interação do jato de líquido e ar causa turbulências que formam gotículas, o tamanho das gotículas diminui conforme se distanciam do bocal. Existe uma distância que atinge o máximo potencial de limpeza da superfície de corte do rebolo.

O choque da gota de líquido com o sólido cria uma onda de choque, que pode ser elevada a ponto de causar erosões na ferramenta abrasiva. O choque nomeado de “martelo de pressão de água” (p_{wh}) pode ser estimado pela equação 9 (HEINZEL; ANTSTUPOV, 2012).

$$p_{wh} = \rho_f \cdot c_f \cdot v_f \quad (9)$$

Onde c_f é a velocidade de propagação da onda.

De acordo com Sinot et al., (2006) para que o jato de fluido atinja os cavacos alojados na porosidade a direção do mesmo deveria ser perpendicular à superfície de corte do rebolo. No entanto, a barreira de ar formada ao redor do rebolo, quando em rotação, impede que o jato de fluido atinja perpendicularmente a superfície de corte do rebolo. Dessa forma os autores para evitar tal desvio de direção concluíram que o bocal deve ser instalado o mais próximo possível do rebolo. Entre seus resultados também concluíram que o jato de fluido deve ser com alta vazão e pressão moderada e que a temperatura do fluido utilizado na limpeza não influencia no processo.

2.10.2 Limpeza da superfície de corte do rebolo com jato de ar comprimido

Outro método de limpeza da superfície de corte do rebolo é por meio de um jato de ar comprimido, que incide na superfície de corte do rebolo em alta pressão e expulsa boa parte das impurezas geradas no processo (DE MELLO BELENTANI et al., 2014).

Ao remover a borra (fluido + cavaco) gerada no processo de retificação quando se utiliza MQL, há uma amenização dos problemas causados pelo fenômeno de empastamento da superfície de corte do rebolo, melhorando-se assim a precisão do processo (OLIVEIRA et al., 2012b).

Belentani et al., (2014) afirmaram que o desempenho da limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido está diretamente ligado com a pressão do ar comprimido.

Oliveira et al., (2012a) avaliou qual o melhor ângulo de posicionamento do bocal de limpeza em relação à superfície de corte do rebolo. Entre as posições avaliadas pelos autores estão: o jato de ar normal à superfície de rebolo, a 30° da normal, a 60° da normal e tangencial a superfície do rebolo. Em seu estudo com o auxílio de um microscópio obtiveram as imagens apresentadas na Figura 16, que comprovaram a eficiência de se utilizar o sistema de limpeza com ar comprimido.

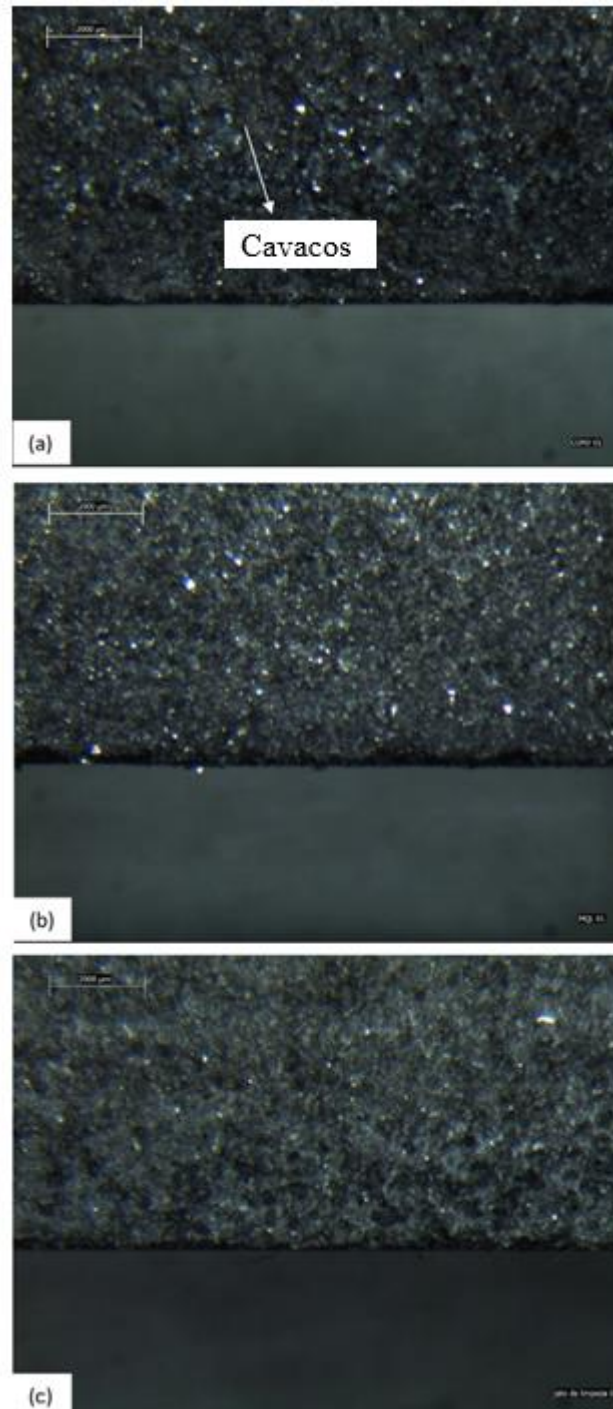


Figura 16. Superfície do rebolo após a retificação: a) refrigeração convencional, b) MQL convencional e c) MQL com limpeza (OLIVEIRA et al., 2012a).

Oliveira et al., (2012b) observando a Figura 16 notaram a drástica redução de cavacos alojados na porosidade da superfície de corte do rebolo quando se utilizou a limpeza por ar comprimido. Com a menor quantidade de cavacos aderidos na superfície de corte do rebolo,

ocorreu uma diminuição dos riscos na superfície da peça causadas pelos cavacos e uma melhora na performance de corte do rebolo.

A limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido melhorou substancialmente os resultados de rugosidade e circularidade da técnica de MQL, provando que o empastamento do rebolo tem grande influência na qualidade da peça retificada (OLIVEIRA et al., 2012b).

Outra conclusão de Oliveira et al., (2012b) foi que a maior eficiência em remover cavacos foi quando a angulação do bocal de limpeza estava posicionada a 30° da normal em relação ao rebolo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão descritos os equipamentos e materiais utilizados, a metodologia dos ensaios, os parâmetros de entrada escolhidos e as variáveis de saída analisadas durante e após a execução dos experimentos. Os ensaios de retificação foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) – UNESP.

3.1 Equipamentos e procedimentos

3.1.1 Retificadora

O processo de retificação foi realizado na retificadora cilíndrica externa de mergulho fabricada pela empresa SULMECÂNICA, modelo RUAP 515H conforme a Figura 17, equipada com comando numérico computadorizado (CNC) da Fagor para acionamento do eixo “X”. Foram utilizados dois programas CNC; um para usinagem dos corpos de prova (Apêndice A) e outro para impressão do reboło desgastado (Apêndice B). Por ser equipada com CNC foi possível uma uniformidade na realização dos ensaios, uma vez que a máquina repetirá todas as vezes o mesmo programa.



Figura 17. Fotografia da retificadora cilíndrica de mergulho disponível no LUA.

3.1.2 Rebolos

Foram utilizados dois rebolos para comparação do desempenho dos abrasivos convencionais e superabrasivos. A comparação foi realizada utilizando o reboło de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) fabricado pela Norton Abrasives, com especificação 38A150L6V, diâmetro

externo de 355,6 mm, diâmetro interno de 127 mm e largura de 25,6 mm, e o rebolo de Nitreto Cúbico de Boro (CBN), fabricado pela Nikon Ferramentas de Corte, com especificação SNB151Q12VR2, diâmetro externo de 350 mm, diâmetro interno de 127 mm e largura de 25,6 mm. Para ambos os rebolos a granulometria dos grão abrasivos foi a mesma e o ligante utilizado foi o vitrificado.

3.1.3 Dressador

O procedimento de dressagem foi realizado com um dressador multigranular do tipo conglomerado, fabricado pela empresa Master Diamond. Trata-se de um afiador composto por diamantes em uma matriz metálica de forma paralelepípedica, de dimensões 15 mm x 8 mm x 10 mm. As condições de dressagem utilizadas foram: velocidade de corte (v_s) = 32 m/s e velocidade de dressagem (v_d) = 500 mm/min.

A quantidade de ciclos de dressagem foi definida em ensaios preliminares para que toda a camada desgastada do rebolo fosse removida durante a dressagem. Para o rebolo de Al_2O_3 foram utilizados 50 ciclos de dressagem com profundidade de dressagem por passada (ad)=4 μ m, totalizando na profundidade de dressagem total de 200 μ m. Já para o rebolo de CBN foram utilizados 40 ciclos de dressagem com profundidade de dressagem por passada (ad)=2 μ m, totalizando na profundidade de dressagem total de 80 μ m.

3.1.4 Corpo de prova

Os corpos de prova foram fabricados com aço ABNT 4340, fornecido pela empresa Villares Metals S.A, em formato anelar, com 62 mm $\pm$ 0.1 mm de diâmetro externo, 30 $\pm$ 0.1 mm de diâmetro interno e 5 $\pm$ 0.1 mm de espessura. O aço ABNT 4340 possui em sua composição 0,4% de C, 1,8% de Ni, 0,8% de Cr, 0,23% de Mo, 0,68% de Mn e 0,23% de Si. É classificado como aço temperável e é utilizado em peças que necessitam de uma combinação de resistência mecânica e tenacidade (DA SILVA et al., 2007).

Após usinados os corpos de prova foram temperados e revenidos, pela empresa JSC Tratamento Térmico em Metais Ltda. O tratamento térmico consistiu no aquecimento do material a 850 °C por 60 minutos seguido por resfriamento em óleo à temperatura ambiente, após a têmpera a microestrutura do material era martensítica. O revenimento foi realizado aquecendo as peças a 350 °C por 120 minutos, seguido de resfriamento na atmosfera em temperatura ambiente. O aço ABNT 4340 ao final do processo de têmpera e revenimento

apresentou martensita revenida em sua microestrutura. Assim, a dureza do aço passou de 21 HRC para 55HRC.

3.1.5 Sistema de lubrificação convencional

O sistema de lubrificação convencional foi composto por reservatório de fluido com capacidade de 100 litros, bomba centrífuga, medidor de vazão, válvulas de esfera, mangueira e bocais de aplicação. Nesta técnica, o fluido é aplicado de maneira abundante e com baixa pressão. O controle da vazão foi realizado através de válvulas de esfera, posicionadas na entrada do medidor de vazão e antes do bocal. Conforme se abria ou se fechava as válvulas, a vazão era aferida no display do medidor de vazão tipo turbina, modelo SVTG DMY-2030, da marca Contech. A vazão adotada para os ensaios foi de 17 l/min e a pressão de 0,12 MPa.

Como fluido de corte utilizado foi utilizada uma emulsão de uma parte de óleo para 40 partes de água. O óleo utilizado foi emulsionável semissintético vegetal ME-2, fabricado pela empresa Quimatic Tapmatic Brasil.

Os bocais de aplicação de fluido utilizados foram os originais da retificadora, do tipo Fixoflex, de seção circular com 6,3 mm de diâmetro. A vazão utilizada foi de 17 L/min e a pressão de 0,2 MPa.

3.1.6 Sistema de Lubrificação por Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

Para a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) foi utilizado compressor de ar, filtro de ar, regulador de pressão do ar, medidor de vazão de ar, mangueiras, dispositivo dosador de fluido e bocal de aplicação.

O compressor de ar utilizado era do modelo MSV 30/350, linha Max, fabricado pela empresa Schulz. A pressão de ar comprimido foi controlada através de regulador de pressão com filtro e medidor de vazão do tipo turbina. A pressão do ar comprimido aplicada nos experimentos foi de 0,6 MPa e a velocidade utilizada foi de 32 m/s.

O dispositivo dosador utilizado era do modelo Accu-Lube 79053D, fabricado pela ITW Chemical Products Ltda. Esse dispositivo controla a vazão de fluido e ar comprimido de forma independente e a atomização do processo ocorre no interior do bocal. A Figura 18 apresenta o dispositivo dosador e suas principais partes.

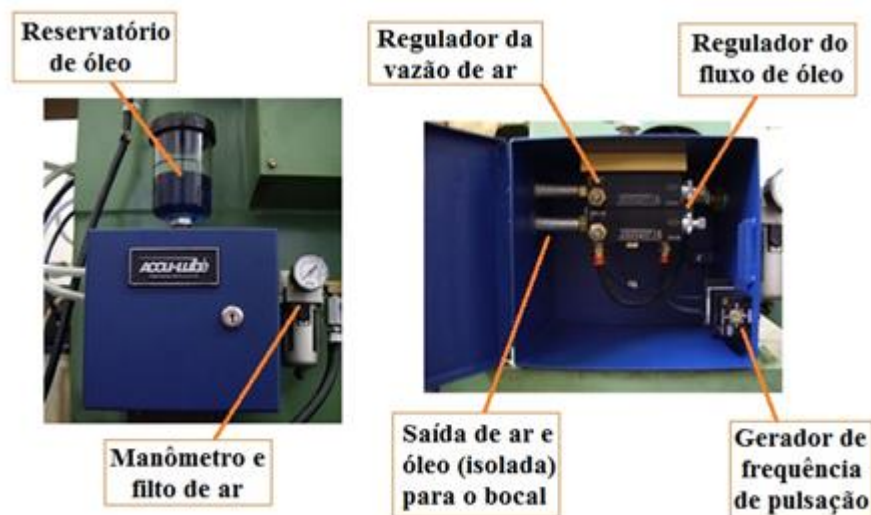


Figura 18. Aplicador ITW Accu-lube 76053D.

A atomização de fluido ocorre no bocal pelo efeito Princípio de Venturi. O bocal apresenta dois difusores que possuem um furo central, por onde entra o óleo e seis furos adjacentes por onde entra o ar comprimido. O ar comprimido ao sair do difusor faz com que a região próxima ao furo central apresente uma baixa pressão, que suga o fluido de corte para o fluxo turbulento de ar comprimido. Com isso o líquido é quebrado em pequenas gotículas que são direcionadas para fora do bocal, conforme Figura 19. O corpo do bocal foi fabricado em latão e o projeto foi desenvolvido para permitir a atomização do fluido e acelerar a mistura em sua saída, Figura 20.

O posicionamento do bocal foi 25 mm acima da zona de corte, inclinado 10° em relação a interface de corte.

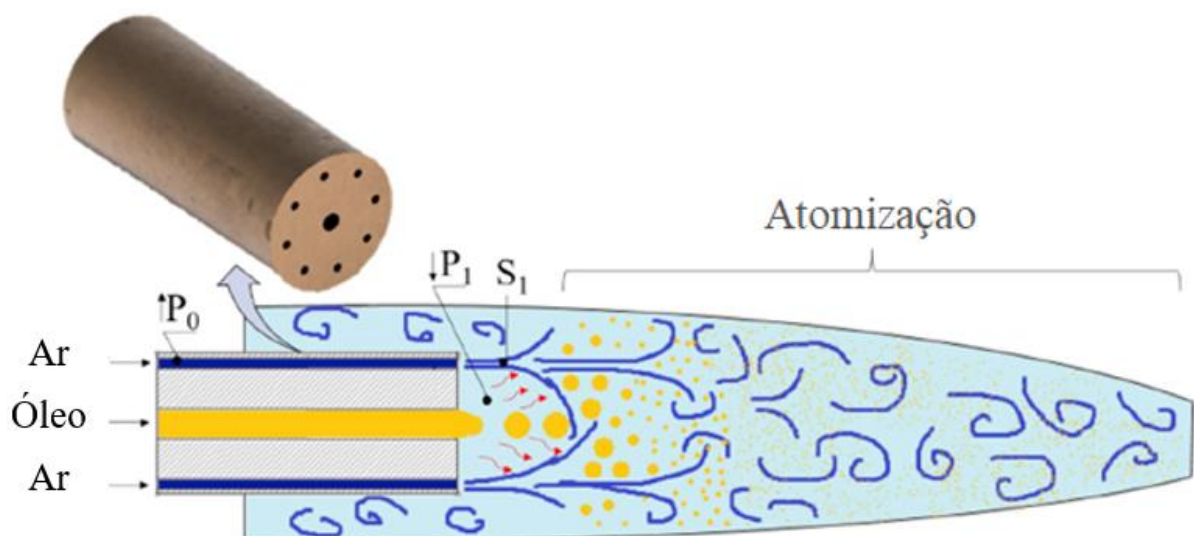


Figura 19. Princípio de Venturi aplicado no bocal de MQL (SATO et al., 2020).

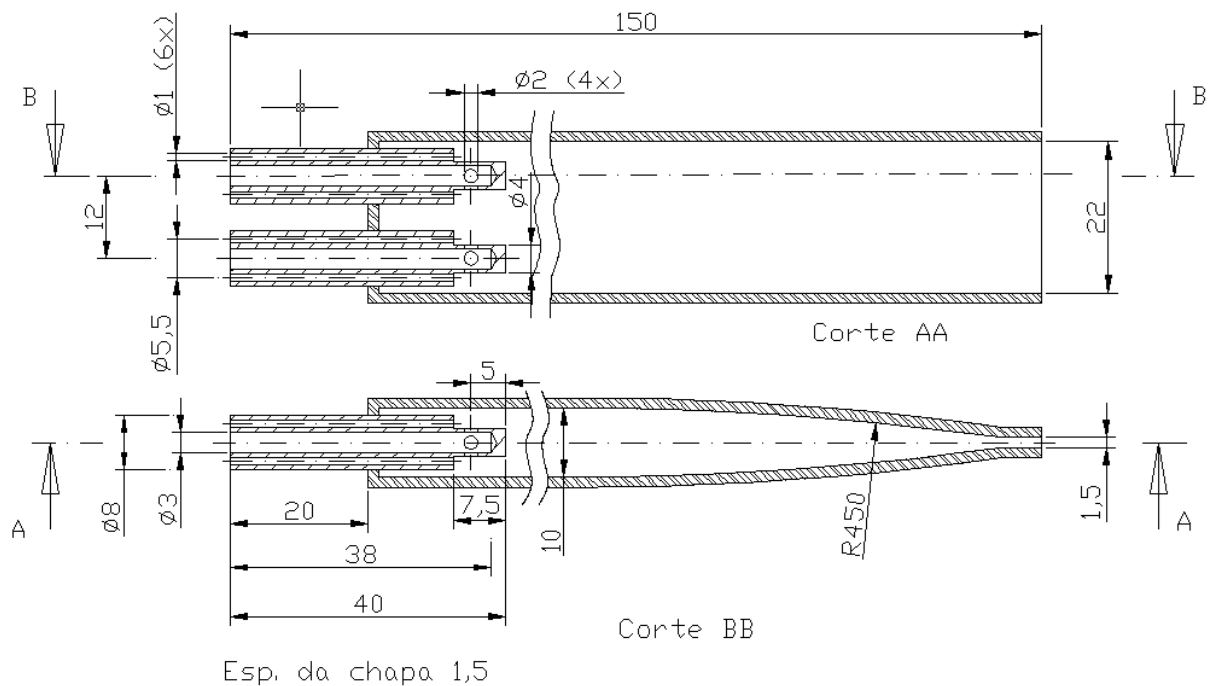


Figura 20. Bocal utilizado na aplicação da técnica de MQL (DA SILVA et al., 2007).

O fluido de corte utilizado foi o óleo de base vegetal biodegradável Accu-Lube 1000, fabricado pela ITW Chemical em estado puro. A vazão de fluido empregadas foram de 30 mL/h, 60 mL/h e 120 mL/h.

3.1.7 Sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido

O sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo foi composto por um compressor, um regulador de pressão e um bocal de limpeza. Para garantir que não houvesse quedas de pressão, o sistema de limpeza e o sistema de MQL possuíam redes de ar comprimido independentes.

No sistema de limpeza a pressão do ar comprimido foi de 0,8 MPa. O bocal utilizado foi desenvolvido para aplicação de ar comprimido em toda a largura do rebolo e aumentar a velocidade de jato. O projeto do bocal é apresentado na Figura 21.

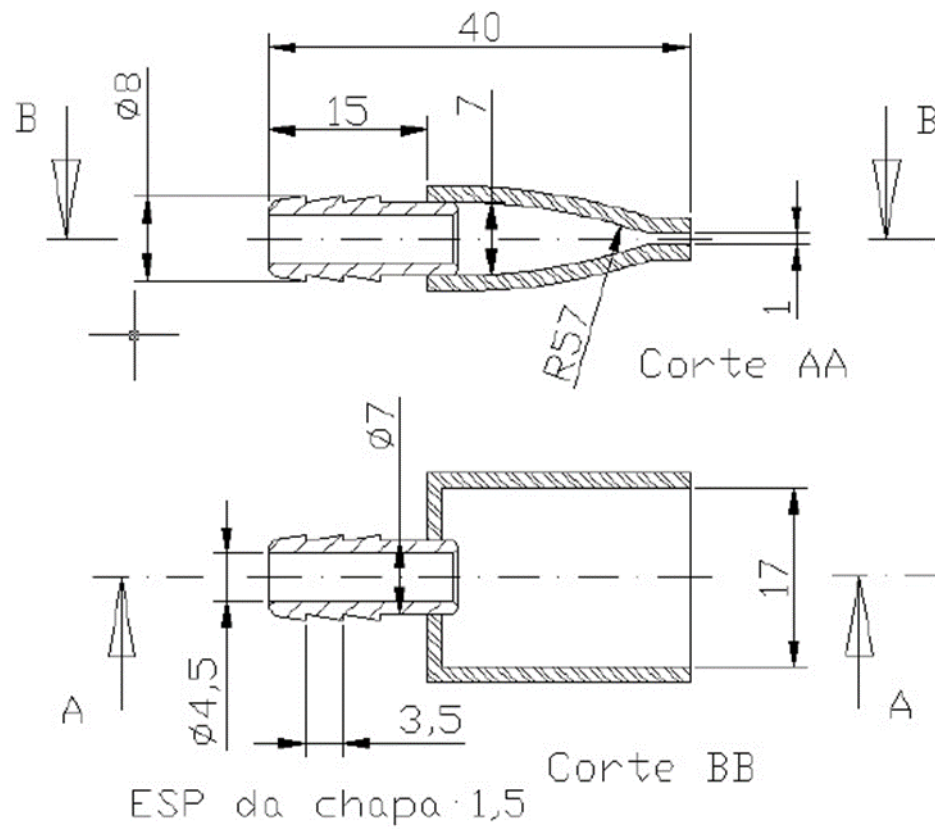


Figura 21. Bocal utilizado no sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo.

O bocal foi posicionado a 30° em relação a normal da superfície de corte do rebolo, com distância de 0,5 mm da superfície de corte do rebolo, conforme Figura 22.

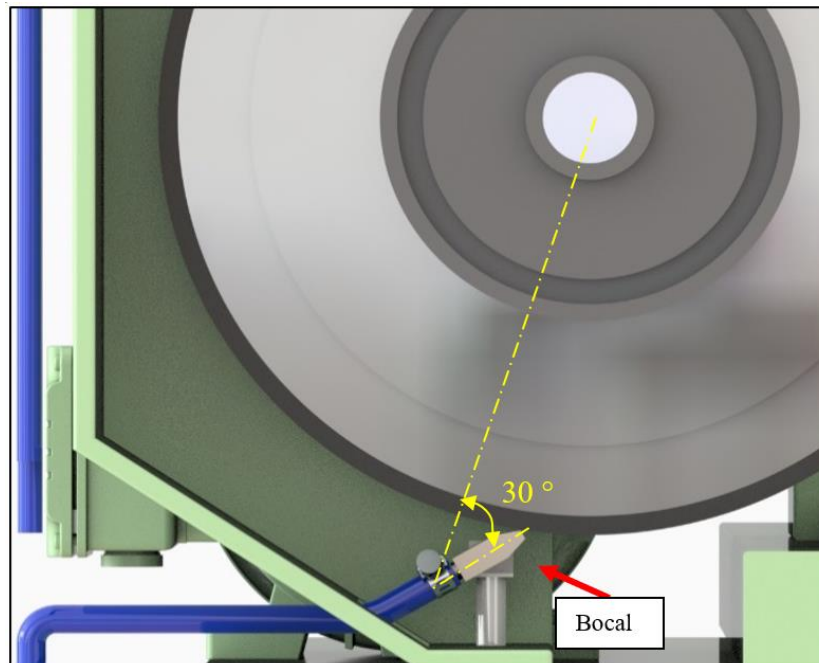


Figura 22. Posicionamento do bocal de limpeza.

3.1.8 Sistema de aquisição de dados de potência elétrica consumida

Para o monitoramento da potência elétrica consumida durante o processo de retificação, foi utilizado um inversor de frequência, modelo CFW 08, fabricado pela empresa WEG, que monitora a corrente elétrica e a tensão do motor de acionamento do rebolo durante o ensaio. Estes sinais são tratados por um circuito eletrônico, denominado Curvopower 3, projetado e construído em parceria com o Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais – LADAPS da Faculdade de Engenharia UNESP – Bauru e transmitidos a uma placa de aquisição de dados A/D, instalada em um notebook. Finalmente, os sinais são analisados pelo software LabView® 7.1 (Laboratory Virtual Instrument), da empresa National Instruments, obtendo-se os valores de potência elétrica consumida durante o ensaio.

3.1.9 Sistema de aquisição de dados de emissão acústica

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

em um notebook de maneira direta, sem a necessidade de nenhuma manipulação de dados. Optou-se pelo posicionamento do sensor o mais próximo possível da peça, no cabeçote móvel da retificadora, próximo ao contraponto, minimizando possíveis interferências, conforme Figura 23. Foram realizados diversos ensaios preliminares para determinar a melhor regulagem do sistema de medição da EA e obter boa resposta do nível do sinal RMS sem que este saturasse. Os parâmetros utilizados foram: ganho de sinal = 5; redução de ruído = 0; filtro passa alta frequência de corte = 10 K e constante de tempo = 1 ms. Finalmente, os sinais são tratados pelo software LabView® 7.1, da empresa National Instruments, obtendo-se os valores de emissão acústica emitidos durante o ensaio.



Figura 23. Posicionamento do sensor de emissão acústica.

3.2 Parâmetros de entrada do processo de retificação

Os parâmetros de entrada foram definidos em ensaios preliminares, uma vez definidos, foram mantidos constantes durante todo o experimento, com exceção dos parâmetros que foram analisados na pesquisa. Entre as variações o sistema de lubrificação (MQL e refrigeração convencional), a vazão de fluido na técnica de MQL (30 ml/h, 60 ml/h, 120 ml/h), o sistema de limpeza e os rebolos (CBN e Al_2O_3), totalizando quatorze condições de usinagem. Três ensaios foram realizados para cada condição de usinagem, de forma a aumentar a confiabilidade estatística das análises, com isso quarenta e duas operações de usinagem foram realizadas, conforme Figura 24.

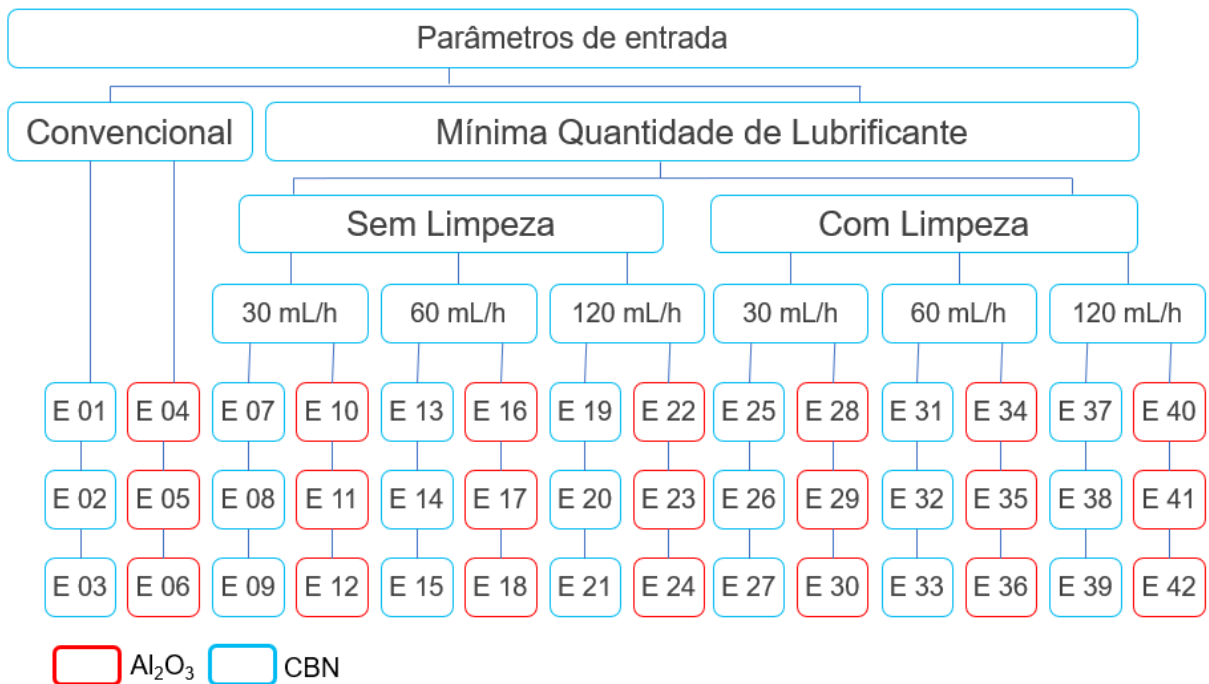


Figura 24. Matriz de ensaios.

As condições de usinagem estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de retificação.

Equipamento	Retificadora cilíndrica externa de mergulho, modelo RUAP515H, fabricada pela companhia Sulmecânica, equipada com comando numérico computadorizado (CNC) fornecido pela empresa Fagor
Processo de retificação	Cilíndrica externa de mergulho
Rebolo	Nitreto de boro cúbico (CBN), fabricado pela Nikon Ferramentas de Corte, especificação SBN151Q12VR2. Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃) fabricado pela Norton Abrasives, especificação 38A150L6V.
Velocidade do rebolo (v_s)	32 m/s
Avanço radial (v_f) / Taxa de remoção	0.50 mm/min / 1.62 mm ³ /s
Profundidade de corte (a) / Quantidade de ciclos de retificação	0.1 mm / 50 ciclos, totalizando 5 mm de redução no diâmetro da peça

Largura de retificação (b)	5 mm
Peça	Fabricada em aço ABNT 4340, temperado e revenido, em formato anelar, com $62 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ de diâmetro externo, $30 \pm 0.1 \text{ mm}$ de diâmetro interno e $5 \pm 0.1 \text{ mm}$ de espessura
Rotação da peça (n_w)	81 rpm
Condição de lubrificação	Convencional MQL (30 mL/h) MQL (30 mL/h) + Sistema de limpeza MQL (60 mL/h) MQL (60 mL/h) + Sistema de limpeza MQL (120 mL/h) MQL (120 mL/h) + Sistema de limpeza
Fluido de corte para método convencional	Óleo semissintético vegetal ME-2, fabricado pela empresa Quimatic Tapmatic Brasil., em emulsão de água na concentração de 2,5% (1:40)
Vazão de fluido de corte no método convencional	17 L/min
Fluido de corte para técnica de MQL	Óleo de base vegetal biodegradável Accu-Lube 1000, fabricado pela ITW Chemical em estado puro.
Vazão de fluido de corte na técnica de MQL	30 mL/h 60 mL/h 120 mL/h
Pressão do ar na técnica de MQL	0.7 MPa
Velocidade do ar na técnica de MQL	32 m/s
Sistema de limpeza do rebolo	Jato de ar comprimido
Pressão do ar no sistema de limpeza do rebolo	0.8 MPa
Ângulo de incidência do Sistema de limpeza do rebolo	30°

Tempo de centelhamento (t_s)	8 s
Dressador	Conglomerado de diamante, dimensões de 15 mm x 8 mm x 10 mm
Profundidade de dressagem (a_d)	0.080 mm (40 ciclos – 0,002 mm por ciclo) 0.2 mm (50 ciclos – 0,004 mm por ciclo)
Velocidade de dressagem (v_d)	500 mm/min

3.3 Procedimento de ensaio

Inicialmente, os rebolos foram devidamente balanceados, instalados na retificadora e dressados conforme condições apresentadas na Tabela 3. O corpo de prova então foi posicionado e fixado pela sua lateral em um eixo e colocado na retificadora em um sistema entre pontas. O rebolo foi então aproximado à peça até tocá-la, e afastado a uma distância de 0,1 mm na direção radial, com isso o programa CNC foi atualizado com a nova posição da peça. Feito isso, os sistemas de aquisição de emissão acústica e consumo de potência elétrica foram ligados e a retificadora acionada com a condição de lubrificação desejada, iniciando-se a operação de retificação. Cada ensaio tinha a duração de 50 ciclos, com profundidade de corte de 0,1 mm por ciclo, totalizando 5 mm de redução no diâmetro da peça e, entre cada ciclo, um tempo de centelhamento de 8 segundos foi aplicado. Ao término dos ensaios, a retificadora e os sistemas de aquisição de emissão acústica e de potência elétrica eram desligados. Ao término de cada ensaio, a peça foi retirada e, utilizando-se um gravador com ponta de aço temperado, foi identificada de acordo com a condição de lubrificação utilizada e, em seguida, limpa e armazenada para posteriores análises. Como a largura do rebolo era maior que a da peça, foi possível realizar dois ensaios utilizando a superfície de corte antes da execução de nova dressagem, somente deslocando-se a posição relativa entre ferramenta e peça. Então, sempre após dois ensaios, o perfil do rebolo desgastado foi impresso no corpo de prova de aço ABNT 1020 para posterior análise de desgaste diametral e, na sequência, foi realizada nova dressagem para continuidade dos próximos testes, de modo que a condição inicial da superfície de corte fosse sempre a mesma no início de cada ensaio. A programação CNC utilizada na impressão do perfil desgastado do rebolo é apresentada no Apêndice B - Programa para impressão do desgaste do rebolo.

3.4 Variáveis de saída

Nesta seção serão apresentadas as variáveis de saída que foram utilizadas para comparar as diferentes condições de usinagem. As variáveis de saída analisadas foram: rugosidade superficial, desvios de circularidade, desgaste diametral do rebolo, microdureza, microscopias óptica e confocal das peças retificadas e microscopia óptica da superfície de corte do rebolo.

As variáveis monitoradas durante os ensaios foram: emissão acústica e potência elétrica consumida.

Além disso, foi calculado o custo por peça e emissão de carbono para complementar a análise.

3.4.1 Rugosidade superficial

Para a medição da rugosidade foi utilizado o rugosímetro Surtronic 3+ e o software TalyProfile, versão Lite 3.1.4, da marca Taylor Hobson. Este instrumento possui agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 5 μm , resolução de 0,01 μm e trabalha com carga de 150 a 300 gf. O conjunto é anexado a um microcomputador, utilizando-se a interface de transmissão para coleta de dados RS232. O equipamento é capaz de fazer medições de rugosidade nos 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 de uma medição. No presente trabalho, o parâmetro R_a (rugosidade média aritmética) foi escolhido para análise da rugosidade superficial. O equipamento foi aferido e calibrado antes das medições, configurado com cut-off de 0,25 mm, comprimento de amostragem de 1,25 mm e com filtro 2CR - fase corrigida. O apalpador do equipamento foi posicionado de forma que a medição fosse praticada no sentido axial da peça. Antes da aferição da rugosidade, os corpos de provas foram limpos através de uma sequência de banhos, respeitando a ordem crescente de volatilidade dos líquidos, na seguinte sequência: querosene, thinner, álcool etílico P. A. e álcool metílico P. A. Para a realização das medições, o corpo de prova foi fixado em um eixo, que por sua vez foi preso em um bloco em “V”. Foram executadas 3 medições em cada peça, em regiões distintas e equidistantes, ou seja, com 120 graus de espaçamento entre elas, e o valor médio e o desvio-padrão foram calculados. O rugosímetro e o suporte para fixação da peça utilizados na medição são mostrados na Figura 25.



Figura 25. Rugosímetro e suporte utilizados para medir a rugosidade das peças.

3.4.2 Desvio de circularidade

Os desvios de circularidade foram medidos através de um circularímetro Talyrond 31C, fabricado pela empresa Taylor Hobson, aferido e calibrado antes do início das medições. A precisão deste equipamento é de $0,03 \mu\text{m}$ e sua capacidade máxima de medição é de 370 mm de diâmetro e 225 mm de altura. O equipamento é composto por um conjunto braço/coluna, que possibilita o movimento nos eixos vertical e horizontal, um apalpador com ponta de rubi, que realiza o contato com a peça para obtenção dos desvios de circularidade e uma mesa giratória, que é alimentada através de um sistema de ar comprimido. Antes da entrada no equipamento, o ar comprimido passa por um registro e um filtro de ar, permitindo a regulação da pressão do sistema.

Assim como realizado nas medições de rugosidade, as peças foram submetidas a banhos de limpeza antes da aferição dos desvios de circularidade, para impedir que pequenas partículas abrasivas influenciassem na medição deste parâmetro. Após a limpeza, a peça foi fixada em uma placa de três castanhas e centralizada por meio de dois botões de ajuste fino linear, conforme Figura 26. Foram executadas três medições distintas, deslocadas de 0,75 mm no sentido axial entre cada medição, e o valor médio e o desvio-padrão foram calculados.

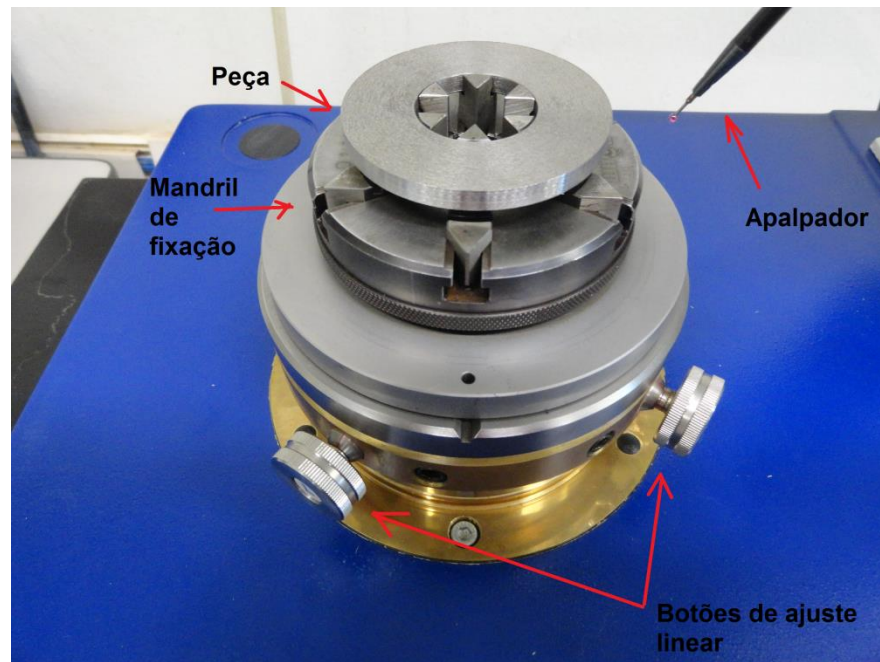


Figura 26. Componentes do equipamento de circularidade com foco na fixação da peça.

3.4.3 Desgaste diametral do rebolo

A medição do desgaste diametral do rebolo foi feita através da marcação do rebolo em um corpo de prova. Os corpos de prova apresentavam largura inferior à largura do rebolo, com isso após a usinagem de dois corpos de prova a superfície do rebolo ainda apresentava regiões com e sem desgaste, Figura 27. Dessa forma, ao usinar uma peça com largura superior à largura do rebolo foi possível mensurar a diferença entre as duas regiões do rebolo.

O corpo de prova utilizado na impressão do rebolo era constituído do aço ABNT 1020, com 35 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento. A retificação do corpo de prova foi realizada com lubrificação convencional, profundidade de corte de 0.5 mm, avanço de 0,25 mm/min e todos os demais parâmetros de entrada iguais aos utilizados nos ensaios, apresentados anteriormente na Tabela 3. Parâmetros de retificação. Tabela 3. A escolha do aço ABNT 1020, avanço de 0,25 mm/min e refrigeração convencional, tornou o processo de impressão menos severo, garantindo menor interferência no desgaste do rebolo. Após a impressão da superfície do rebolo as marcas de desgaste ficaram evidentes, conforme Figura 28.

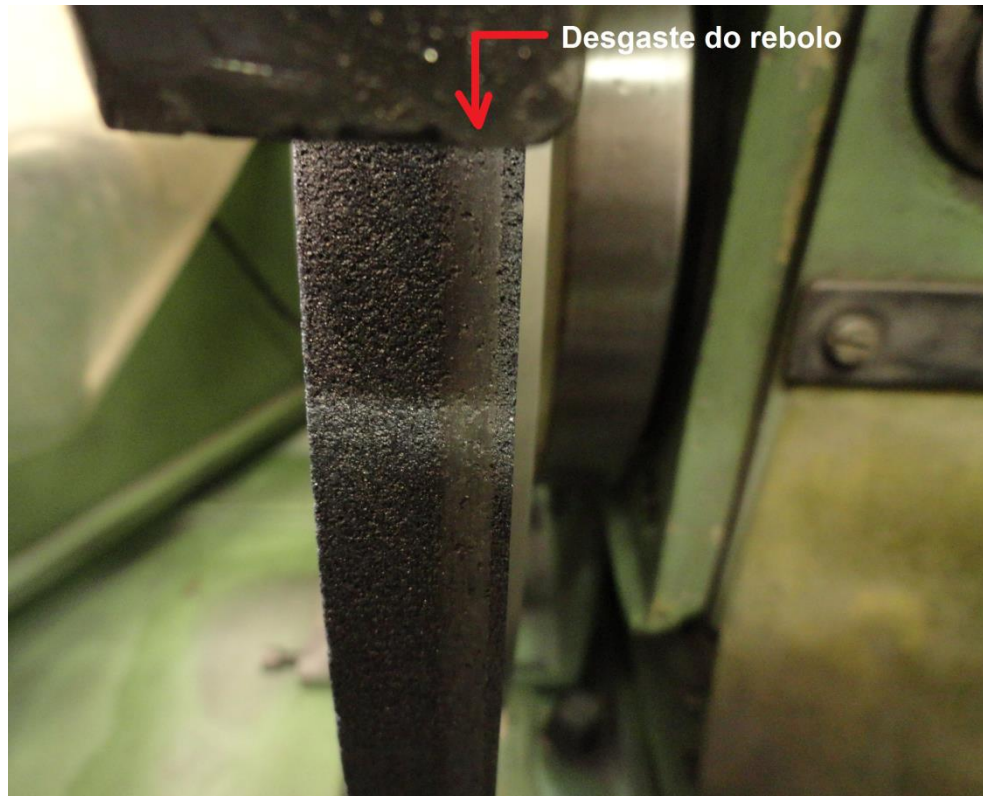


Figura 27. Rebolo de CBN com desgaste após usinagem de um corpo de prova



Figura 28. Corpo de prova após impressão do desgaste.

Em seguida foi realizada a medida de desnível entre a parte desgastada do rebolo e a parte não gasta. Para isso foi utilizado o equipamento Surtronic 3+, da marca Taylor Hobson, juntamente com o software Taylor Hobson TalyMap, onde foi possível observar o perfil de rugosidade. A rugosidade foi medida de forma a pegar uma parte desgastada e uma parte não gasta, assim para calcular o desgaste do rebolo foi medido a diferença entre os dois níveis observados, conforme é mostrado a Figura 29. Nota-se que o desgaste medido é no raio, para achar o desgaste diametral é preciso multiplicar o desgaste radial por dois.

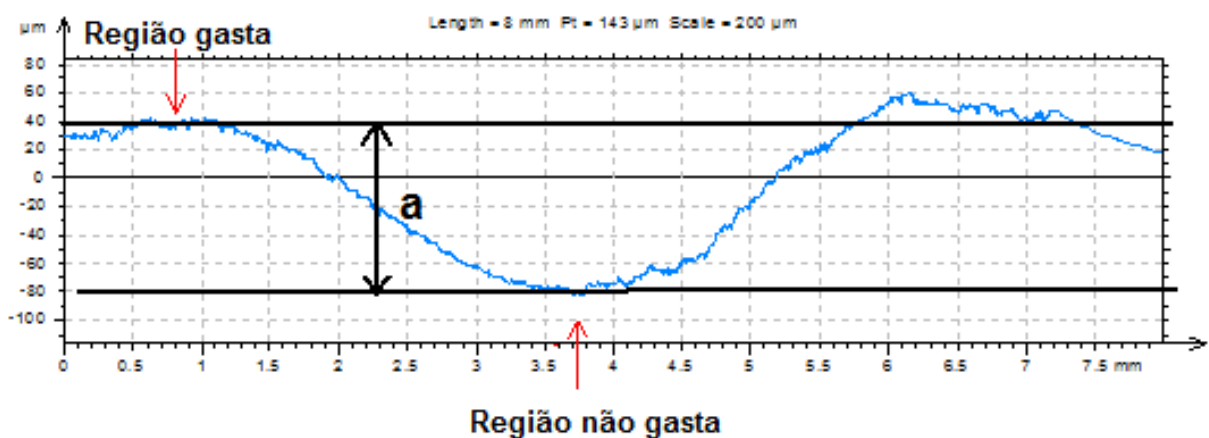


Figura 29. Representação da medição do desgaste.

3.4.4 Preparação de amostras para microdureza e análise metalográfica

Durante todo o procedimento de preparação das amostras, a temperatura do laboratório foi mantida em 25 °C e a umidade em 45%, sendo que estas condições foram aferidas através de um termohigrômetro digital, modelo HT – 208, da marca Icel Manaus. Todos os processos descritos a seguir foram realizados no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia – UNESP – Bauru/SP.

Primeiramente foi selecionado um corpo de prova entre os três daquela condição, cujo as medições de circularidade e rugosidade fossem mais próximas da média para aquela categoria.

O corpo de prova foi marcado para que a amostra tivesse em torno de 10 mm x 10 mm x 5 mm. Em seguida, as amostras foram retiradas dos corpos de prova utilizando uma máquina de corte metalográfico da marca Struers utilizando o disco de corte abrasivo de carbetto de silício (SiC), com aplicação de fluido de maneira abundante e baixa velocidade de corte, a fim de evitar alterações microestruturais.

Para facilitar o manuseio das amostras foi feito o embutimento em resina baquelite. Para esta etapa foi utilizada uma prensa para embutimento metalográfico, modelo EM30D, fabricado pela Teclago, com temperatura de 180 °C, pressão mínima de 9,81 MPa e resfriamento de 10 minutos. A resina baquelite é de dureza muito inferior ao aço, assim se desgastaria com muito mais facilidade no lixamento, para evitar abaulamento nos processos seguinte foram embutidas junto com as amostras arruelas para aumentar a área mais resistente. A configuração do embutimento é representada na Figura 30.

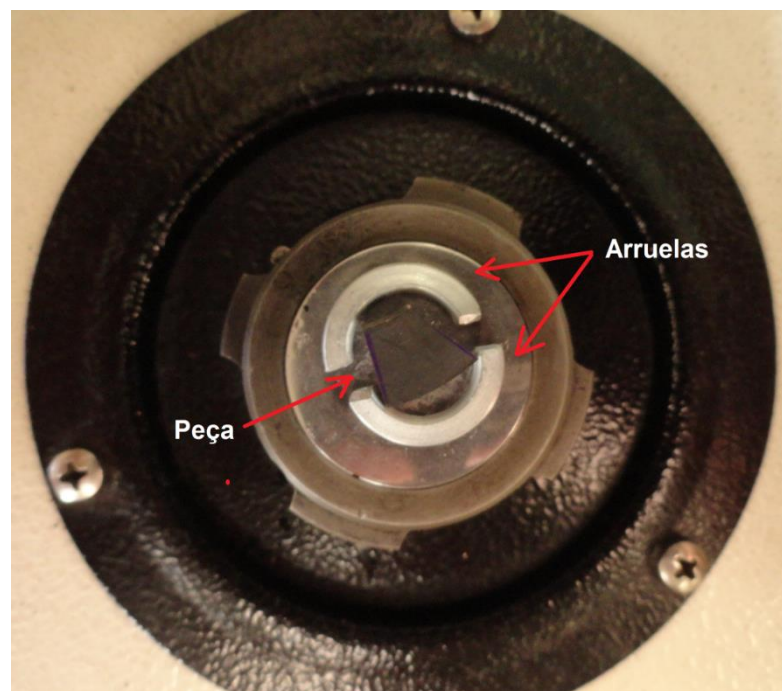


Figura 30. Posicionamento das peças para embutimento.

Na sequência, foi realizado o lixamento das superfícies, utilizando-se lixadeira manual da marca Struers, com lixas de carbeto de silício (SiC) de granulometrias 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1000 e 1200 mesh, nesta sequência. Sempre lixando até que os riscos da lixa anterior tenham desaparecido completamente. Em todas as etapas, foi utilizada água filtrada como lubrificante, refrigerante e meio de remoção de partículas. Ao término do lixamento, as amostras foram lavadas com detergente neutro e álcool hidratado 92,8°INPM e secadas com jatos de ar quente oriundos de um soprador térmico modelo D26414, da empresa Dewalt.

Uma politriz modelo AP 2, da marca Buehler, foi utilizada para realizar o polimento das peças. O polimento foi realizado utilizando Al_2O_3 1 μm em suspensão, aplicada em panos de polimento, fabricados pela Arotec, modelo DBM com rotação de 500 rpm por 3 minutos. Ao final desta etapa os riscos oriundos do lixamento foram eliminados e as amostras ficaram espelhadas.

3.4.5 Microscopia óptica das peças

Para visualização da microestrutura do material, foi necessário primeiramente realizar o ataque químico das amostras, utilizando-se uma solução de Nital 1% (álcool etílico P.A. com 1% de ácido nítrico P.A.) na temperatura de 25 °C por cinco segundos. Para neutralizar a ação do reagente químico, as amostras foram lavadas com água, detergente neutro e álcool etílico e secas com o soprador térmico.

Na sequência, a análise foi realizada com um microscópio óptico, modelo BX51, fornecido pela Olympus, acoplado a uma câmera digital, modelo EC-3, e software fotográfico Leica Application Suite EZ -versão 2.0, ambos da marca Leica, com ampliação de 1000x e, após o correto ajuste fino do foco, as imagens selecionadas foram gravadas pelo software.

3.4.6 Microdureza

Com o intuito de avaliar se houve endurecimento superficial na peça retificada foi realizado a medição de microdureza na peça. Para esse fim foi utilizado o equipamento microdurômetro digital, modelo HM-211, da marca Mitutoyo apresentado na Figura 31. A medição foi realizada a partir da impressão produzida por um indentador Vickers padrão com ponta de diamante em forma de pirâmide de base quadrada, com ângulo de 136° entre as faces, utilizando carga de 300 gf por 40 segundos, depois de atingido o valor total da carga. Após a aplicação das cargas era necessário mensurar a diagonal da indentação, Figura 32, para que o aparelho retornasse a dureza na escala Vicker. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia – UNESP – Bauru/SP.

A medição foi realizada na lateral da peça, ou seja, na superfície perpendicular à que foi retificada. Para a aferição da microdureza a amostra foi fixada no equipamento, o foco do equipamento foi ajustado, os micrometros foram zerados quando o eixo das abscissas estava na interface peça baquelite e o eixo das ordenadas estava próximo ao centro da amostra. Foram feitas 18 medições em cada peça, o micrometro das ordenadas era posicionado nas posições 60, 120, 180, 240, 300 e 300 microns, enquanto o micrometro das abscissas nas posições 0, 60 e 120. Com isso obteve-se três medições para cada 60 micrometros avançados na superfície retificada para o interior da peça, para posteriormente calcular a média das três medições a fim de evitar considerar apenas a dureza em um ponto localizado.



Figura 31. Micrôdurometro utilizado na aferição da microdureza.

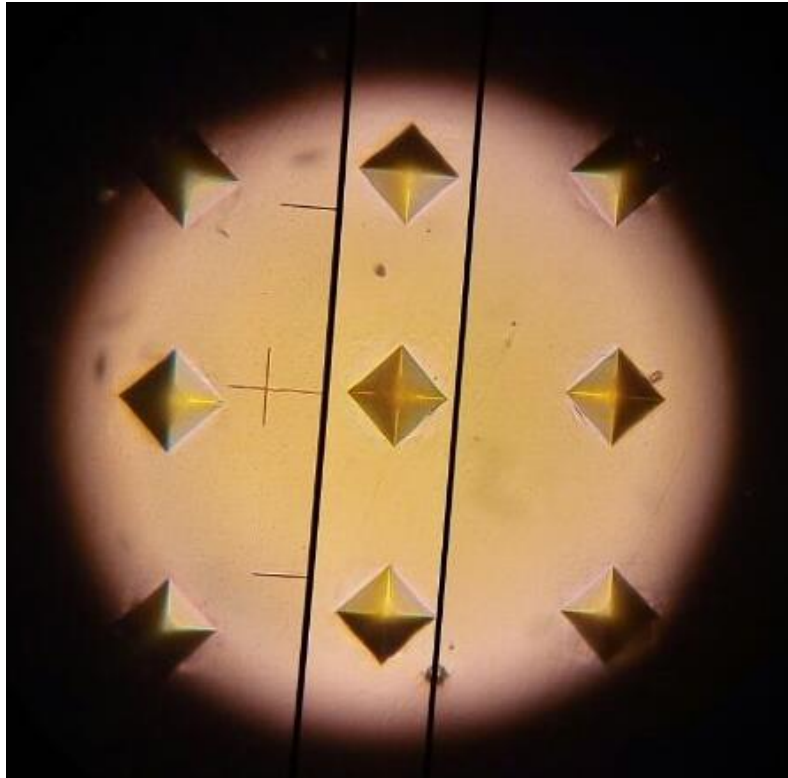


Figura 32- Superfície da peça após a realização da medição de microdureza.

3.3.7 Potência elétrica consumida

A potência elétrica consumida durante o processo de retificação foi monitorada utilizando-se o sistema descrito no item 3.1.7. O sistema foi acionado antes do início do teste e desligado logo após sua conclusão. Os dados coletados foram então tratados e obteve-se a potência média e o desvio-padrão para cada ensaio.

3.3.8 Emissão acústica

A emissão acústica gerada durante o processo de retificação foi monitorada utilizando-se o sistema descrito no item 3.1.8. O sistema foi acionado antes do início do teste e desligado logo após sua conclusão. Os dados coletados foram então tratados e obteve-se a emissão acústica média e o desvio-padrão para cada ensaio.

3.3.9 Microscopia confocal

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

o software fornecido pelo fabricante para processamento das imagens. Estas análises foram realizadas no Núcleo de Manufatura Avançada – NUMA do Departamento de Engenharia de Produção da EESC/USP – São Carlos/SP.

3.3.10 Custo por peça

O custo por peça fornece dados para uma avaliação de viabilidade econômica. A Equação 9 apresenta o custo relacionado aos custos da ferramenta, considerando o desgaste durante o processo e a camada removida durante o processo de dressagem. A Equação 10 considera o custo relacionado a aquisição e descarte do fluido de corte. Já Equação 11 considera o custo da energia utilizada durante o processo de retificação e os periféricos utilizados para cada condição de lubrificação. Assim, pela Equação 12 tem-se o custo por peça para cada método avaliado. As Equações 9, 10, 11 e 12 foram adaptadas dos trabalhos de FIELD *et al.* (1980) e PUSAVEC *et al.* (2010). O método de custo apresentado neste trabalho considera os parâmetros que são influenciados pelas variáveis que estão sendo estudadas, como o tipo de rebolo e a técnica de lubrificação.

$$C_{rebolo} = \frac{C_s \cdot V}{G} + \frac{\pi \cdot b_s \cdot C_s}{N_d} (d_s \cdot a_d - a_d^2) \quad (9)$$

$$C_{fluido} = \frac{v_{jet} \cdot a_e}{N_c \cdot v_w} \cdot (C_f + C_w) \quad (10)$$

$$C_{energia} = \frac{(P_c + P_{bo} + P_{ar}) \cdot C_e}{60000} \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (11)$$

$$C_{método} = C_{rebolo} + C_{fluido} + C_{energia} \quad (12)$$

A Erro! Fonte de referência não encontrada. apresenta as variáveis utilizadas para cálculo de custo.

Nota-se que os valores da Tabela 4 foram obtidos na presente data do estudo e podem variar com o tempo e local analisado.

3.3.11 Emissão de carbono por peça

Para análise do impacto ambiental foi calculada a quantidade de CO₂ gerada durante o processo de fabricação de uma peça. A Equação 13 considera a quantidade de CO₂ resultante da geração de energia consumida pelo processo de retificação e os equipamentos de lubrificação. A Equação 14 apresenta a emissão de carbono relacionada a fabricação dos fluidos de corte utilizados durante a retificação. Por fim, a Equação 15 apresenta a quantidade equivalente de CO₂ emitido durante a fabricação de uma peça. As variáveis utilizadas nas equações 13, 14 e 15 para calcular a emissão de carbono por peça estão apresentadas na Tabela 4.

$$CE_{Energia} = \frac{(P_c + P_{bo} + P_{ar}) \cdot CE_e \cdot 3,6}{60000} \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (13)$$

$$CE_{fluido} = \frac{V_{jet} \cdot k_p \cdot CE_{óleo}}{N_c} \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (14)$$

$$CE_{método} = CE_{fluido} + CE_{energia} \quad (15)$$

Tabela 4. Variáveis consideradas para cálculo de custo e emissão de carbono

Símbolo	Descrição	Unidade	Valores
a_d	Profundidade de dressagem	[mm]	Al ₂ O ₃ 0,002
			CBN 0,004
a_e	Profundidade de corte	[mm]	2,5
b_s	Largura do rebolo	[mm]	CBN 15
			Al ₂ O ₃ 25,6
C_e	Custo energia elétrica (ELECTRICITY PRICES, 2020)	[\$/kWh]	0,12
CE_e	Emissão de carbono pela energia elétrica (ABELLAN-NEBOT; ROGERO, 2019)	[kgCO ₂ /MJ]	0,12
CE_{óleo}	Emissão de carbono pela produção de óleo (PUSAVEC et al., 2010)	[kgCO ₂ /L]	30,616
C_f	Custo de aquisição do fluido de corte	[\$/L]	Convencional 0.4125 (3% oil)
			MQL 13.75 (Pure oil)
C_s	Custo do rebolo	[\$/mm ³]	CBN 0,0083775
			Al ₂ O ₃ 0,00018954
C_w	Custo do descarte de fluido de corte (DEMIRBAS; KOBAYASHI, 2017)	[\$/L]	0,085

d_s	Diâmetro externo do rebolo	[mm]	CBN	350
			Al ₂ O ₃	355,6
v_w	Avanço de radial	[mm/min]		0,5
G	G-ratio	[-]		CBN Al ₂ O ₃
			Convencional	186,2 87,3
			MQL 30 mL/h	18,9 7,7
			MQL 30 mL/h + Limp	49,5 34,1
			MQL 60 mL/h	24,9 11,1
			MQL 60 mL/h + Limp	85,3 38,8
			MQL 120 mL/h	38,1 13,4
			MQL 120 mL/h + Limp.	143,6 53,7
N_c	Ciclos do fluido de corte	[-]	Convencional	10
			MQL	1
N_d	Número de peças entre dressagem	[-]	2	
P_{ar}	Potência compressor de ar	[W]	Convencional	0
			MQL e MQL + Limp.	5500
P_{bo}	Potência bomba de circulação	[W]	Convencional	372,85
			MQL e MQL + Limp.	0
P_c	Potência de corte	[W]		CBN Al ₂ O ₃
			Convencional	239,4 328,9
			MQL 30 mL/h	367,65 407
			MQL 30 mL/h + Limp	315,4 352
			MQL 60 mL/h	346,75 379,5
			MQL 60 mL/h + Limp	286,9 328,9
			MQL 120 mL/h	323,95 357,5
			MQL 120 mL/h + Limp	247,95 300
R	Distância de avanço rápido	[mm]	300	
r	Avanço rápido	[mm/min]	5000	
K_p	Proporção de óleo na emulsão	[-]	Convencional	0,025
			MQL	1
v_{jet}	Vazão de fluido	[L/min]	Convencional	7,5
			MQL 30 mL/h	0,0005
			MQL 60 mL/h	0,001
			MQL 120 mL/h	0,002
t_{so}	Tempo de centelhamento	[min]	0,13333	
V	Volume de material removido por peça	[mm ³ /peça]	1950	

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos com os ensaios realizados, além de discutir e comparar os resultados das condições analisadas. Os parâmetros de saída analisados foram: rugosidade superficial, erro de circularidade, desgaste diametral do rebolo, microscopia confocal da superfície retificada, potência da retificação, emissão acústica, microscopia ótica da peça, custo por peça e emissão de carbono por peça. Os resultados estão apresentados na

forma de gráfico de barras, onde os valores são as médias das medições realizadas e seus respectivos desvios padrão.

4.1 Rugosidade superficial

A Figura 33 apresenta os resultados de rugosidade superficial para cada condição analisada, nela observa-se que os resultados tendem a melhorar com o aumento da vazão de fluido aplicado pela técnica de MQL para ambos os rebolos. De acordo com Tawakoli *et al.*, (2010) maiores vazões de óleo geram maior efeito lubrificante na técnica de MQL, visto que isso aumenta a quantidade de gotículas de óleo que atingem a zona de corte e melhora a molhabilidade da região. Huang et al., (2018) afirmaram que o diâmetro e velocidade das gotículas de óleo aumentam com a vazão, com isso o óleo atinge a zona de corte mais facilmente, pois o momento se torna maior. Para Silva et al., (2013) uma vez que o efeito lubrificante aumenta, os cavacos tendem a deslizar com maior facilidade sobre a superfície da ferramenta. A Figura 33 apresenta uma melhora de 37,9% para o Al_2O_3 e 36,1% para o CBN na rugosidade superficial quando a vazão de fluido de corte passa de 30 ml/h para 120 ml/h.

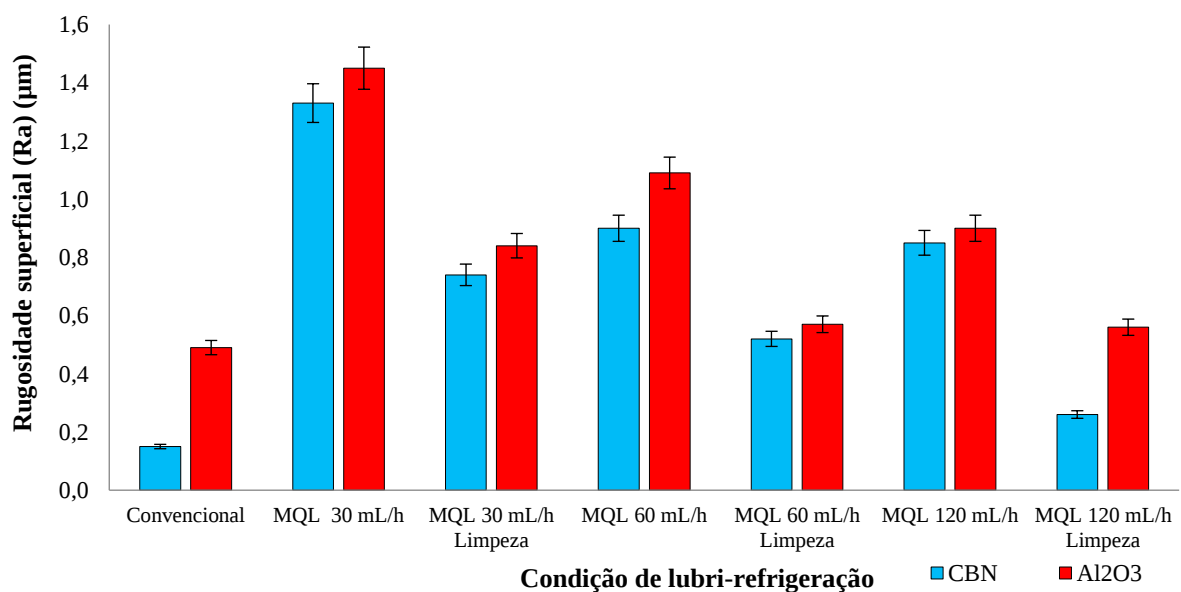


Figura 33. Rugosidade superficial para cada condição analisada

O sistema de limpeza foi benéfico para o processo de retificação em termos de rugosidade superficial. De acordo com Sato et al., (2020) o empastamento do rebolo prejudica a qualidade superficial das peças produzidas, pois bloqueia a entrada de fluido de corte na zona de corte. Bianchi et al., (2019) afirmaram que a remoção de material na retificação ocorre em três fases: deslizamento, sulcamento e cisalhamento, onde as duas primeiras são ineficientes no

processo de remoção de material. O empastamento prejudica que a fase de cisalhamento ocorra com isso a qualidade superficial é afetada e erros geométricos e dimensionais aumentam. Observou-se que a técnica de MQL não expeliu os cavacos para fora do processo de forma satisfatória, com isso o empastamento do rebolo foi agravado. Nesses casos Klocke (2009) recomenda a utilização de sistemas de limpeza auxiliares para expulsar os cavacos e impurezas da superfície de corte do rebolo.

Ao observar a Figura 33, a aplicação de ar em alta velocidade na superfície de corte do rebolo melhorou os resultados de rugosidade superficial em 43% no caso do Al_2O_3 e 51% no rebolo de CBN. Assim o sistema de limpeza quando combinado com a técnica de MQL apresentou resultados comparáveis a refrigeração convencional, mesmo que a quantidade de fluido utilizada foi drasticamente reduzida, tornando promissor a utilização desse método que resulta em menor impacto socioambiental.

No presente estudo o processo de retificação consistiu em 42 ciclos de remoção de material, para simular a usinagem de 42 peças durante cada experimento. Visto que as medições foram realizadas apenas ao final de cada experimento, apenas a rugosidade da última peça dos 42 ciclos foi medida. Pela Figura 33 o rebolo de CBN gerou melhor rugosidade superficial do que o rebolo de Al_2O_3 em todas as condições. Tal fato é explicado pela maior dureza dos grãos de CBN em relação aos grãos de Al_2O_3 , assim, ao final de cada experimento os grãos abrasivos de CBN permaneceram afiados, enquanto os grãos de Al_2O_3 se desgastaram e afetaram a qualidade superficial.

4.2 Erro de circularidade

De acordo com Hadad et al., (2012) o MQL apresenta um excelente lubrificação, no entanto sua refrigeração não é suficiente para o processo de retificação. De forma que na refrigeração convencional o coeficiente de transferência de calor é $3,7 \times 10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$ e na técnica de MQL $0,12 \times 10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Além disso, concluíram no estudo que 46% da energia térmica gerada no processo é transferida para a peça quando o MQL é utilizado, já para a refrigeração convencional é de 14%, essa diferença demonstra que a quantidade de calor absorvido pela peça é maior quando o MQL é aplicado. Tal fato impacta na precisão geométrica do processo. Conforme visto na Figura 34 o erro de circularidade apresentado pela refrigeração convencional foi inferior às condições de MQL.

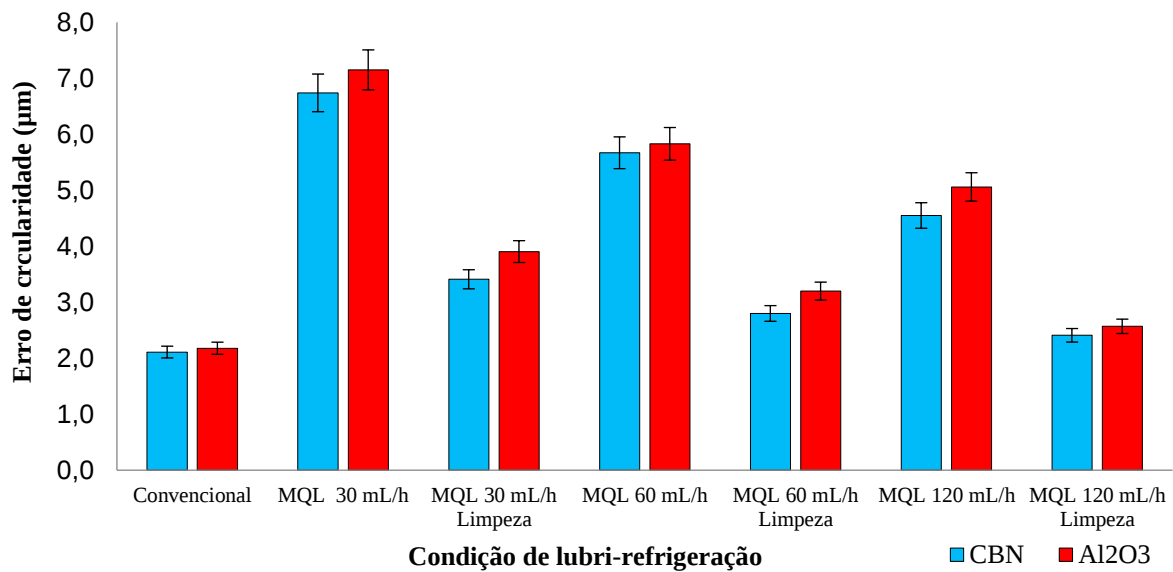


Figura 34. Erro de circularidade para cada condição analisada.

Com base nos resultados apresentados na Figura 34 o aumento da vazão de fluido de corte na técnica de MQL reduziu os erros de circularidade. Comparando os resultados obtidos com a vazão de 30 mL/h e 120 mL/h houve melhora de 32% ao utilizar o rebolo de CBN e 29% utilizando o rebolo de Al₂O₃. De acordo Debnath et al., (2014) o fluido de corte tem papel fundamental na dissipação da energia térmica gerada no processo de usinagem, evitando assim que dilatações térmicas ocorram na peça. As dilatações térmicas na peça prejudicam a precisão geométrica e dimensional do processo. Com o aumento da vazão de fluido de corte aplicado pela técnica de MQL, a quantidade de fluido entregue na zona de corte é maior o que aumenta a dissipação térmica do processo.

O sistema de limpeza impactou positivamente os resultados, conforme observado na Figura 34. O acúmulo de resíduos na superfície de corte do rebolo (empastamento) prejudica que o grão abrasivo penetre de forma adequada na peça, aumentando os esforços de corte e com isso, elevando as deflexões no sistema. Quando o empastamento do rebolo ocorre a penetração do fluido de corte na zona de corte é prejudicada, com isso os efeitos refrigerantes e lubrificantes providos pelo MQL são reduzidos, com isso maior quantidade de calor é gerada e concentrada na zona de corte, fazendo com que os componentes envolvidos sofram dilatações térmicas. No caso do rebolo de CBN a aplicação do sistema de limpeza melhorou em 49% os resultados de circularidade e para o rebolo de Al₂O₃ 51,8%, demonstrando a eficiência do jato de ar comprimido em amenizar a ocorrência do empastamento.

Comparando os dois tipos de rebolos utilizados, o CBN apresentou melhores resultados de erro de circularidade. De acordo com Rowe (2014) a condutividade térmica do Al_2O_3 é de 40 W/mK, já a condutividade térmica do CBN é 1300 W/mk. A diferença entre as propriedades térmicas dos dois abrasivos define a porcentagem de calor que vai ser dissipada pela ferramenta. Nota-se que, o CBN por apresentar uma maior condutividade térmica, é capaz de conduzir maior quantidade de calor, com isso menor porcentagem de calor é transmitida para a peça. Dessa forma, as dilatações térmicas da peça reduzem e o processo é capaz de atingir maior precisão geométrica e dimensional. Além disso, o grão de CBN apresenta maior dureza que o grão de Al_2O_3 , com isso o rebolo de CBN mantém sua afiação por mais tempo, evitando esforços extras causados pelo desgaste da ferramenta.

Nota-se na Figura 34 que os resultados da condição MQL 120 mL/h com sistema de limpeza apresentou resultados próximos da refrigeração convencional mesmo com uma redução drástica na utilização de óleo, resultando em menor impacto socioambiental.

4.3 Desgaste diametral do rebolo

O desgaste da ferramenta determina a quantidade de peças fabricadas entre as dressagens, quanto menor for o desgaste, maior disponibilidade da ferramenta, o que aumenta a produtividade do processo. O desgaste ocorre devido ao contato mecânico entre os grãos abrasivos e peça. Neste processo, as cargas aplicadas sobre os grãos abrasivos são extremamente elevadas, causando altas forças de atrito e gerando elevadas quantidades de calor (JAVARONI et al., 2020b). A aplicação de fluidos de corte nos processos de usinagem é realizada para reduzir as forças de corte e dissipar o calor gerado no processo. As propriedades lubrificantes do fluido de corte criam uma película sobre os componentes envolvidos para intermediar o contato mecânico entre os grãos abrasivos e peça, com isso a força de atrito é reduzida. Além disso, o fluido de corte tem o papel de dissipar o calor da zona de corte para evitar que a dureza dos grãos abrasivos diminua devido às altas temperaturas.

A técnica de MQL apresenta alta eficiência em lubrificar a zona de contato, no entanto, seu efeito de arrefecimento não é o suficiente para o processo de retificação. De forma que a refrigeração convencional, por apresentar um maior equilíbrio entre refrigeração e lubrificação, apresentou os menores desgastes diametraes dentre as condições analisadas, onde o desgaste do CBN foi de 3,81 μm e do Al_2O_3 foi 8,0 μm .

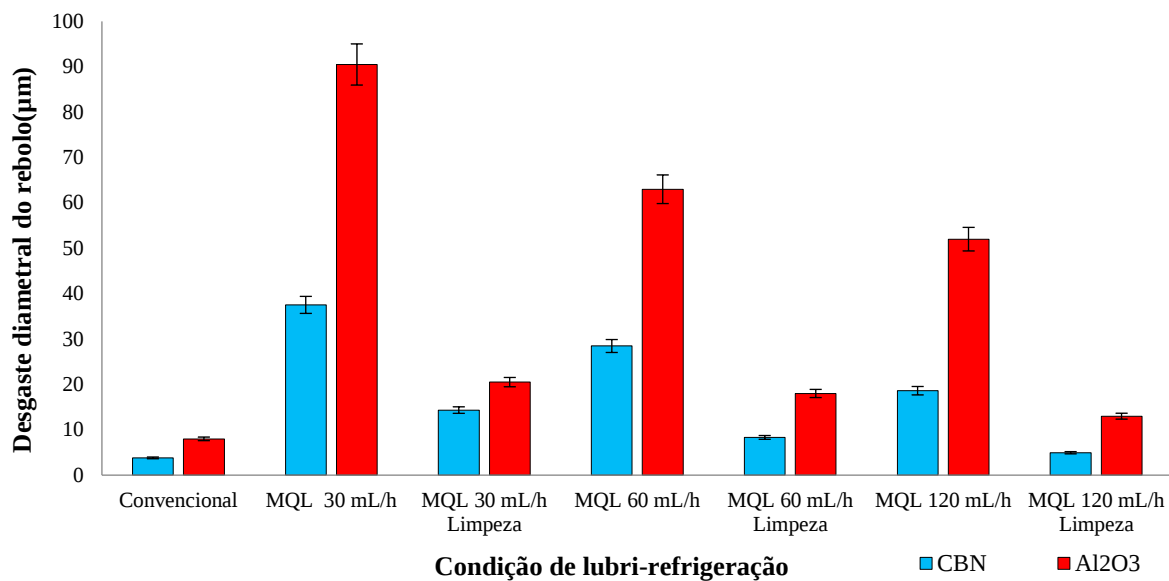


Figura 35. Desgaste diametral do rebolo para cada condição analisada.

Conforme a vazão de fluido de corte aumentou, o desgaste das ferramentas reduziu, 54,4% no rebolo de CBN e 42,5% no rebolo de Al₂O₃. Maiores vazões de fluido de corte resultam em melhor lubrificação e refrigeração no processo. De acordo com Bianchi et al., (2018a) o desgaste do rebolo reduz com o aumento da lubrificação e arrefecimento do processo.

Comparando a técnica tradicional de MQL e a técnica de MQL com o sistema de limpeza, observa-se que houve redução com a utilização do sistema de limpeza de 67,4% no desgaste da ferramenta no caso do CBN e 74,9% utilizando o rebolo de Al₂O₃. O impacto positivo do sistema de limpeza ocorreu pelo aumento na expulsão de resíduos da superfície de corte do rebolo para fora do processo. O impacto do jato de ar comprimido sobre o rebolo reduziu o empastamento da ferramenta, assim, houve redução nos esforços de corte e maior quantidade de fluido teve sucesso em penetrar na zona de corte. Com isso, há predominância do micro desgaste nos grãos abrasivos, esse mecanismo de desgaste é desejável pois mantém a afiação das arestas de corte e os grãos abrasivos permanecem fixos no ligante.

O desgaste apresentado no rebolo superabrasivo foi menor que no rebolo de abrasivo convencional, devido a maior resistência mecânica e dureza. Ademais, a condutividade térmica do CBN é maior do que do Al₂O₃, com isso o CBN promove uma maior dissipação térmica o que evita que a dureza do grão abrasivo seja reduzida com altas temperaturas.

O comportamento dos resultados de desgaste diametral do rebolo foi similar aos de rugosidade superficial e erro de circularidade. A integridade dos grãos abrasivos no final dos experimentos é importante para gerar um melhor acabamento superficial na peça, pois grãos

cegos aumentam o sulcamento (*ploughing*) e esfregamento (*rubbing*). Esses mecanismos de remoção de material induzem defeitos superficiais como deformações plásticas e escoamento lateral do material (*sideflow*). Além disso, a predominância do sulcamento e esfregamento aumenta a geração de calor e com isso impacta na precisão geométrica e dimensional do processo.

O sistema de limpeza combinado com a técnica de MQL reduziu de forma considerável o desgaste do rebolo, gerando resultados comparáveis a refrigeração convencional, principalmente na condição MQL 120 mL/h com sistema de limpeza. Tais resultados demonstram que o MQL pode ser utilizado como um método alternativo da refrigeração convencional.

4.4 Emissão acústica

A emissão acústica é a energia transitória gerada pelo estresse durante as deformações mecânicas do material. Na retificação os sinais de EA ocorrem durante os fenômenos físicos envolvidos no processo de remoção de material, como deslizamento, deformações, sulcamento e cisalhamento do material. A Figura 36 apresenta os resultados dos sinais de Emissão Acústica (RMS) para cada condição testada.

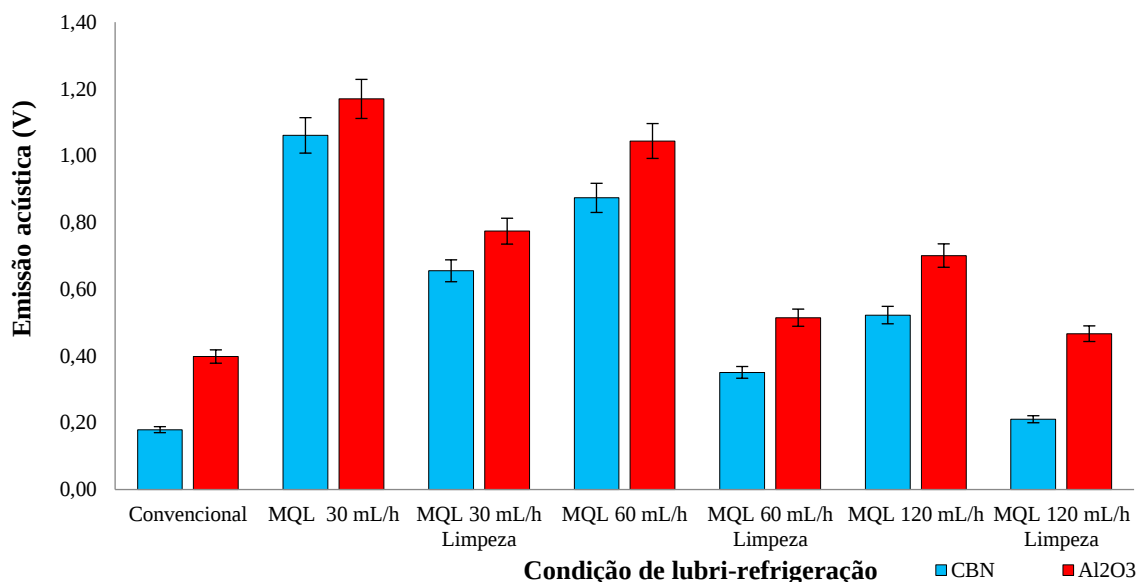


Figura 36. Sinais de emissão acústica (RMS) medidos durante os experimentos de cada condição analisada.

A refrigeração convencional apresentou o menor sinal de EA, o que indica maior eficiência na remoção de material e melhor lubrificação do processo. O aumento da vazão de

fluido de corte no MQL reduziu os sinais de EA, essa redução foi de 80,1% com a utilização do rebolo de CBN e 60,1% com a utilização do rebolo de Al_2O_3 . Conforme discutido nas seções 3.1, 3.2 e 3.3 o aumento da vazão de fluido de corte melhora a lubrificação e refrigeração do processo, e reduz o empastamento do rebolo. Esses fatos reduzem a ocorrência dos mecanismos de corte de sulcamento e esfregamento, além de evitar que os cavacos continuem atritando com o material.

O sistema de limpeza reduziu a emissão acústica em 50,5% no caso do CBN e 39,8% no caso do Al_2O_3 . De acordo com Kishawy et al., (2018) os sinais de emissão acústica são gerados pelo cisalhamento do material, atrito entre ferramenta, peça e cavaco, desgaste da ferramenta, fratura do cavaco, danos na ferramenta, adesão de cavacos na peça ou ferramenta e vibrações da ferramenta. O empastamento do rebolo reduz a capacidade de corte do rebolo, aumenta os mecanismos de sulcamento e esfregamento, eleva a deformação do cavaco durante sua remoção e aumenta o atrito entre cavaco e peça (SATO et al., 2020). Nota-se que o empastamento agrava as condições para aumento da geração do sinal de EA.

Conforme apresentado na Figura 36, os sinais de EA foram menores no rebolo de CBN comparado aos do rebolo de Al_2O_3 . Os resultados de EA seguem a mesma tendência dos resultados de desgaste diametral do rebolo, visto que os sinais de EA tendem a aumentar com o desgaste da ferramenta. O desgaste da ferramenta reduz a eficiência do processo em remover material, assim aumenta-se a parcela de energia dissipada por indesejáveis interações mecânicas, como sulcamento, esfregamento e atrito. Visto na seção 3.3, o rebolo de Al_2O_3 apresentou maior desgaste em relação ao rebolo de CBN, devido a sua menor dureza. Assim os sinais de EA gerados nas condições com o rebolo de Al_2O_3 foram maiores devido a menor eficiência na remoção de material.

4.5 Morfologia da superfície retificada

A morfologia da superfície retificada revela qual mecanismo de remoção de material predominou durante o processo de retificação. A lubrificação e refrigeração da zona de corte, providas pelo fluido de corte, impactam na remoção de material, pois influenciam nas interações entre os grãos abrasivos e peça. A Figura 37 apresenta as imagens confocal das superfícies retificadas em diferentes condições de lubrificação e refrigeração e ferramenta.

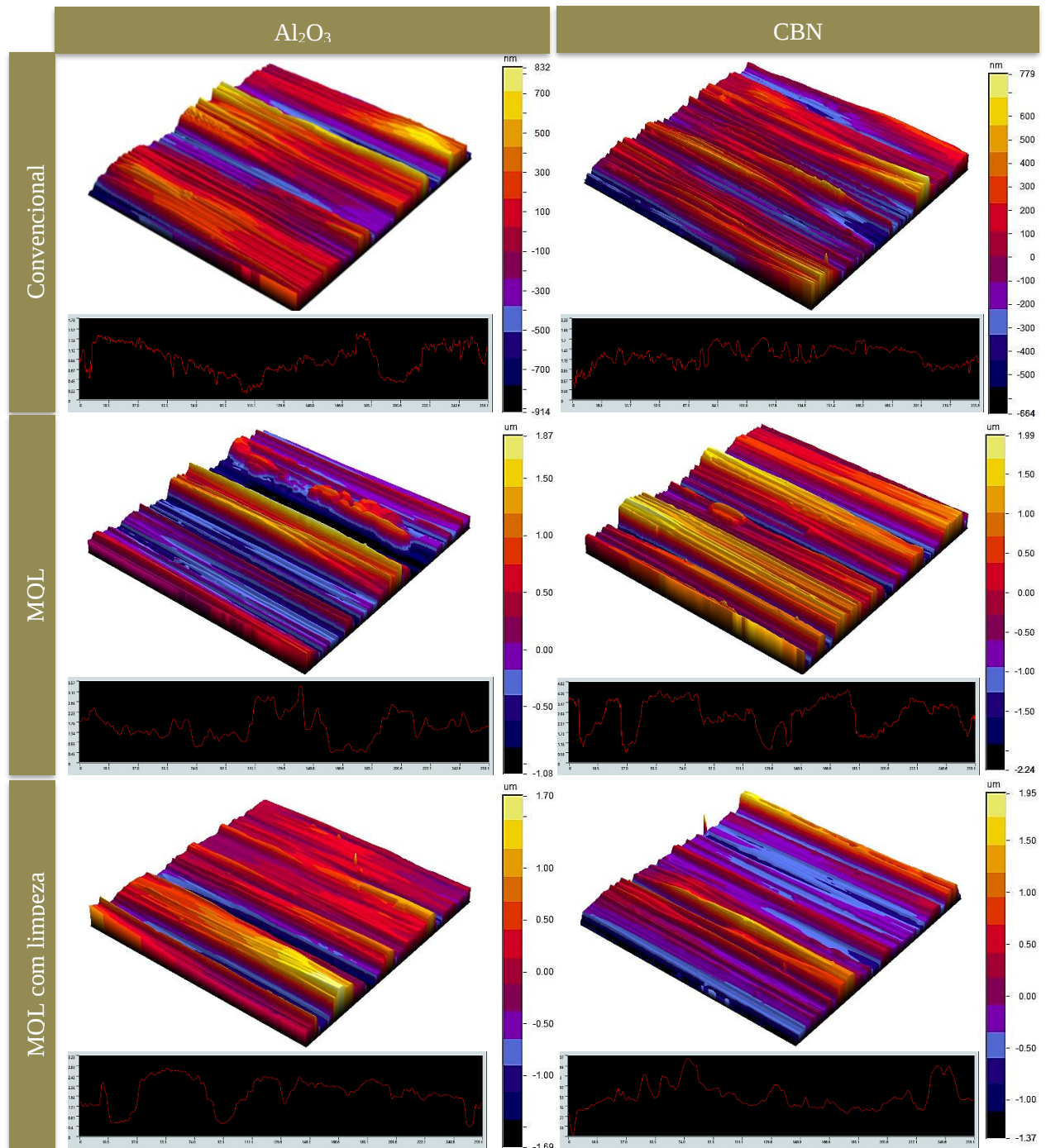


Figura 37. Confocal da superfície retificada em diferentes condições.

Analisando a Figura 37, a superfície retificada com o rebolo de CBN apresentou menor quantidade de defeitos superficiais em relação à retificada com o rebolo de Al_2O_3 quando a refrigeração convencional foi utilizada. A diferença entre os resultados apresentados pelos abrasivos é atribuída principalmente pela superioridade da dureza do CBN em relação ao Al_2O_3 . O rebolo de CBN tende a produzir superfícies uniformes por mais ciclos, enquanto, o Al_2O_3 se

desgasta em menos ciclos, criando irregularidades em sua superfície de corte que são transferidas para a superfície da peça.

As superfícies retificadas utilizando a técnica de MQL apresentaram maiores variações em sua topografia e ocorrência de defeitos, como o *side flow*. O *side flow* consiste em uma deformação plástica nas laterais da trajetória do grão, onde, ao invés de ser removido, o material escoia para os lados, prejudicando a qualidade superficial da peça. Nesses casos, o empastamento da superfície de corte do rebolo foi a principal causa para a geração deste defeito. O empastamento consiste na formação de uma camada de resíduos sobre a superfície de corte do rebolo que cobre grande parte dos grãos abrasivos, durante o contato com a peça essa camada gera uma força contrária ao avanço. Dependendo da severidade em que o empastamento ocorre, essa resistência que o fenômeno gera prejudica a penetração do grão abrasivo na superfície da peça, impedindo que os grãos não atinjam a mínima espessura de corte para gerar a formação de cavacos. Dessa forma, ao invés de ser removido, o material se deforma para as laterais da trajetória do grão (SATO et al., 2020).

A utilização do sistema de limpeza reduziu as variações da topografia das superfícies retificadas. No entanto, a incidência de *side flow* ainda foi observada nas imagens obtidas pelo confocal.

4.6 Potência de retificação

A potência de retificação é correlacionada aos esforços envolvidos na remoção de material. Altas potências de retificação significam que os esforços para remover o material são maiores, considerando uma taxa de remoção constante. Figura 38 apresenta as medições de potência da retificação para cada condição analisada.

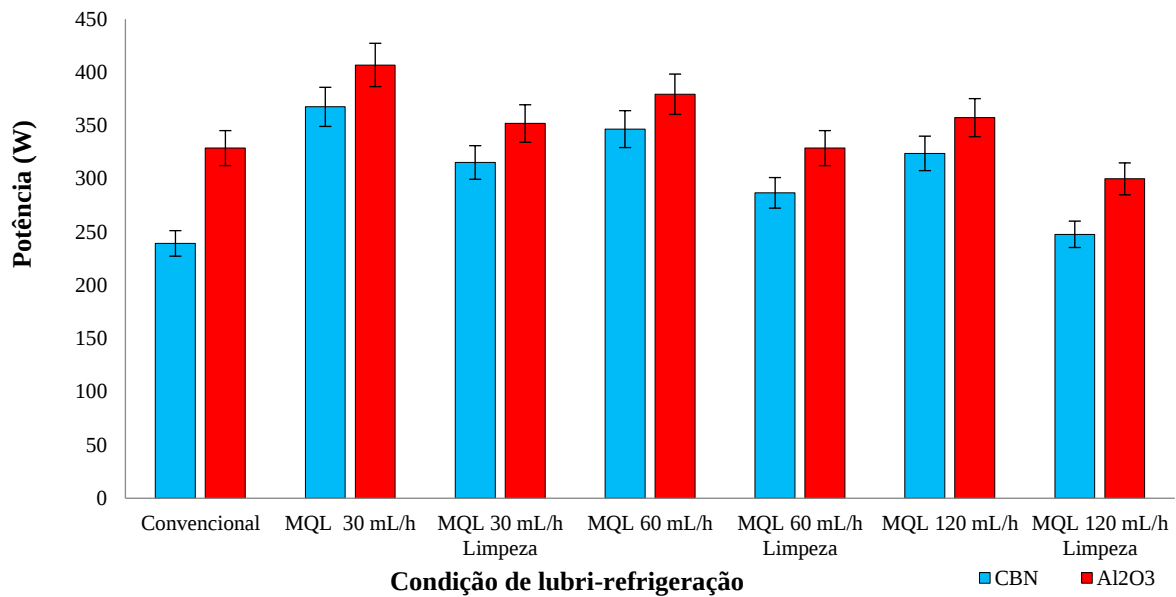


Figura 38. Média aritmética de potência medida durante os experimentos para cada condição analisada.

A refrigeração convencional apresentou a menor potência de retificação entre as condições de lubrificação analisadas com rebolo de CBN (239,4 W). Já para o rebolo de Al₂O₃ a menor potência de retificação foi gerada pela técnica de MQL 120 mL/h com o sistema de limpeza (300 W).

Observa-se na Figura 38 que o aumento da quantidade de fluido de 30 mL/h para 120 mL/h na técnica de MQL reduziu a potência de retificação em 11,8% no rebolo de CBN e 12,1% no rebolo de Al₂O₃. O aumento da vazão de fluido de corte resultou em melhor eficiência na entrega de fluido de corte, o que amenizou o contato mecânico entre os grãos abrasivos e peça. A criação de um filme entre as superfícies envolvidas, reduz as forças de atrito e melhora o deslizamento do cavaco sobre o grão abrasivo.

Analisando a Figura 38 há diferença na potência de retificação apresentada pelos rebolos de CBN e Al₂O₃. O rebolo de CBN apresentou os menores valores em todas as condições de lubrificação analisadas. A alta dureza dos grãos abrasivos de CBN prolonga a vida útil do rebolo e mantém as arestas de corte afiadas por mais ciclos. Os grãos abrasivos de Al₂O₃ por apresentarem menor dureza perdem a afiação com menos ciclos, com isso os esforços de corte são maiores. Os grãos abrasivos desgastados não apresentam arestas de corte com geometria que favorece a remoção de material, dessa forma há mais atrito do que remoção de material durante o contato dos grãos abrasivos com a peça (os mecanismos de corte esfregamento e sulcamento predominam).

Os resultados de potência de retificação da técnica de MQL melhoraram com a utilização do sistema de limpeza. No caso do rebolo de CBN o sistema de limpeza reduziu em 18,1% a potência de retificação, já para o rebolo de Al_2O_3 a redução foi de 14,3%. O empastamento da superfície de corte do rebolo afeta o desempenho da ferramenta, pois evita que a porosidade realize as tarefas de facilitar a penetração do fluido de corte na zona de corte e alojar os cavacos. De acordo com Sato et al., (2020) a camada de empastamento aumentou substancialmente a deformação plástica do cavaco durante a sua remoção. Tal fato, aumentou os esforços envolvidos no processo.

As condições de MQL com o sistema de limpeza apresentaram resultados de potência de retificação comparáveis à refrigeração convencional. Dessa forma, a utilização do MQL se torna aplicável na indústria, pois consome uma quantidade similar de energia, além de contribuir com aspectos ambientais e sociais.

4.7 Microscopia ótica

A elevada quantidade de energia térmica gerada durante o processo de retificação tem potencial para causar danos térmicos ao material usinado (mudanças microestruturais, queima branca, queima escura e micro rachaduras). Dessa forma, é extremamente necessário assegurar que o material não sofra danos térmicos quando se altera os parâmetros de retificação, principalmente em casos em que o método de lubrificação é alterado. A Figura 39 apresenta a microscopia ótica da subcamada retificada com a refrigeração convencional e MQL 30 mL/h para ambos os rebolos.

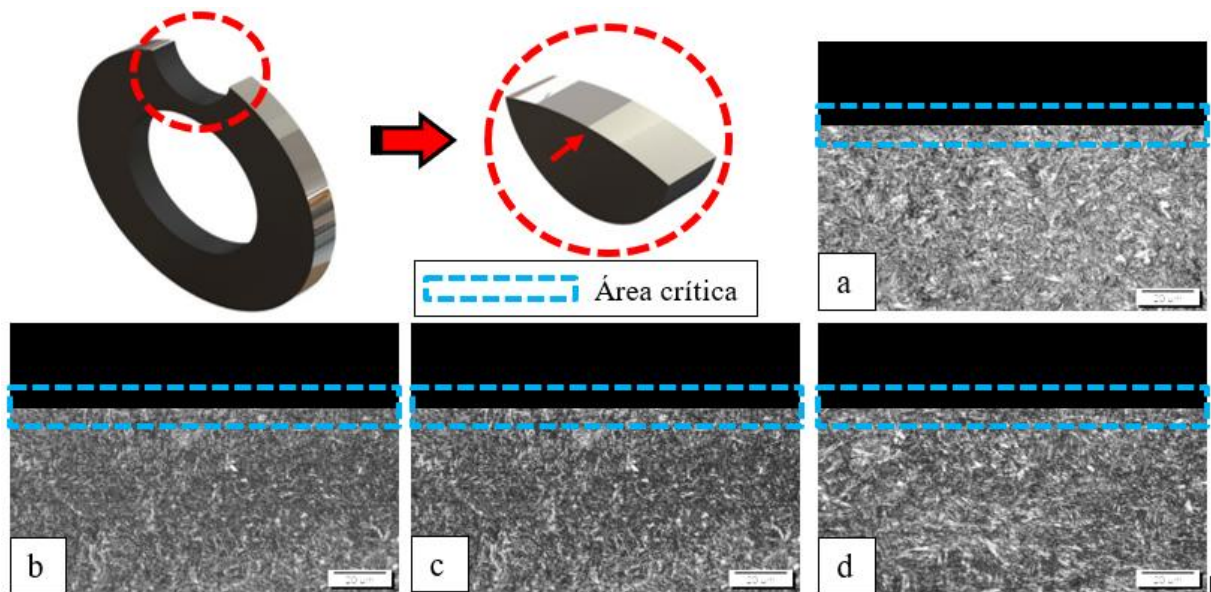


Figura 39. Microestrutura em perfil da superfície retificada a) refrigeração convencional com CBN, b) refrigeração convencional com Al_2O_3 , c) MQL 30ml/h com CBN e d) MQL 30ml/h com Al_2O_3 .

As peças retificadas foram fabricadas de aço ABNT 4340 temperado e revenido, dessa forma, a microestrutura esperada era a martensita revenida. Conforme observado na Figura 39, as imagens apresentam martensita revenida. Observando a região próxima a superfície retificada não há mudanças microestruturais ou danos térmicos ao material. Uma vez que a condição que apresenta menor refrigeração (MQL 30 mL/h) não causou danos térmicos a peça, é possível afirmar que as demais condições de MQL analisadas na pesquisa apresentam refrigeração suficiente para evitar danos térmicos ao material.

4.8 Custo por peça

A Figura 40 apresenta o custo de cada peça utilizando o rebolo de CBN, os dados apresentados foram calculados com base nas Equações (9), (10), (11) e (12) utilizando os resultados dos ensaios. O menor custo por peça foi apresentado pela condição MQL 120 mL/h com limpeza, custo 79% menor comparado com o custo da peça utilizando a refrigeração convencional. O sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo reduziu em média 46% do custo em comparação a técnica de MQL tradicional, demonstrando que a utilização do sistema de limpeza reduz o custo do processo e melhora a qualidade das peças.

Observando a Figura 40, os custos com fluido de corte representam a maior parcela de custo na refrigeração convencional. Já a aplicação de MQL reduz drasticamente os custos de aquisição e descarte de fluido de corte. No entanto, a utilização de MQL aumenta o desgaste do

rebolo. Dessa forma, a parcela de custo referente ao rebolo se eleva, pois no caso do CBN a ferramenta apresenta um alto custo de aquisição.

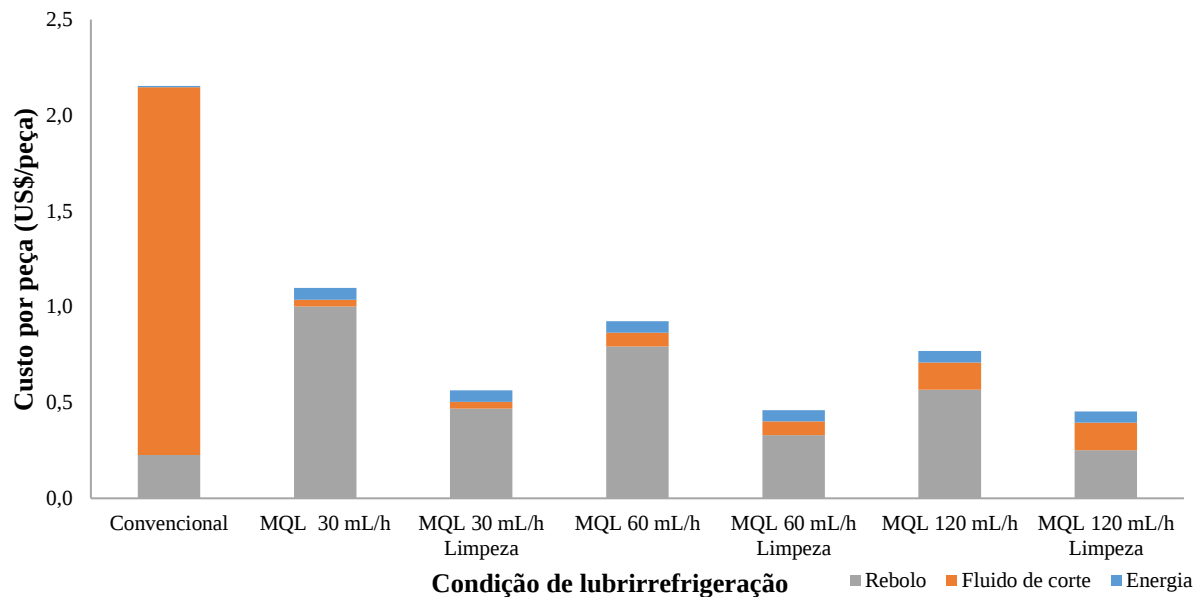


Figura 40. Custo por peça utilizando o rebolo de CBN para cada métodos de lubrificação avaliados.

A Figura 41 apresenta os custos por peça obtidos por meio da aplicação das equações (9), (10), (11) e (12) utilizando os resultados do rebolo de Al_2O_3 nos diferentes métodos de lubrificação avaliados. Observa-se na Figura 41 que a aplicação da técnica de MQL reduziu drasticamente o custo por peça. A condição MQL 30 mL/h com limpeza apresentou redução de 94% no custo em relação a refrigeração convencional. A utilização do sistema de limpeza apresentou, em média, uma redução de 16% no custo em relação a técnica tradicional de MQL.

No caso do rebolo de Al_2O_3 , a parcela de custo referente ao desgaste da ferramenta é mínima em relação ao rebolo de CBN, pois o custo de aquisição do rebolo convencional é significativamente menor em relação ao rebolo superabrasivo. No caso do rebolo de Al_2O_3 , custo referente ao fluido de corte é o mais significativo. Dessa forma, a utilização do MQL reduz drasticamente os custos do processo e o aumento da vazão de fluido no MQL faz com que os custos do processo aumentem, mesmo que o desgaste do rebolo seja menor.

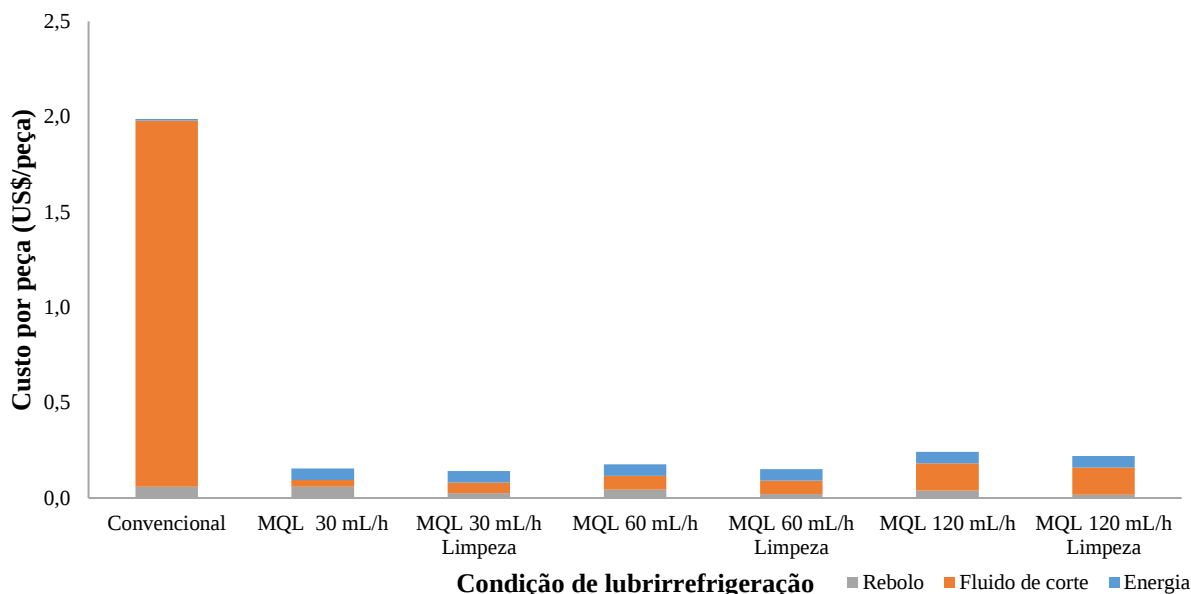


Figura 41. Custo por peça utilizando o rebolo de Al_2O_3 para cada métodos de lubrificação e refrigeração avaliados.

A Figura 42 apresenta os custos por peça de todas as condições avaliadas no presente estudo. Na condição MQL 30 mL/h foi observada a maior diferença de custo por peça comparando os rebolos, o rebolo de Al_2O_3 apresentou um custo por peça 85% menor que o custo por peça do rebolo de CBN. Em média, nas condições de MQL, o rebolo de Al_2O_3 apresentou um custo por peça 72% menor que o rebolo de CBN. E, no caso da refrigeração convencional, essa diferença foi de 7%. Observa-se que, em termos de custo, o processo com rebolo de Al_2O_3 é mais barato em relação ao rebolo de CBN. Além disso, a utilização da técnica de MQL apresenta redução de custos em relação a refrigeração convencional, o que é interessante para sua aplicação nas indústrias.

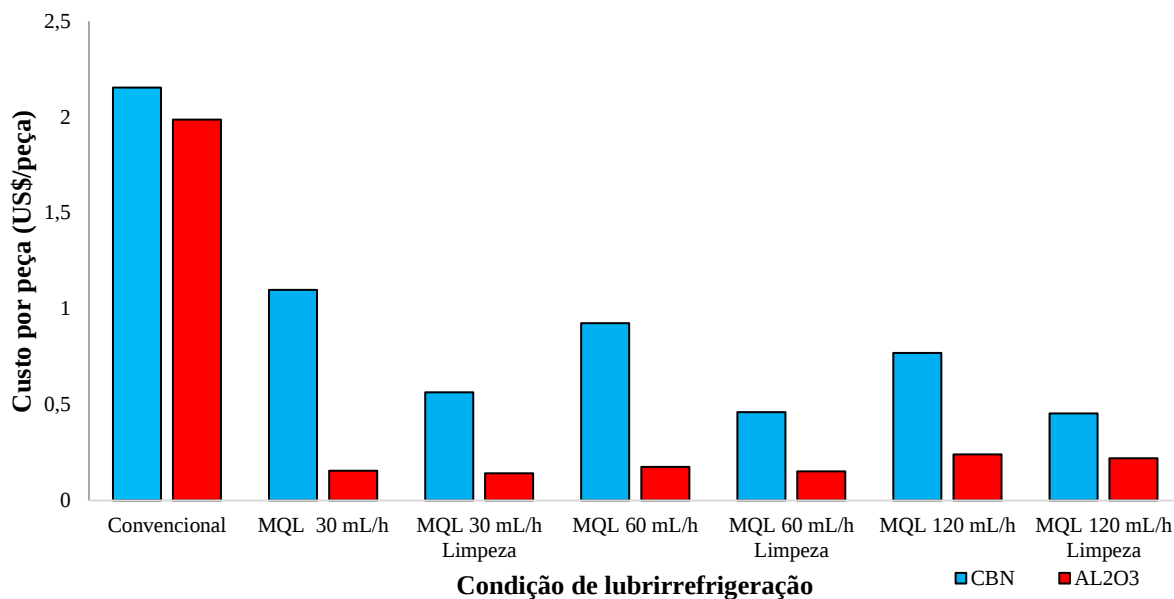


Figura 42. Custo por peça para cada condição avaliada.

4.9 Emissão de carbono

As Figura 43 e Figura 44 apresentam os resultados de emissão de carbono calculados com base nas equações (13), (14) e (15) para os rebolos de CBN e Al_2O_3 respectivamente. A técnica de MQL reduziu a emissão de carbono em 35% no caso do rebole de CBN e 34% no caso do rebole de Al_2O_3 em comparação a refrigeração convencional.

No caso da refrigeração convencional, o fluido de corte foi responsável pela maior parte da emissão de carbono, visto que nessa condição a quantidade de fluido de corte utilizada é alta. Com a utilização da técnica de MQL e sistema de limpeza a energia utilizada foi responsável pela maior parte da emissão de carbono.

O aumento da vazão de fluido na técnica de MQL de 30 mL/h para 120 mL/h aumentou em 9% a emissão de carbono. A utilização do sistema de limpeza da superfície de corte do rebole não apresentou variação significativa na emissão de carbono. Além disso, não houve variação na emissão de carbono comparando o rebole de CBN e Al_2O_3 .

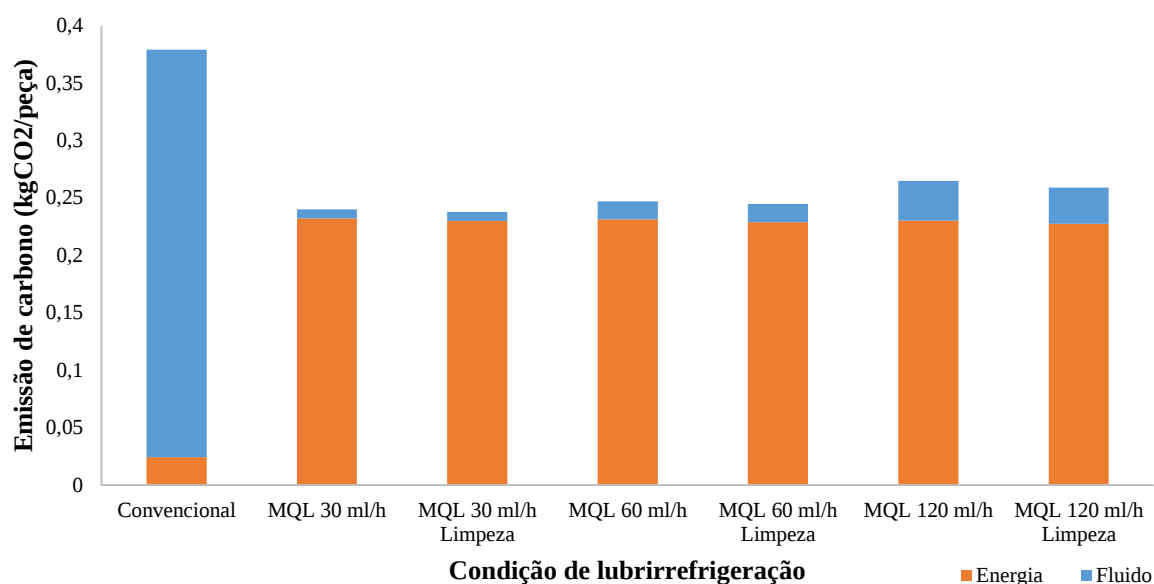


Figura 43. Emissão de carbono por peça utilizando o rebolo de CBN nos diferentes métodos de lubrificação.

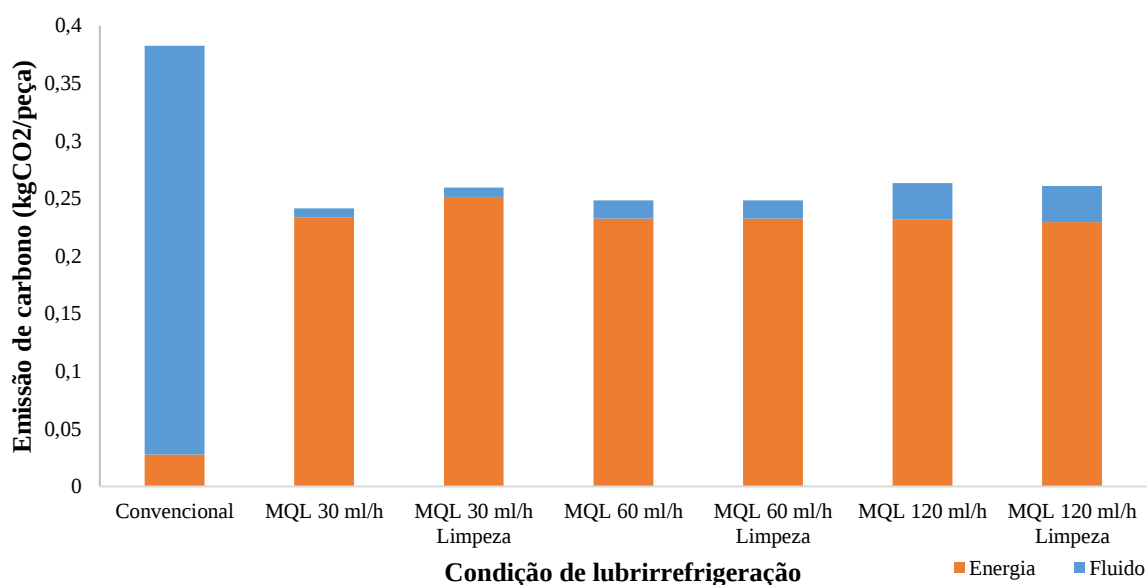


Figura 44. Emissão de carbono por peça utilizando o rebolo de Al₂O₃ nos diferentes métodos de lubrificação.

A utilização da técnica de MQL reduziu significativamente a emissão de carbono por peça, minimizando a degradação do meio ambiente, reduzindo os impactos a saúde humana. A redução de 35% da emissão de carbono ao se utilizar a técnica de MQL, demonstra que a técnica de MQL contribui para que a usinagem se torne mais sustentável.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pela retificação do aço ABNT 4340 temperado e revenido com rebolo de CBN e Al_2O_3 sob diferentes condições de lubrificação, as seguintes conclusões são apresentadas:

- O rebolo de CBN apresentou peças com melhores rugosidade superficial (27% menor) e erro de circularidade (9% menor) em relação às peças usinadas com rebolo de Al_2O_3 , de forma a possibilitar melhor acabamento superficial e precisão geométrica e dimensional.
- O desgaste diametral do rebolo, potência e emissão acústica apresentados pelo rebolo de CBN foram menores que os apresentados pelo rebolo Al_2O_3 .
- O custo por peça apresentado pelo rebolo de Al_2O_3 foi em média 72% menor em relação ao custo apresentado pelo rebolo de CBN.
- O aumento da vazão de fluido de corte na técnica de MQL melhorou os resultados do processo. A maior vazão avaliada (120 mL/h) apresentou os menores valores de rugosidade superficial, erro de circularidade, desgaste diametral do rebolo, emissão acústica e potência de retificação entre as condições de MQL avaliadas. A condição de MQL com maior vazão de fluido de corte reduziu o custo por peça em 46%, no caso do rebolo de CBN, e 86%, no caso do rebolo de Al_2O_3 , em comparação aos custos apresentados pela refrigeração convencional.
- O sistema de limpeza foi eficiente em reduzir o fenômeno de empastamento, melhorando os resultados de rugosidade superficial e erro de circularidade em todas as condições que foi utilizado. Além disso, o sistema de limpeza reduziu o desgaste diametral do rebolo e a potência de retificação, de forma a reduzir os custos do processo.
- A emissão de carbono foi reduzida em 35% com a substituição da refrigeração convencional pela técnica de MQL, demonstrando que a técnica de MQL reduz os impactos ambientais e sociais e minimiza a emissão de gases que contribuem para o efeito estufa.

6. PRODUÇÕES CIENTÍFICAS

Nesta seção são apresentados os artigos relacionados ao tema desta pesquisa, produzidos durante o período matriculado como aluno regular do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Bauru.

DE SOUZA, H. A.; LUIZETE, C. E.; SATO, B. K.; RODRIGUEZ, R. L.; GARCIA, M. V.; JAVARONI, R. L.; RIBEIRO, F. S. F.; LOPES, J. C.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; BIANCHI, E. C. Advances in the interrupted surface manufacturing by applying different lubrication techniques in the grinding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 121, n. 7, p. 5387–5399, 2022.

LOPES, J. C.; RIBEIRO, F. S. F.; LINKEVICIUS, S. A. S.; DE SOUZA RODRIGUES, M.; DE SOUZA, R. R.; SATO, B. K.; DE MORAES, D. L.; GARCIA, M. V.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; BIANCHI, E. C. Manufacturing process linked to the MQL compared to flood lubrication applied to the grinding of VP50IM steel using black silicon carbide wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 120, n. 5, p. 4179–4190, 2022.

SATO, B. K.; LOPES, J. C.; RIBEIRO, F. S. F.; RODRIGUEZ, R. L.; DOMINGUES, B. B.; DE SOUZA, H. A.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; BIANCHI, E. C. Evaluating the effect of MQL technique in grinding VP50IM steel with green carbide wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 121, n. 11, p. 7287–7294, 2022.

SATO, B. K.; LOPES, J. C.; RODRIGUEZ, R. L.; GARCIA, M. V.; MIA, M.; RIBEIRO, F. S. F.; SANCHEZ, L. E. D. A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Novel comparison concept between CBN and Al₂O₃ grinding process for eco-friendly production. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 330, p. 129673, 2022.

TALON, A. G.; SATO, B. K.; RODRIGUES, M. de S.; ÁVILA, B. N.; CUESTA, J. L.; RIBEIRO, F. S. F.; RODRIGUES, A. R.; SANCHEZ, L. E. de A.; BIANCHI, E. C.; LOPES, J. C. Green manufacturing concept applied to the grinding process of advanced ceramics using

an alternative lubri-refrigeration technique. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 123, n. 7, p. 2771–2782, 2022.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o conhecimento adquirido durante o desenvolvimento da pesquisa segue algumas sugestões de trabalhos futuros para expansão do conhecimento acerca da técnica de MQL.

- Desenvolver metodologia capaz de quantificar a capacidade de lubrificação e refrigeração provida pelo MQL para avaliar facilitar a análise da alteração de parâmetros na técnica;
- Aplicar campo eletromagnético na zona de corte, com o intuito de atrair cavacos e potencializar o efeito refrigerante do fluido de corte;
- Construir simulação computacional capaz de reproduzir a dinâmica entre os componentes envolvidos e entender a fundo todos os impactos que a lubrificação, refrigeração e empastamento do rebolo na retificação;
- Ampliar os parâmetros de saída analisados para maior compreensão da diferença entre os rebolos nas variadas condições de lubrificação-refrigeração. Entre os parâmetros sugeridos estão: difração por raio-x (determinação das tensões residuais), microscopia de força atômica (para verificação do atrito), utilização de dinamômetro (para monitorar a capacidade de lubrificação do processo) e termopares (com o intuito de analisar as temperaturas que o material é submetido).

REFERÊNCIAS

ABELLAN-NEBOT, J. V; ROGERO, M. O. Sustainable machining of molds for tile industry by minimum quantity lubrication. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 240, p. 118082, 2019.

ALAGUMURTHI, N.; PALANIRADJA, K.; SOUNDARARAJAN, V. Heat generation and heat transfer in cylindrical grinding process -a numerical study. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 34, n. 5, p. 474–482, 2007.

AWALE, A. S.; VASHISTA, M.; KHAN YUSUFZAI, M. Z. Multi-objective optimization of MQL mist parameters for eco-friendly grinding. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 56, p. 75–86, 2020.

BELENTANI, R. de M.; FUNES JÚNIOR, H.; CANARIM, R. C.; DINIZ, A. E.; HASSUI, A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel. **Materials Research**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 88–96, 2013.

BENEDICTO, E.; CAROU, D.; RUBIO, E. M. Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems Used in Machining Processes. In: **PROCEDIA ENGINEERING 2017, Anais...** [s.l: s.n.]

BIANCHI, E. C.; RODRIGUEZ, R. L.; HILDEBRANDT, R. A.; LOPES, J. C.; DE MELLO, H. J.; DA SILVA, R. B.; DE AGUIAR, P. R. Plunge cylindrical grinding with the minimum quantity lubrication coolant technique assisted with wheel cleaning system. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 95, n. 5–8, p. 2907–2916, 2018. a.

BIANCHI, E. C.; RODRIGUEZ, R. L.; HILDEBRANDT, R. A.; LOPES, J. C.; DE MELLO, H. J.; DE AGUIAR, P. R.; DA SILVA, R. B.; JACKSON, M. J. Application of the auxiliary wheel cleaning jet in the plunge cylindrical grinding with Minimum Quantity Lubrication technique under various flow rates. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], v. 233, n. 4, p. 1144–1156, mai. 2018.

b.

BIANCHI, E. C.; RODRIGUEZ, R. L.; HILDEBRANDT, R. A.; LOPES, J. C.; DE MELLO, H. J.; DE AGUIAR, P. R.; DA SILVA, R. B.; JACKSON, M. J. Application of the auxiliary wheel cleaning jet in the plunge cylindrical grinding with Minimum Quantity Lubrication technique under various flow rates. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], v. 233, n. 4, p. 1144–1156, 2019.

BIANCHI, E. C.; SATO, B. K.; SALES, A. R.; LOPES, J. C.; DE MELLO, H. J.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; DINIZ, A. E.; AGUIAR, P. R. Evaluating the effect of the compressed air wheel cleaning in grinding the AISI 4340 steel with CBN and MQL with water. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 95, n. 5–8, p. 2855–2864, 2018.

c.

BRINKSMEIER, E.; MEYER, D.; HUESMANN-CORDES, A. G.; HERRMANN, C. Metalworking fluids - Mechanisms and performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 605–628, 2015.

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

CHETAN; GHOSH, S.; VENKATESWARA RAO, P. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 100, p. 17–34, ago. 2015.

DA SILVA, A. E.; LOPES, J. C.; DANIEL, D. M.; DE MORAES, D. L.; GARCIA, M. V.; RIBEIRO, F. S. F.; DE MELLO, H. J.; SANCHEZ, L. E. D. A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. 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**, [s. l.], p. 1–15, abr. 2020.

DA SILVA, L. R.; BIANCHI, E. C.; FUSSE, R. Y.; CATAI, R. E.; FRANÇA, T. V.; AGUIAR,

P. R. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant—MQL in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 47, n. 2, p. 412–418, 2007.

DANIEL, D. M.; ÁVILA, B. N.; GARCIA, M. V.; LOPES, J. C.; RIBEIRO, F. S. F.; DE MELLO, H. J.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Grinding comparative between ductile iron and austempered ductile iron under CBN wheel combined to abrasive grains with high and low friability. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], 2020.

DAVIM, J. P. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. [s.l.] : Springer Science & Business Media, 2008.

DE MARTINI FERNANDES, L.; LOPES, J. C.; RIBEIRO, F. S. F.; GALLO, R.; RAZUK, H. C.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; DE AGUIAR, P. R.; DE MELLO, H. J.; BIANCHI, E. C. Thermal model for surface grinding application. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 104, n. 5, p. 2783–2793, 2019.

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

DE MORAES, D. L.; GARCIA, M. V.; LOPES, J. C.; RIBEIRO, F. S. F.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; FOSCHINI, C. R.; DE MELLO, H. J.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Performance of SAE 52100 steel grinding using MQL technique with pure and diluted oil. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 105, n. 10, p. 4211–4223, 2019.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. **Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review**, 2014.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in turning process using Taguchi method. **Measurement**, [s. l.], v. 78, p. 111–119, jan. 2016.

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

DENG, H.; XU, Z. Dressing methods of superabrasive grinding wheels: A review. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 45, p. 46–69, 2019.

DING, Z.; JIANG, X.; GUO, M.; LIANG, S. Y. Investigation of the grinding temperature and energy partition during cylindrical grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 97, n. 5–8, p. 1767–1778, 2018.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. [s.l.] : ARTLIBER EDITORA LTDA, 2014.

DOTTO, F. R. L.; AGUIAR, P. R.; ALEXANDRE, F. A.; SIMÕES, L.; LOPES, W. N.; D'ADDONA, D. M.; BIANCHI, E. C. Acoustic image-based damage identification of oxide aluminum grinding wheel during the dressing operation. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 79, p. 298–302, 2019.

DUFLOU, J. R.; SUTHERLAND, J. W.; DORNFELD, D.; HERRMANN, C.; JESWIET, J.; KARA, S.; HAUSCHILD, M.; KELLENS, K. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 61, n. 2, p. 587–609, jan. 2012.

ELANCHEZHIAN, J.; PRADEEP KUMAR, M.; MANIMARAN, G. Grinding titanium Ti-6Al-4V alloy with electroplated cubic boron nitride wheel under cryogenic cooling. **Journal of Mechanical Science and Technology**, [s. l.], v. 29, n. 11, p. 4885–4890, 2015.

Electricity prices. 2020.

ENGINEER, F.; GUO, C.; MALKIN, S. Experimental Measurement of Fluid Flow Through the Grinding Zone. **Journal of Engineering for Industry**, [s. l.], v. 114, n. 1, p. 61–66, fev. 1992.

FANG, K.; UHAN, N.; ZHAO, F.; SUTHERLAND, J. W. A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction. In: JOURNAL OF MANUFACTURING SYSTEMS 2011, **Anais...** : Elsevier, out. 2011.

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

FURNESS, R.; STOLL, A.; NORDSTROM, G.; MARTINI, G.; JOHNSON, J.; LOCH, T.; KLOSINSKI, R. Minimum Quantity Lubrication (MQL) Machining for Complex Powertrain Components. In: MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING, PARTS A AND B 2006, **Anais...** : ASME, 2006. Disponível em: <<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1601985>>

GARCIA, M. V.; LOPES, J. C.; DINIZ, A. E.; RODRIGUES, A. R.; VOLPATO, R. S.; SANCHEZ, L. E. de A.; DE MELLO, H. J.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Grinding performance of bearing steel using MQL under different dilutions and wheel cleaning for green manufacture. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 257, p. 120376, jun. 2020.

GE, Y. C.; ZHU, Z.; WANG, D.; MA, Z.; ZHU, D. Study on material removal mechanism of electrochemical deep grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 271, n. March, p. 510–519, 2019.

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

HADAD, M. J.; TAWAKOLI, T.; SADEGHI, M. H.; SADEGHI, B. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of**

Machine Tools and Manufacture, [s. l.], v. 54–55, p. 10–17, 2012.

HAMRAN, N. N. N.; GHANI, J. A.; RAMLI, R.; HARON, C. H. C. A review on recent development of minimum quantity lubrication for sustainable machining. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 268, p. 122165, 2020.

HEINZEL, C.; ANTUSPOV, G. Prevention of wheel clogging in creep feed grinding by efficient tool cleaning. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 61, n. 1, p. 323–326, 2012.

HEINZEL, C.; KIRSCH, B.; MEYER, D.; WEBSTER, J. Interactions of grinding tool and supplied fluid. **CIRP Annals**, [s. l.], 2020.

HEINZEL, C.; KOLKWITZ, B. The Impact of fluid supply on energy efficiency and process performance in grinding. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 68, n. 1, p. 337–340, 2019.

HEINZEL, C.; MEYER, D.; KOLKWITZ, B.; ECKEBRECHT, J. Advanced approach for a demand-oriented fluid supply in grinding. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 64, n. 1, p. 333–336, 2015.

HUANG, X.; REN, Y.; LI, T.; ZHOU, Z.; ZHANG, G. Influence of minimum quantity lubrication parameters on grind-hardening process. **Materials and Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 69–76, 2018.

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

JABBAR, M. A.; HASHIM, Z.; ZAINUDDIN, H.; HAMAT, R. A.; MUNN-SANN, L. Respiratory Health Effects of Metalworking Fluid among Metal Machining Workers : Review Article. **Asia Pacific Environmental and Occupational Health Journal**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 15–19, 2017.

JAVARONI, R. L.; LOPES, J. C.; DINIZ, A. E.; GARCIA, M. V.; RIBEIRO, F. S. F.;

TAVARES, A. B.; TALON, A. G.; SANCHEZ, L. E. de A.; MELLO, H. J. De; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Improvement in the grinding process using the MQL technique with cooled wheel cleaning jet. **Tribology International**, [s. l.], v. 152, p. 106512, 2020. a.

JAVARONI, R. L.; LOPES, J. C.; GARCIA, M. V.; RIBEIRO, F. S. F.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; DE MELLO, H. J.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Grinding hardened steel using MQL associated with cleaning system and cBN wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 107, n. 5, p. 2065–2080, 2020. b.

JAVARONI, R. L.; LOPES, J. C.; RIBEIRO, F. S. F.; GARCIA, M. V.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; DE MELLO, H. J.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Evaluation of a cooled wheel cleaning jet in minimum quantity lubrication grinding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 111, n. 5–6, p. 1303–1317, nov. 2020. c.

JAWAHIR, I. S.; ATTIA, H.; BIERMANN, D.; DUFLOU, J.; KLOCKE, F.; MEYER, D.; NEWMAN, S. T.; PUSAVEC, F.; PUTZ, M.; RECH, J.; SCHULZE, V.; UMBRELLO, D. Cryogenic manufacturing processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 65, n. 2, p. 713–736, 2016.

KAKAÇ, S.; PRAMUANJAROENKIJ, A. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 52, n. 13, p. 3187–3196, 2009.

KAPŁONEK, W.; NADOLNY, K.; ROKOSZ, K.; MARCIANO, J.; MIA, M.; PIMENOV, D. Y.; KULIK, O.; GUPTA, M. K. Internal Cylindrical Grinding Process of INCONEL® Alloy 600 Using Grinding Wheels with Sol–Gel Alumina and a Synthetic Organosilicon Polymer-Based Impregnate. **Micromachines**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 115, jan. 2020.

KHAN, A. M.; JAMIL, M.; MIA, M.; PIMENOV, D. Y.; GASIMYAROV, V. R.; GUPTA, M. K.; HE, N. Multi-Objective Optimization for Grinding of AISI D2 Steel with Al₂O₃ Wheel under MQL. **Materials**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 2269, nov. 2018.

KHATAI, S.; KUMAR, R.; SAHOO, A. K.; PANDA, A.; DAS, D. Metal-oxide based nanofluid application in turning and grinding processes: A comprehensive review. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 26, p. 1707–1713, 2020.

KIRSCH, B. The impact of contact zone flow rate and bulk cooling on the cooling efficiency in grinding applying different nozzle designs and grinding wheel textures. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [s. l.], v. 18, p. 179–187, 2017.

KISHAWY, H. A.; HEGAB, H.; UMER, U.; MOHANY, A. Application of acoustic emissions in machining processes: analysis and critical review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 98, n. 5–8, p. 1391–1407, 2018.

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

KLOCKE, F.; SOO, S. L.; KARPUSCHEWSKI, B.; WEBSTER, J. A.; NOVOVIC, D.; ELFIZY, A.; AXINTE, D. A.; TÖNISSEN, S. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 581–604, jan. 2015.

KUFFA, M.; KUSTER, F.; WEGENER, K. Comparison of lubrication conditions for grinding of mild steel with electroplated cBN wheel. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [s. l.], v. 18, p. 53–59, 2017.

KURAM, E.; OZCELIK, B.; BAYRAMOGLU, M.; DEMIRBAS, E.; SIMSEK, B. T. Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 42, p. 159–166, 2013.

LAL VIRDI, R.; SINGH CHATHA, S.; SINGH, H. Performance Evaluation of Inconel 718 under vegetable oils based nanofluids using Minimum Quantity Lubrication Grinding. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], 2020.

LAVISSE, B.; LEFEBVRE, A.; TORRANCE, A. A.; SINOT, O.; HENRION, E.; LEMARIÉ,

S.; TIDU, A. The effects of the flow rate and speed of lubricoolant jets on heat transfer in the contact zone when grinding a nitrided steel. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 35, p. 233–243, 2018.

LEE, P.-H.; KIM, J. W.; LEE, S. W. Experimental characterization on eco-friendly micro-grinding process of titanium alloy using air flow assisted electrospray lubrication with nanofluid. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 201, p. 452–462, 2018.

LI, X.; LI, Y. Chain-to-chain competition on product sustainability. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 112, n. 1, p. 2058–2065, jan. 2016.

LIN, B.; ZHOU, K.; GUO, J.; LIU, Q. Y.; WANG, W. J. Influence of grinding parameters on surface temperature and burn behaviors of grinding rail. **Tribology International**, [s. l.], v. 122, p. 151–162, 2018.

LINKE, B. A review on properties of abrasive grits and grit selection. **International Journal of Abrasive Technology**, [s. l.], v. 7, p. 46, jan. 2015. a.

LINKE, B. S. Review on Grinding Tool Wear With Regard to Sustainability. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, [s. l.], v. 137, n. 6, set. 2015. b.

LOPES, J. C.; DE MARTINI FERNANDES, L.; GARCIA, M. V.; MORETTI, G. B.; DE MORAES, D. L.; RIBEIRO, F. S. F.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; DE OLIVEIRA, R. F. M.; DE MELLO, H. J.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Performance of austempered ductile iron (ADI) grinding using diluted oil in MQL combined with wheel cleaning jet and different CBN grains friability. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 107, n. 3–4, p. 1805–1818, mar. 2020. a.

LOPES, J. C.; FRAGOSO, K. M.; GARCIA, M. V.; RIBEIRO, F. S. F.; FRANCELIN, A. P.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; RODRIGUES, A. R.; DE MELLO, H. J.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Behavior of hardened steel grinding using MQL under cold air and MQL CBN wheel cleaning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 105, n. 10, p. 4373–4387, nov. 2019. a.

LOPES, J. C.; GARCIA, M. V.; VALENTIM, M.; JAVARONI, R. L.; RIBEIRO, F. S. F.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; DE MELLO, H. J.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Grinding performance using variants of the MQL technique: MQL with cooled air and MQL simultaneous to the wheel cleaning jet. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 105, n. 10, p. 4429–4442, 2019. b.

LOPES, J. C.; GARCIA, M. V.; VOLPATO, R. S.; DE MELLO, H. J.; RIBEIRO, F. S. F.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; DE OLIVEIRA ROCHA, K.; NETO, L. D.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Application of MQL technique using TiO₂ nanoparticles compared to MQL simultaneous to the grinding wheel cleaning jet. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 106, n. 5–6, p. 2205–2218, jan. 2020. b.

LOPES, J. C.; RIBEIRO, F. S. F.; JAVARONI, R. L.; GARCIA, M. V.; VENTURA, C. E. H.; SCALON, V. L.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; DE MELLO, H. J.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Mechanical and thermal effects of abrasive cut-off applied in low and medium carbon steels using aluminum oxide cutting disc. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], jul. 2020. c.

MACEROL, N.; FRANCA, L. F. P.; KRAJNIK, P. Effect of the grit shape on the performance of vitrified-bonded CBN grinding wheel. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 277, p. 116453, 2020.

MAJUMDAR, S.; KUMAR, S.; ROY, D.; CHAKRABORTY, S.; DAS, S. Improvement of lubrication and cooling in grinding. **Materials and Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 33, n. 13, p. 1459–1465, out. 2018.

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

MANDAL, B.; SINGH, R.; DAS, S.; BANERJEE, S. Improving grinding performance by controlling air flow around a grinding wheel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 51, n. 9, p. 670–676, 2011.

MANIMARAN, G.; PRADEEP KUMAR, M.; VENKATASAMY, R. Influence of cryogenic cooling on surface grinding of stainless steel 316. **Cryogenics**, [s. l.], v. 59, p. 76–83, 2014.

MAO, C.; ZOU, H.; HUANG, X.; ZHANG, J.; ZHOU, Z. The influence of spraying parameters on grinding performance for nanofluid minimum quantity lubrication. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 64, n. 9, p. 1791–1799, 2013.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. 1. ed. New York: CRC Press, 2007.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W. B.; DIMITROV, B.; OHMORI, H. **Tribology of Abrasive Machining Processes**. [s.l: s.n.].

MATTHEW, S. Metal working fluids: finding green in the manufacturing process. **Industrial Lubrication and Tribology**, [s. l.], v. 61, n. 2, p. 60–66, jan. 2009.

MIA, M.; SINGH, G. R.; GUPTA, M. K.; SHARMA, V. S. Influence of Ranque-Hilsch vortex tube and nitrogen gas assisted MQL in precision turning of Al 6061-T6. **Precision Engineering**, [s. l.], v. 53, p. 289–299, jul. 2018.

MORAES, D.; GARCIA, M.; LOPES, J. C.; FONTEQUE RIBEIRO, F.; SANCHEZ, L.; FOSCHINI, C.; MELLO, H.; AGUIAR, P.; CARLOS, B. Performance of SAE 52100 steel grinding using MQL technique with pure and diluted oil. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 105, dez. 2019.

MORETTI, G. B.; DE MORAES, D. L.; GARCIA, M. V.; LOPES, J. C.; RIBEIRO, F. S. F.; FOSCHINI, C. R.; DE MELLO, H. J.; SANCHEZ, L. E. D. A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Grinding behavior of austempered ductile iron: a study about the effect of pure and diluted MQL technique applying different friability wheels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 108, n. 11–12, p. 3661–3673, jun. 2020.

MORGAN, M. N.; JACKSON, A. R.; WU, H.; BAINES-JONES, V.; BATAKO, A.; ROWE,

W. B. Optimisation of fluid application in grinding. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 363–366, 2008.

NADOLNY, K.; KIERAŚ, S. New approach for cooling and lubrication in dry machining on the example of internal cylindrical grinding of bearing rings. **Sustainable Materials and Technologies**, [s. l.], v. 24, p. e00166, 2020.

OLIVEIRA, D. de J.; GUERMANDI, L. G.; BIANCHI, E. C.; DINIZ, A. E.; DE AGUIAR, P. R.; CANARIM, R. C. Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 212, n. 12, p. 2559–2568, 2012. a.

OLIVEIRA, D. de J.; GUERMANDI, L. G.; BIANCHI, E. C.; DINIZ, A. E.; DE AGUIAR, P. R.; CANARIM, R. C. Improving minimum quantity lubrication1. Oliveira D de J, Guermendi LG, Bianchi EC, et al (2012) Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning. *J Mater Process Technol* 212:2559–2568. <https://doi.org/https://doi>. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 212, n. 12, p. 2559–2568, 2012. b.

OLIVEIRA, J. F. G.; SILVA, E. J.; GUO, C.; HASHIMOTO, F. Industrial challenges in grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 2, p. 663–680, 2009.

PAKNEJAD, M.; ABDULLAH, A.; AZARHOUSHANG, B. **Effects of high power ultrasonic vibration on temperature distribution of workpiece in dry creep feed up grinding**, 2017.

PEREIRA, O.; RODRÍGUEZ, A.; FERNÁNDEZ-ABIA, A. I.; BARREIRO, J.; LÓPEZ DE LACALLE, L. N. Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 139, p. 440–449, 2016.

PUSAVEC, F.; KRAMAR, D.; KRAJNIK, P.; KOPAC, J. Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 18, n. 12, p. 1211–1221, ago. 2010.

REDDY, P. P.; GHOSH, A. Effect of Cryogenic Cooling on Spindle Power and G-ratio in Grinding of Hardened Bearing Steel. **Procedia Materials Science**, [s. l.], v. 5, p. 2622–2628, 2014.

REN, Y. H.; ZHANG, B.; ZHOU, Z. X. Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 299–302, 2009.

RIBEIRO, F. S. F.; LOPES, J. C.; GARCIA, M. V.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; DE MELLO, H. J.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. 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**, [s. l.], p. 1–12, abr. 2020. a.

RIBEIRO, F. S. F.; LOPES, J. C.; GARCIA, M. V.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; DE MELLO, H. J.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Grinding assessment of workpieces with different interrupted geometries using aluminum oxide wheel with vitrified bond. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 108, n. 3, p. 931–941, mai. 2020. b.

RIBEIRO, F. S. F.; LOPES, J. C.; GARCIA, M. V.; DE MORAES, D. L.; DA SILVA, A. E.; DE ANGELO SANCHEZ, L. E.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. 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**, [s. l.], v. 109, n. 3–4, p. 905–917, jul. 2020. c.

RIBEIRO, F. S. F.; LOPES, J. C.; TALON, A. G.; GARCIA, M. V.; DE MELLO, H. J.; SANCHEZ, L. E. D. A.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Comparative analysis between resinoid and vitrified bond grinding wheel under interrupted cutting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 109, n. 1–2, p. 75–85, jul. 2020. d.

RODRIGUEZ, R. L.; LOPES, J. C.; GARCIA, M. V.; FONTEQUE RIBEIRO, F. S.; DINIZ, A. E.; EDUARDO DE ÂNGELO SANCHEZ, L.; JOSÉ DE MELLO, H.; ROBERTO DE

AGUIAR, P.; BIANCHI, E. C. Application of hybrid eco-friendly MQL+W CJ technique in AISI 4340 steel grinding for cleaner and greener production. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 283, p. 124670, 2021.

RODRIGUEZ, R. L.; LOPES, J. C.; GARCIA, M. V.; TARRENTO, G. E.; RODRIGUES, A. R.; DE ÂNGELO SANCHEZ, L. E.; DE MELLO, H. J.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Grinding process applied to workpieces with different geometries interrupted using CBN wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 107, n. 3–4, p. 1265–1275, mar. 2020.

RODRIGUEZ, R. L.; LOPES, J. C.; HILDEBRANDT, R. A.; PEREZ, R. R. V.; DINIZ, A. E.; DE ÂNGELO SANCHEZ, L. E.; RODRIGUES, A. R.; DE MELLO, H. J.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 271, n. October 2018, p. 357–367, 2019. a.

RODRIGUEZ, R. L.; LOPES, J. C.; HILDEBRANDT, R. A.; PEREZ, R. R. V.; DINIZ, A. E.; DE ÂNGELO SANCHEZ, L. E.; RODRIGUES, A. R.; DE MELLO, H. J.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 271, p. 357–367, 2019. b.

RODRIGUEZ, R. L.; LOPES, J. C.; MANCINI, S. D.; DE ÂNGELO SANCHEZ, L. E.; DE ALMEIDA VARASQUIM, F. M. F.; VOLPATO, R. S.; DE MELLO, H. J.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Contribution for minimization the usage of cutting fluids in CFRP grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 103, n. 1–4, p. 487–497, jul. 2019. c.

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**. [s.l.] : Elsevier, 2014.

SADEGHI, M. H.; HADAD, M. J.; TAWAKOLI, T.; VESALI, A.; EMAMI, M. An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique. **International Journal of Material Forming**, [s. l.], v. 3, n. 4, p.

241–251, dez. 2010.

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

SAID, Z.; GUPTA, M.; HEGAB, H.; ARORA, N.; KHAN, A. M.; JAMIL, M.; BELLOS, E. A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 105, n. 5–6, p. 2057–2086, 2019.

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

SATO, B. K.; LOPES, J. C.; DINIZ, A. E.; RODRIGUES, A. R.; DE MELLO, H. J.; SANCHEZ, L. E. A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Toward sustainable grinding using minimum quantity lubrication technique with diluted oil and simultaneous wheel cleaning. **Tribology International**, [s. l.], v. 147, p. 106276, 2020.

SATO, B. K.; RODRIGUEZ, R. L.; TALON, A. G.; LOPES, J. C.; MELLO, H. J.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Grinding performance of AISI D6 steel using CBN wheel vitrified and resinoid bonded. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 105, n. 5–6, p. 2167–2182, dez. 2019.

SCHWARZ, M.; DADO, M.; HNILICA, R.; VEVERKOVÁ, D. Environmental and health aspects of metalworking fluid use. **Polish Journal of Environmental Studies**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 37–45, 2015.

SETTI, D.; SINHA, M. K.; GHOSH, S.; VENKATESWARA RAO, P. Performance evaluation of Ti–6Al–4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 88, p. 237–248, 2015.

SHARMA, A. K.; TIWARI, A. K.; DIXIT, A. R. **Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review**, 2016.

SHEN, J. Y.; WANG, J. Q.; JIANG, B.; XU, X. P. Study on wear of diamond wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding ceramic. **Wear**, [s. l.], v. 332–333, p. 788–793, 2015.

SHOKOOHI, Y.; KHOSROJERDI, E.; RASSOLIAN SHIADHI, B. H. **Machining and ecological effects of a new developed cutting fluid in combination with different cooling techniques on turning operation**, 2015.

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 57, p. 83–101, 2012.

SILVA, L. R.; CORRÊA, E. C. S.; BRANDÃO, J. R.; DE ÁVILA, R. F. Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], jan. 2013.

SINGH, A. K.; KUMAR, A.; SHARMA, V.; KALA, P. Sustainable techniques in grinding: State of the art review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 269, p. 121876, 2020.

SINGH, G.; AGGARWAL, V.; SINGH, S. Critical review on ecological, economical and technological aspects of minimum quantity lubrication towards sustainable machining. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], p. 122185, 2020.

SINHA, M. K.; MADARKAR, R.; GHOSH, S.; RAO, P. V. Application of eco-friendly nanofluids during grinding of Inconel 718 through small quantity lubrication. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 141, p. 1359–1375, 2017.

SINHA, M. K.; SETTI, D.; GHOSH, S.; VENKATESWARA RAO, P. An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 21, p. 124–133, 2016.

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

SUN, Z.; LI, L. Potential capability estimation for real time electricity demand response of sustainable manufacturing systems using Markov Decision Process. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 65, p. 184–193, fev. 2014.

TALON, A. G.; DE SOUZA RODRIGUES, M.; GARCIA, M. V.; LOPES, J. C.; RIBEIRO, F. S. F.; DE MELLO, H. J.; SANCHEZ, L. E. D. A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Comparative evaluation of CBN wheels with abrasive grains of different friability applied to steel and ductile iron grinding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], jan. 2021.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M. H. Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 50, n. 6, p. 521–531, jun. 2010.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M. H.; DANESHI, A.; STÖCKERT, S.; RASIFARD, A. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 49, n. 12, p. 924–932, 2009.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.; SADEGHI, M. H.; DANESHI, A.; SADEGHI, B. Minimum quantity lubrication in grinding: Effects of abrasive and coolant-lubricant types. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 19, n. 17–18, p. 2088–2099, nov. 2011.

TUNC, L. T.; GU, Y.; BURKE, M. G. Effects of Minimal Quantity Lubrication (MQL) on Surface Integrity in Robotic Milling of Austenitic Stainless Steel. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 45, p. 215–218, 2016.

WANG, Y.; LI, C.; ZHANG, Y.; YANG, M.; ZHANG, X.; ZHANG, N.; DAI, J. Experimental

evaluation on tribological performance of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication grinding with different concentrations of Al₂O₃ nanofluids. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 142, p. 3571–3583, 2017.

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

WENTORF, R. H. Synthesis of the Cubic Form of Boron Nitride. **The Journal of Chemical Physics**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 809–812, mar. 1961.

WICKRAMASINGHE, K. C.; SASAHARA, H.; RAHIM, E. A.; PERERA, G. I. P. Green Metalworking Fluids for sustainable machining applications: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 257, p. 120552, 2020.

WINTER, M.; IBBOTSON, S.; KARA, S.; HERRMANN, C. Life cycle assessment of cubic boron nitride grinding wheels. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 107, p. 707–721, 2015.

YOSHIDA, T.; KARASAWA, H.; FUKUI, R.; FUJII, K.; WARISAWA, S. Analysis of chip size distribution using image processing technology to estimate wear state of cylindrical grinding wheel. **Tribology International**, [s. l.], v. 153, p. 106600, 2021.

YU, H.; ZHANG, W.; LYU, Y.; WANG, J. Research on grinding forces of a bionic engineered grinding wheel. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 48, p. 185–190, 2019.

YU, X.; HUANG, S.; XU, L. ELID grinding characteristics of SiCp/Al composites. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 86, n. 5, p. 1165–1171, 2016.

YUN, H.; ZOU, B.; WANG, J.; HUANG, C.; XING, H.; SHI, Z.; XUE, K. Design and fabrication of graded cBN tool materials through high temperature high pressure method. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 832, p. 154937, 2020.

ZHANG, W.; ZHANG, P.; ZHANG, J.; FAN, X.; ZHU, M. Probing the effect of abrasive grit size on rail grinding behaviors. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 53, p. 388–395, 2020. a.

ZHANG, Z.; YAO, P.; LI, X.; WANG, J.; HUANG, C.; ZHU, H.; ZOU, B.; LIU, H. Grinding performance and tribological behavior in solid lubricant assisted grinding of glass-ceramics. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 51, p. 31–43, mar. 2020. b.

ZHOU, K.; DING, H.; WANG, R.; YANG, J.; GUO, J.; LIU, Q.; WANG, W. Experimental investigation on material removal mechanism during rail grinding at different forward speeds. **Tribology International**, [s. l.], v. 143, p. 106040, 2020.

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

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 7 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

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.