



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

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

GUILHERME ANTÔNIO CARVALHO

**SUSTENTABILIDADE INDUSTRIAL COMBINADO COM CONCEITOS DE
MITIGAÇÃO DE EFEITO ESTUFA APLICADO AO PROCESSO DE
RETIFICAÇÃO**

BAURU

2023

GUILHERME ANTÔNIO CARVALHO

**SUSTENTABILIDADE INDUSTRIAL COMBINADO COM CONCEITOS DE
MITIGAÇÃO DE EFEITO ESTUFA APLICADO AO PROCESSO DE
RETIFICAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. José Claudio Lopes

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

BAURU

2023

C331s

Carvalho, Guilherme Antônio

Sustentabilidade industrial combinado com conceito de mitigação de efeito estufa aplicado ao processo de retificação / Guilherme Antônio Carvalho. -- Bauru, 2023

90 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: José Claudio Lopes

Coorientador: Eduardo Carlos Bianchi

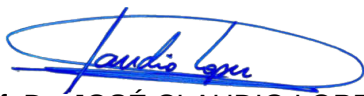
1. Usinagem. 2. Retificação. 3. Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). 4. Cerâmicas Avançadas. 5. Rebolo de Diamante. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

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

Aos 04 dias do mês de agosto do ano de 2023, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de GUILHERME ANTONIO CARVALHO, intitulada **SUSTENTABILIDADE INDUSTRIAL COMBINADO COM CONCEITOS DE MITIGAÇÃO DE EFEITO ESTUFA APLICADO AO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**. 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. GILSON EDUARDO TARRENTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Sistemas de Produção / Faculdade de Tecnologia de Botucatu. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: _ _ _ APROVADO _ _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES

A minha Esposa Ariane, aos meus pais Neusa e Valdomiro e ao meu orientador Cláudio, por sempre terem me incentivado e em geral a todos os professores e funcionários que fizeram que tudo isso se tornasse possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela oportunidade que me foi concedida de estar na Universidade, a minha esposa Ariane que sempre me apoiou muito e me incentivou a galgar a mais esse desafio, aos meus pais e aos Orientadores, principalmente ao Prof. ° Doutor José Cláudio Lopes, que me deu todo o suporte e assistência para conseguir realizar os trabalhos.

Ademais, ficam meus sinceros agradecimentos a todos que de forma direta ou indireta tenham contribuído com esta pesquisa. Gostaria de fazer um agradecimento especial para todos os membros da equipe do L.U.A., principalmente aos pesquisadores, Anthony Gaspar Talon, Guilherme Bressan Moretti Benício Nacif Ávila, Matheus de Souza Rodrigues, Mateus Vinícius Garcia, Fernando Sabino Fontque Ribeiro, Alessandro Roger Rodrigues, que me auxiliaram muito na confecção do artigo.

*“Não tente se tornar uma pessoa de sucesso,
mas tente se tornar uma pessoa de valor”*

(Albert Einstein)

RESUMO

A retificação é um processo de usinagem aplicado em diversas indústrias, aplicada na fabricação de peças que necessitam um excelente acabamento superficial, ou superfícies com alta precisão geométrica. Desse modo, qualquer erro durante a usinagem gera um grande prejuízo, pois invalida os processos anteriores à retificação. Por conta disso, o estudo sobre esse processo, sob diversos cenários, é necessário, a fim de otimiza-lo. Com o avanço da engenharia dos materiais, novos elementos estão sendo usados como matéria-prima na indústria, as cerâmicas é um desses materiais, por conta de sua estabilidade química e térmica, associada a uma alta durabilidade, a sua aplicação em caldeiras e válvulas vem aumentando. Entretanto, essas mesmas qualidades que possibilitam sua utilização, dificultam sua usinagem, principalmente pelas altas temperaturas durante o processo. A fim de reduzir esse problema, novos métodos de lubrificação-refrigeração vem sendo estudados, em conjunto com esses materiais. Nesse trabalho, será estudado o comportamento de peças anelares de óxido de alumínio, retificadas com rebolos de diamante sintético. Para o controle da temperatura, a performance de três métodos de refrigeração será estudada, sendo eles o método com fluido em abundância, mínima quantidade de lubrificação (MQL) e MQL associado com a limpeza do rebolo (WCJ) (MQL+WCJ), aplicado em diferentes angulações (0° , 30° , 60° e 90°). Para avaliar a performance da usinagem, parâmetros como a rugosidade (R_a), desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, razão G, potência de retificação, força tangencial e uma análise dos custos e poluição envolvendo cada aplicação também foram feitos. Ao final, o método convencional de lubrificação *flood* apresentou a melhor performance para o acabamento superficial e desvio de circularidade, entretanto, o método de MQL+WCJ, com um ângulo de 30° apresentou resultados próximos, se mostrando competitivo. As aplicações de MQL apresentaram baixos valores de poluição, quando comparados ao método convencional, sendo assim uma ótima alternativa verde para esse sistema de lubrificação.

Palavras-chave: Retificação. MQL. Cerâmica avançada. WCJ.

ABSTRACT

Grinding is a machining process applied in the manufacture of components that require an excellent surface finish and high geometric and dimensional precision, being applied in the final stages of component manufacturing. Due to its high heat generation, grinding needs adequate lubrication and cooling methods, aiming to meet the demands of the ground component as well as to mitigate the environmental impacts resulting from the application of cutting fluids. Allied with this, the growing demand for new materials, such as advanced ceramics, has become a new challenge for grinding. In addition to being chemically and thermally stable, advanced ceramics are highly resistant to wear, making grinding this type of material difficult. Traditionally, cutting fluids have alkanolamines, nitrosamines, volatile organic compounds, mineral oils, hydrocarbons and heavy metals in their composition. Thus requiring proper disposal to inhibit groundwater and soil contamination, reducing immediate and long-term damage to the planet and society. That said, it is extremely important that scientific and technological advances in machining processes, especially grinding, allow for cleaner machining through techniques that reduce the need to apply large volumes of cutting fluid. In this sense, the minimum quantity lubrication technique (MQL) consists of applying a small amount of oil through a jet of compressed air, achieving results similar to the flood method in many cases. However, the lower cooling capacity of MQL is an obstacle to overcome. Thus, this work analyzed advanced grinding ceramics using a diamond grinding wheel combined with a new technology responsible for cleaning the grinding wheel (WCJ) under four different angles (0° , 30° , 60° and 90°). Surface roughness, roundness error, diametral wear of the grinding wheel, G ratio, grinding power, grinding cost analysis, and pollutant CO₂ emissions involving each application were evaluated. As a result, the flood lubrication method showed the best performance in roughness and surface roundness error values. However, the MQL + WCJ 30° presented similar results about the flooding method, proving competitive for industrial use. Furthermore, MQL applications led to lower CO₂ pollution values than the flood method, making it a great green alternative for the environment.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 REPRESENTAÇÃO DA CINEMÁTICA NA RETIFICAÇÃO.	19
FIGURA 2 RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO, ADAPTADO (MALKIN, 1989).	21
FIGURA 3 TRÊS COMPONENTES DA FORÇA NA RETIFICAÇÃO (ROWE, 2014).	22
FIGURA 4 FORMAÇÃO DE CAVACO POR UM GRÃO ABRASIVO, ADAPTADO (MALKIN, 1989).	24
FIGURA 5 CICLO DE UMA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA (HASSUI E DINIZ, 2003 - MODIFICADO).	25
FIGURA 6 RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO, ADAPTADO (MALKIN, 1989).	26
FIGURA 7 CARACTERÍSTICAS DOS ABRASIVOS.	33
FIGURA 8 INFLUÊNCIA DO GRAU DE RECOBRIMENTO DE DRESSAGEM NA TOPOGRAFIA DO REBOLO (OLIVEIRA, 1988).	43
FIGURA 9 CICLO DE VARIAÇÃO DA POTÊNCIA (ROWE, 2014-MODIFICADO).	54
FIGURA 10 DIMENSÕES DA PEÇA	58
FIGURA 11 MONTAGEM EXPERIMENTAL COM (A) LUBRIRREFRIGERAÇÃO CONVENCIONAL E (B) MQL	59
FIGURA 12 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL PARA DIFERENTES ÂNGULOS DE BICO WCJ, SENDO EM (A) A REPRESENTAÇÃO DE 0°, EM (B) 30°, EM (C) 60° E EM (D) 90° APLICAÇÃO DO BICO.	59
FIGURA 13 METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DO DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO.....	60
FIGURA 14 RUGOSIDADE PARA CADA CONDIÇÃO DE USINAGEM	64
FIGURA 15 ERRO DE CIRCULARIDADE PARA CADA CONDIÇÃO DE USINAGEM.....	66
FIGURA 16 MICROSCOPIA CONFOCAL DAS SUPERFÍCIES RETIFICADAS PELOS DIFERENTES MÉTODOS DE LUBRIFICAÇÃO-REFRIGERAÇÃO APLICADOS, SENDO EM (A) MÉTODO DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO CONVENCIONAL, EM (B) MQL, EM (C) MQL + WCJ 0°, EM (D) MQL + WCJ 30°, EM (E) MQL + WCJ 60° E EM (F) MQL + WCJ 90°.	68
FIGURA 17 DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO PARA CADA CONDIÇÃO DE USINAGEM	69
FIGURA 18 RAZÃO G PARA CADA CONDIÇÃO DE USINAGEM	70
FIGURA 19 POTÊNCIA PARA CADA CONDIÇÃO DE USINAGEM	72
FIGURA 20 POTÊNCIA PARA CADA CONDIÇÃO DE USINAGEM	73
FIGURA 21 CUSTO DO PROCESSO PARA CADA CONDIÇÃO DE USINAGEM	75
FIGURA 22 POLUIÇÃO NO PROCESSO PARA CADA CONDIÇÃO DE USINAGEM.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS

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

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Motivação	17
1.2. Objetivo geral	18
1.3. Objetivos específicos	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1. Processo de retificação	18
2.2. A Cinemática no processo de retificação	19
2.3. Danos térmicos causados pelo processo de retificação	20
2.4.1. Força tangencial de corte	22
2.4.2. Mecanismos de formação de cavaco no processo de retificação	23
2.4.3. Ciclo da retificação externa de mergulho	24
2.5. Parâmetros utilizados no processo de retificação	26
2.5.1. Profundidade de corte (a)	27
2.5.2. Comprimento de contato (Lc)	28
2.5.3. Taxa de remoção de material (Qw)	29
2.5.4. Velocidade de corte (Vs)	30
2.5.5. Velocidade da peça (Vw)	30
2.5.6. Velocidade de mergulho (vf)	31
2.5.7. Espessura equivalente de corte (heq)	31
2.6. Rebolo	32
2.6.1. Dureza do rebolo	32
2.6.2. Estrutura do rebolo	33
2.6.2.1. Abrasivos	34
2.6.2.2. Granulometria	35
2.6.2.3. Friabilidade	35
2.7. Tipos de abrasivos	36
2.7.1. Diamante	37
2.8. Ligantes	38
2.8.1. Resinoide	39
2.9. Dressagem	40
2.10. Fluido de corte	44
2.10.1. Problemas na utilização do fluido de corte durante a retificação	46
2.10.2. Custos dos fluidos de corte	47

2.10.3.	Manutenção e descarte	47
2.10.4.	Mínima quantidade de lubrificante – MQL.....	49
2.11.	Variáveis de saída do processo	50
2.11.1	Rugosidade.....	50
2.11.2.	Relação G	51
2.11.3.	Circularidade	52
2.11.4.	Microscopia confocal	52
2.11.5.	Potência de retificação	53
2.11.6.	Análise de custos e poluição no processo de retificação.....	54
2.12.	Cerâmicas Avançadas	55
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.4.	Rugosidade e desvio de circularidade.....	63
4.5.	Desgaste diametral do rebolo e razão G.....	68
4.6.	Potência de retificação e força tangencial	71
4.7.	Custos e análises de poluição.....	74
5.	CONCLUSÕES	77
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS	80

1. INTRODUÇÃO

O procedimento de retificação é responsável pela eliminação de imperfeições superficiais na peça, as quais podem ter sido originadas de etapas anteriores do processo de fabricação, como torneamento, fresamento ou sinterização (ROWE, 2014a). A remoção do material é alcançada por meio do atrito entre o rebolo e a peça (RODRIGUEZ et al., 2020a). O rebolo, por sua vez, é uma ferramenta composta por grãos abrasivos que são fixados por um aglutinante. Os grãos abrasivos podem ser compostos de óxidos de alumínio, carbetos de silício, nitreto cúbico de boro e diamante, sendo a escolha determinada pela dureza e pela reação química do processo (LOPES et al., 2021, 2022; TALON et al., 2021). Além disso, os grãos abrasivos não possuem uma forma geométrica predefinida (MALKIN; GUO, 2008a).

Os ligantes utilizados podem ser resinóides, vitrificados ou metálicos, sendo a escolha determinada pela aplicação específica (DENKANA et al., 2016). Durante o processo de retificação, as arestas de corte perdem sua eficiência devido ao atrito e ao calor gerados, resultando em uma redução da eficiência de corte, aumento da temperatura e aumento do desgaste do rebolo. Esses fatores podem causar alterações dimensionais e geométricas na peça (JAVARONI et al., 2020; KING; HAHN; DEVEREUX, 2009; RODRIGUEZ et al., 2020a). Além disso, o desgaste do rebolo resulta em um aumento da área de contato, o que leva a um aumento do consumo de energia durante o processo (LOPES et al., 2022; SATO et al., 2022).

Portanto, a friabilidade dos grãos abrasivos e o tipo de ligante desempenham um papel crucial. Com o aumento das forças de usinagem, é necessário que os grãos abrasivos se rompam e sejam liberados, gerando novas arestas de corte e mantendo a potência de usinagem constante (LOPES et al., 2019b).

O processo de retificação é amplamente reconhecido por sua capacidade de proporcionar um excelente acabamento superficial, bem como precisão dimensional e geométrica, tornando-se a escolha preferencial na usinagem de materiais com características específicas, como as cerâmicas avançadas (DA SILVA et al., 2020; JIANG et al., 2013; ROWE, 2014b). Esses materiais possuem propriedades mecânicas notáveis, incluindo resistência ao desgaste, alta resistência à temperatura e resistência à corrosão (DA SILVA et al., 2020). Essas propriedades são resultado da combinação de ligações iônicas e covalentes presentes em sua microestrutura (AYODE OTITOJU et al., 2020).

Comparadas às ligas metálicas especiais, as cerâmicas avançadas têm ganhado destaque no setor aeroespacial devido à sua excelente resistência térmica e baixa densidade, permitindo a fabricação de componentes mais leves e com maior faixa de temperatura de operação (DAMBATTA et al., 2017). No entanto, a retificação de cerâmicas avançadas é um processo complexo, devido à sua extrema dureza e fragilidade, o que dificulta a remoção de material usando grãos abrasivos convencionais. Nesse sentido, é necessário o uso de rebolos diamantados (NAKAI et al., 2015).

O rebolo diamantado é composto por um corpo que possui uma camada de abrasivos em sua superfície (DING et al., 2014). Devido à fragilidade das cerâmicas avançadas, é essencial evitar vibrações excessivas durante o processo de retificação (LOPES et al., 2018b, 2019a). Portanto, os corpos dos rebolos são fabricados com resinas reforçadas com fibras de carbono, o que reduz significativamente seu peso (RODRIGUEZ et al., 2019a). Em seguida, é aplicada uma camada externa ao corpo do rebolo, composta por grãos abrasivos de diamante sintético (ARTINI; MUOLO; PASSERONE, 2012). Geralmente, os rebolos diamantados são fabricados com ligações resinóides ou metálicas, devido à alta aderência dos grãos abrasivos e à resistência ao desgaste abrasivo (TIAN et al., 2019). Essas especificações resultam em um alto investimento de compra, e quando combinadas com técnicas de lubrificação e refrigeração, a retificação representa aproximadamente 70% do custo final de fabricação do produto (LAKHDAR et al., 2021).

Devido ao atrito envolvido, a usinagem por abrasão apresenta altas forças e temperaturas de trabalho (YANG et al., 2019). Além disso, devido à curta fase de deformação elástica e plástica das cerâmicas avançadas, há desafios na formação adequada do cavaco, resultando em um processo que combina cisalhamento e fragmentação do material. Isso pode levar ao surgimento de tensões superficiais e fraturas, o que pode reduzir a resistência à fadiga do produto final (YANG et al., 2019). No entanto, a integridade da superfície do produto pode ser garantida por meio da aplicação adequada de técnicas de lubrificação e refrigeração (YANG et al., 2019).

Nesse contexto, o fluido de corte desempenha um papel crucial, pois ajuda a reduzir a temperatura por meio de trocas térmicas na zona de corte, proporcionando a formação de filmes lubrificantes na interface entre o rebolo e a peça, além de promover a limpeza dos poros do rebolo. Essa ação de limpeza é essencial para expelir os cavacos e evitar o empastamento (JAVARONI et al., 2019). Atualmente, a técnica convencional de lubrificação e refrigeração utiliza uma grande quantidade de fluido de corte, na ordem de

centenas de litros, garantindo assim uma lubrificação, refrigeração e limpeza eficazes (RODRIGUEZ et al., 2019b).

No entanto, quando o fluido entra em contato com o rebolo em altas velocidades, ele forma aerossóis compostos de água e óleo, que podem ser inalados pelos operadores (WANG et al., 2016). Essas partículas de aerossol, com toda a complexidade química dos fluidos de corte, podem desencadear uma série de doenças ocupacionais, como dermatites alérgicas, problemas respiratórios e até mesmo câncer de pulmão e laringe. Estima-se que cerca de 20% a 30% dessas doenças estejam relacionadas à inalação de partículas presentes nos fluidos de corte (WANG et al., 2016).

Além dos riscos para a saúde humana, os fluidos de corte convencionais à base de óleo mineral não biodegradáveis contêm uma variedade de componentes tóxicos que também representam uma ameaça ao meio ambiente (GARCIA et al., 2020). Quando descartados de forma inadequada, esses fluidos podem contaminar a água, o solo e o ar, causando impactos ambientais significativos (CHETAN; GHOSH; VENKATESWARA RAO, 2015).

Portanto, devido à crescente demanda por práticas ecologicamente sustentáveis, órgãos reguladores ambientais têm estabelecido regulamentações rigorosas para o descarte adequado dos fluidos de corte, tornando o processo complexo e oneroso (BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017). Diante dessa exigência ambiental, técnicas alternativas, como a Quantidade Mínima de Lubrificante (MQL), têm ganhado espaço na fabricação mecânica (DE MORAES et al., 2019). Ao contrário da técnica convencional de lubrificação e refrigeração, o MQL utiliza um fluxo controlado de lubrificante de até 200 ml/h, pulverizado em um jato de ar comprimido, direcionado para a zona de corte (ROBERTO et al., 2007). Como resultado, a quantidade de fluido descartado é drasticamente reduzida, assim como o tamanho da névoa gerada pela rotação do rebolo, em comparação com os 60 l/h utilizados na técnica convencional de lubrificação e refrigeração (HADAD, 2015). No entanto, a técnica MQL ainda não é amplamente adotada por muitas empresas devido a algumas barreiras a serem superadas (HADAD; SHARBATI, 2016).

Uma das limitações da técnica MQL é a lubrificação e refrigeração serem realizadas apenas com óleo, resultando em uma perda significativa na capacidade de dissipação de calor na região de corte (WANG et al., 2016). Além disso, o calor específico do óleo é baixo em comparação com a água, o que resulta em cerca de 70% do calor transferido para a peça, em comparação com aproximadamente 36% na técnica

convencional de lubrificação e refrigeração (RODRIGUEZ et al., 2020b; SATO et al., 2021). Um estudo realizado por Lopes et al. (2022) investigou o desempenho da técnica MQL na retificação do aço VP50 e constatou que parâmetros como rugosidade superficial apresentaram variações de 13%, 17% e 16% para as velocidades de avanço de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min, respectivamente, em comparação com a técnica convencional de lubrificação e refrigeração. Apesar do aumento observado, os valores ainda se mantiveram abaixo da rugosidade superficial máxima de 1,6 μm permitida no processo de retificação (MALKIN; GUO, 2008a). No entanto, o mesmo estudo revelou um aumento de 40% no consumo específico de energia ao utilizar a técnica MQL. Considerando que a retificação é uma etapa final do processo de produção, o produto já carrega consigo um custo agregado de toda a cadeia produtiva, o que implica em um valor passivo incorporado (BRUZZONE et al., 2008; DE SOUZA et al., 2021). Portanto, caso o produto não atenda às especificações de projeto após o processo de retificação, esse custo terá que ser incorrido novamente (JAY et al., 2010).

Para abordar esse desafio, Lopes et al. 2019 conduziram um estudo sobre a utilização de um sistema auxiliar chamado *Wheel Cleaning Jet* (WCJ) em conjunto com a técnica de MQL na retificação de um aço duro, AISI 4340 (LOPES J.C et al., 2019). Nesse estudo, o WCJ foi posicionado com um bocal inclinado a 30° em relação ao eixo da ferramenta, e foi comparado ao MQL convencional e ao MQL com ar comprimido resfriado. Os pesquisadores observaram que o WCJ apresentou os melhores resultados em termos de limpeza da ferramenta, reduzindo significativamente o empastamento e proporcionando melhor desempenho nos parâmetros analisados.

Além disso, Lopes et al. 2019 também avaliaram a eficiência do sistema de limpeza do rebolo na retificação de cerâmicas (LOPES J.C et al., 2019). Nesse estudo, o WCJ foi aplicado em diferentes ângulos e comparado ao MQL convencional e ao método de lubrificação com fluido em abundância. Todos os testes foram realizados com a mesma taxa de avanço de 0,5 mm/min. Os resultados indicaram uma predominância do método convencional, porém o MQL em conjunto com o WCJ mostrou-se uma alternativa viável e ecologicamente sustentável.

No entanto, ainda existem lacunas a serem preenchidas no que diz respeito à retificação de cerâmicas utilizando abordagens sustentáveis. Devido à natureza das ferramentas de retificação, que possuem geometria não definida, ainda há muito a ser explorado e experimentado em relação às relações entre os sistemas de lubrificação alternativos e os parâmetros do processo de usinagem, como a taxa de avanço.

Portanto, é necessário realizar mais estudos para aprimorar o conhecimento sobre o uso de alternativas sustentáveis na retificação de cerâmicas. Essas pesquisas contribuirão para o desenvolvimento de técnicas mais eficientes e ambientalmente amigáveis, visando alcançar um equilíbrio entre a qualidade do processo e a sustentabilidade.

1.1. Motivação

As propriedades mecânicas complexas das cerâmicas avançadas tornam a retificação um processo dispendioso e desafiador. É crucial empregar técnicas de lubrificação e refrigeração para reduzir efeitos térmicos prejudiciais, distorções dimensionais, desgaste do rebolo e imperfeições na peça. Embora a abordagem tradicional de lubrificação e refrigeração seja comum, ela traz impactos ambientais e riscos à saúde devido a agentes químicos.

Uma alternativa é a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), que pulveriza um fluido sob pressão diretamente na zona de corte, ampliando a eficiência do processo. Contudo, o MQL tem desvantagens na dissipação térmica comparado ao método convencional, exigindo sistemas adicionais. Para superar tais limitações, foi desenvolvida uma versão aprimorada da técnica de MQL. Apesar de ter mostrado promessa em torneamento e fresamento, ainda demanda desenvolvimento para processos de alta temperatura como retificação. Além disso, sua natureza sustentável, com uso mínimo de fluido e impacto ambiental reduzido, é notável.

Entretanto, o MQL pode resultar em empastamento, onde o fluido não dissipa calor suficientemente, formando camadas de cavacos aglomerados. Isso distorce a peça, aumenta a potência necessária e torna o método inviável para muitas aplicações. Para combater esse problema, um sistema de limpeza chamado *Wheel Cleaning Jet* (WCJ) emprega ar comprimido para remover cavacos e reduzir a temperatura do rebolo.

A criação de tecnologias sustentáveis, especialmente em combinação com materiais de alto interesse comercial e escassa pesquisa, necessita testes. Portanto, estudos são cruciais para avaliar as diferenças entre retificação de cerâmicas avançadas com MQL em comparação ao método convencional em termos dimensionais, econômicos e ambientais. Essas pesquisas impulsionarão abordagens mais sustentáveis e eficazes para o processo de retificação desses materiais.

1.2 Objetivo geral

Avaliar o desempenho da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) + (WCJ) em diferentes ângulos de aplicação de ar comprimido na retificação cilíndrica de Alumina com rebolo de diamante.

1.3 Objetivos específicos

- Analisar o desempenho entre três técnicas de lubrificação no processo de retificação de alumina;
- Averiguar a influência dos diferentes ângulos na lubrificação (MQL+WCJ) e o quanto isso impacta na qualidade superficial e geométrica da peça, relacionando com a potência consumida no processo;
- Relacionar os resultados obtidos para as variáveis de saída do processo com o custo de produção e análises de poluição para verificar se os resultados do MQL e (MQL+WCJ) podem ser justificados pela redução de custos do processo.
- Verificar se a utilização do MQL e (MQL+WCJ) podem gerar maiores desgastes no rebolo de diamante em função do menor poder refrigerante dessa técnica.

2. REVISÃO DA LITERATURA

No presente capítulo, foi realizada uma revisão da literatura abordando os temas centrais desta pesquisa. Foram explorados tópicos relacionados ao processo de retificação, características dos rebolos de Diamante, friabilidade dos grãos abrasivos, cerâmicas avançadas, bem como as variáveis de saída no processo de retificação cilíndrica e outros temas pertinentes à investigação.

2.1. Processo de retificação

A usinagem por abrasão é um processo no qual a superfície de corte é distribuída e organizada de forma aleatória (MARINESCU et al., 2013). Na retificação, ao contrário do torneamento e fresamento, a ferramenta possui uma geometria de corte indefinida devido às arestas irregulares dos grãos abrasivos (REN, Y. H.; ZHANG, B.; ZHOU, [s.d.]). A remoção de material ocorre por fricção, deformação e cisalhamento, sendo o

último responsável pela formação do cavaco, enquanto a fricção e deformação consomem energia sem remover material (SINHA et al., 2016).

A retificação é um processo final crucial para proporcionar acabamento e tolerâncias precisas, possuindo alto valor agregado. Portanto, os parâmetros de retificação devem ser cuidadosamente definidos (ANDERSON; WARKENTIN; BAUER, 2008).

A retificação é amplamente aplicada na fabricação de peças de alta qualidade, com tolerâncias rigorosas e excelente acabamento superficial (SINHA et al., 2016; SILVA et al., 2020). No processo de retificação, a ferramenta abrasiva atinge velocidades tangenciais maiores em comparação com outros métodos de usinagem, variando entre 20 m/s e 45 m/s na retificação convencional e podendo ultrapassar 140 m/s na retificação de alta velocidade (MARINESCU et al., 2013). No entanto, a retificação é considerada um objeto de estudo desafiador devido às numerosas variáveis envolvidas, sua sensibilidade a pequenas alterações nos valores dessas variáveis e ao uso de ferramentas de formato irregular (HASSUI; DINIZ, 2003).

2.2 A Cinemática no processo de retificação

A Figura 1 ilustra as variáveis envolvidas no processo de retificação, onde d_s representa o diâmetro do rebolo e d_w é o diâmetro da peça. O rebolo gira com uma velocidade tangencial V_s , enquanto a peça possui uma velocidade tangencial V_w . A velocidade de avanço do rebolo em relação à peça é representada por V_f , e a indica a profundidade de penetração do rebolo na peça. As forças tangenciais F_t e normal F_n são as resultantes do processo.

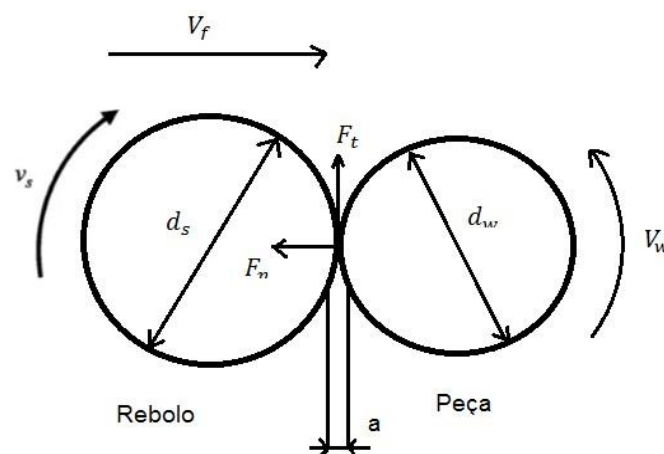


Figura 1 Representação da cinemática na retificação.

Além disso, é importante destacar que o processo de retificação pode ser realizado de forma concordante (como ilustrado na Figura 1), onde o rebolo e a peça giram em sentidos opostos, ou de forma discordante, em que ambos giram no mesmo sentido. Na abordagem concordante, o grão abrasivo penetra na peça com maior profundidade de corte inicialmente e vai reduzindo gradualmente essa penetração ao longo do processo. Isso resulta em forças de corte menores, melhorias na superfície usinada e redução do desgaste do rebolo (ROWE, 2014a). Por outro lado, na abordagem discordante, ocorre o oposto, em que o grão abrasivo penetra na peça com menor profundidade de corte inicialmente e vai aumentando gradativamente durante o processo de retificação.

O entendimento da cinemática da retificação é essencial para o controle adequado dos parâmetros de usinagem e a obtenção de resultados desejados em termos de precisão, acabamento superficial e vida útil do rebolo.

2.3. Danos térmicos causados pelo processo de retificação

Na operação de retificação, é comum que vários grãos abrasivos estejam em contato com a peça em um determinado momento, mas apenas uma parte desses grãos está efetivamente cortando e removendo material. Os demais grãos estão apenas deslizando sobre a superfície da peça, o que resulta em um atrito significativo e, conseqüentemente, altas temperaturas (TAWAKOLI et al., 2009).

As altas temperaturas geradas durante o processo de retificação podem levar a diversos problemas. Pode ocorrer a queima visível na peça, manifestada por manchas ou descoloração, bem como o surgimento de defeitos micro estruturais onde a microestrutura do material é alterada. Essas alterações podem resultar na redução da dureza superficial da peça, aumentando as tensões residuais e reduzindo sua resistência à fadiga. Além disso, a têmpera ou retêmpera do material e as expansões térmicas não controladas podem causar erros dimensionais e de forma, especialmente em relação à circularidade, e até mesmo levar à formação de trincas no material (DA SILVA et al., 2007; IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005).

É essencial realizar estudos aprofundados sobre as causas da queima na retificação, uma vez que, de acordo com Anderson, Warkentin e Bauer (2008), esse é o erro mais comumente observado nesse processo. A compreensão dessas causas e a implementação de medidas preventivas são de suma importância para garantir a qualidade e a integridade das peças produzidas por meio da retificação.

2.4. Processo de retificação cilíndrica externa de mergulho

Na retificação cilíndrica externa de mergulho, o processo envolve o avanço do rebolo perpendicularmente à superfície da peça que está sendo retificada. Nesse tipo de retificação, é comum o rebolo ser mais espesso que a peça, o que permite a usinagem simultânea de várias superfícies (DINIZ & OLIVEIRA, 2008). Durante a retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo se move na direção do corpo de prova com uma velocidade de mergulho (v_f), a qual é consideravelmente menor em comparação à velocidade tangencial da peça (v_w). Além disso, a velocidade tangencial da peça, por sua vez, é geralmente menor do que a velocidade periférica do rebolo (v_s) (MARINESCU et al., 2013).

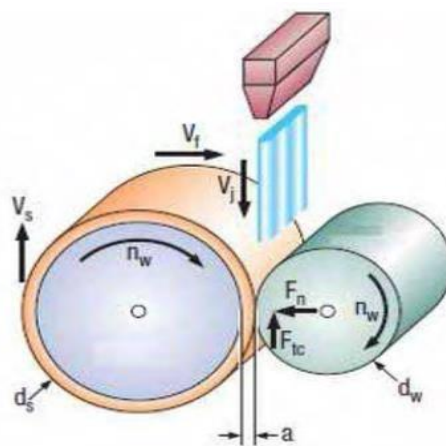


Figura 2 Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho, adaptado (MALKIN, 1989)

Esse tipo de abordagem na retificação é comumente utilizado para a obtenção de acabamentos superficiais precisos em peças cilíndricas, onde a movimentação do rebolo em relação à peça permite a remoção gradual do material desejado. A diferença nas velocidades de avanço entre o rebolo e a peça é um fator crucial nesse processo, pois afeta diretamente a taxa de remoção de material e a qualidade da superfície obtida.

Esse método de retificação oferece vantagens significativas, como a possibilidade de usinagem de superfícies complexas e a obtenção de tolerâncias dimensionais e acabamentos superficiais de alta precisão. No entanto, é fundamental entender as características cinemáticas envolvidas e considerar cuidadosamente os parâmetros de processo, como as velocidades de avanço e as velocidades periféricas, a fim de garantir a eficiência e a qualidade desejadas na retificação cilíndrica externa de mergulho.

A retificação cilíndrica externa de mergulho é um processo amplamente utilizado na indústria devido à sua eficiência e economia. Conforme mencionado por Silva Neto (2012), esse método de retificação é reconhecido por sua rapidez e baixo custo, tornando-o uma escolha frequente para a produção de peças cilíndricas com alta precisão.

2.4.1. Força tangencial de corte

Durante o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, a interação entre o rebolo e a peça resulta em uma força resultante (F_a), conforme destacado por Malkin e Bitter (1989). Essa força pode ser decomposta em dois componentes principais: a força normal, que atua perpendicularmente à superfície da peça, e a força tangencial, que age paralelamente à superfície da peça.

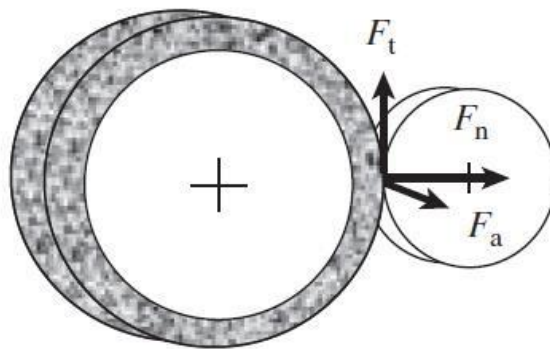


Figura 3 Três componentes da força na retificação (Rowe, 2014).

De acordo com Marinescu et al. (2007), a força tangencial de corte durante o processo de retificação é determinada pela Equação (1):

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

Onde b (mm) é a largura média no topo dos grãos abrasivos, k_s (N/mm²) é a pressão específica de corte, μ é o coeficiente de atrito entre o grão abrasivo e a peça, e k_n (N/mm²) é a tensão de escoamento do material.

A partir da Equação (1), pode-se inferir que a força tangencial de corte é principalmente afetada pela espessura máxima do cavaco e pela largura média no topo dos grãos abrasivos. Portanto, o tamanho do grão abrasivo e a resistência do ligante do

rebolo desempenham um papel crucial no aumento das forças de corte durante o processo de retificação (LI et al., 2002).

Durante a retificação, os grãos abrasivos do rebolo tendem a perder sua geometria original e, conseqüentemente, sua afiação, resultando em um aumento dos esforços necessários para a remoção de material. Isso também leva ao aumento da força tangencial de corte.

De acordo com Schwarz et al. (2015), um rebolo desgastado tende a proporcionar um acabamento superficial mais suave à peça, porém aumenta as chances de danos térmicos, formação de lóbulos e trepidações.

Através da força tangencial de corte, é possível avaliar o desempenho dos rebolos, detectar o desgaste macro e micro, verificar a capacidade de retenção dos grãos pelo ligante e analisar o aumento da temperatura na região do corte e o estado de tensão residual (BIANCHI et al., 2011).

As forças de corte na retificação desempenham um papel fundamental, pois influenciam a geometria da peça, suas dimensões, rugosidade, vida útil do rebolo (desgaste volumétrico) e o tempo necessário para realizar o processo. As potências requeridas pela máquina retificadora, bem como suas necessidades estruturais, também são afetadas pelos valores médios utilizados na usinagem do material (KING; HAHN, 2012).

2.4.2. Mecanismos de formação de cavaco no processo de retificação

As três fases necessárias para a remoção de material durante o processo de retificação são ilustradas na Figura 4.

Na primeira fase, ocorre apenas uma deformação elástica no material da peça, onde a energia fornecida ao processo é dissipada pelo atrito, calor e deformações. Nessa etapa, a maior parte da energia é absorvida pela deformação elástica do material e pelas forças de atrito entre os grãos abrasivos e a peça.

Em seguida, na segunda fase, com a penetração progressiva dos grãos abrasivos na peça, ocorrem deformações plásticas, escoamento lateral e recuperação das deformações elásticas ocorridas na fase anterior. Quanto maior a penetração dos grãos, maior será a força de atrito e, conseqüentemente, a dissipação de energia por deformações, atrito e calor. Nessa fase, a energia é predominantemente consumida pela deformação plástica do material.

Por fim, na última fase, a aresta de corte atinge um valor de penetração no qual ocorre a formação do cavaco, e a maior parte da energia é consumida pelo cisalhamento do material. Nesse estágio, a remoção de material ocorre principalmente pela quebra dos grãos abrasivos e pelo deslizamento entre o rebolo e a peça. (MALKIN, S., & BITTER, J. G., 1989).

É importante ressaltar que essas fases não ocorrem de forma isolada, mas sim de maneira simultânea durante o processo de retificação, com diferentes graus de intensidade em cada fase, dependendo das características do material da peça, da geometria do rebolo e dos parâmetros de corte empregados.

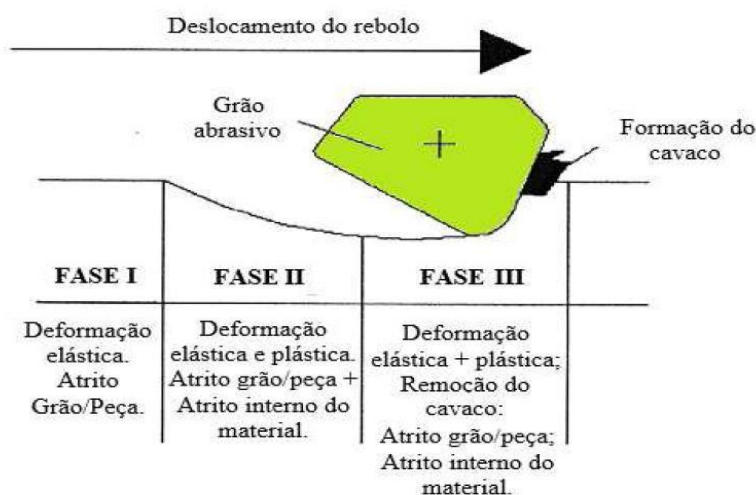


Figura 4 Formação de cavaco por um grão abrasivo, adaptado (MALKIN, 1989).

2.4.3. Ciclo da retificação externa de mergulho

Durante o processo de retificação, quando o rebolo avança em direção à peça, ocorre uma diferença entre o avanço real e o avanço programado. Essa diferença é devida às deformações elásticas sofridas tanto pela ferramenta quanto pela peça, mas principalmente pela máquina. Essas deformações são causadas pela falta de rigidez do sistema. A Figura 5 ilustra essa discrepância entre o avanço teórico e o avanço real.

Para solucionar esse problema, é adotado um período chamado de spark-out, ou tempo de faíscamento, no qual não há avanço do rebolo, mas a peça e o rebolo permanecem em contato. Esse período permite que as deformações elásticas sejam eliminadas gradualmente enquanto o rebolo continua a remover material, garantindo as dimensões necessárias da peça final.

A utilização do spark-out é uma estratégia eficiente para compensar as deformações elásticas e obter uma peça com as tolerâncias desejadas. Esse processo é especialmente importante em retificações de alta precisão, onde a rigidez e a estabilidade do sistema são fundamentais para a obtenção de resultados consistentes e de qualidade. (HASSUI; DINIZ, 2003).

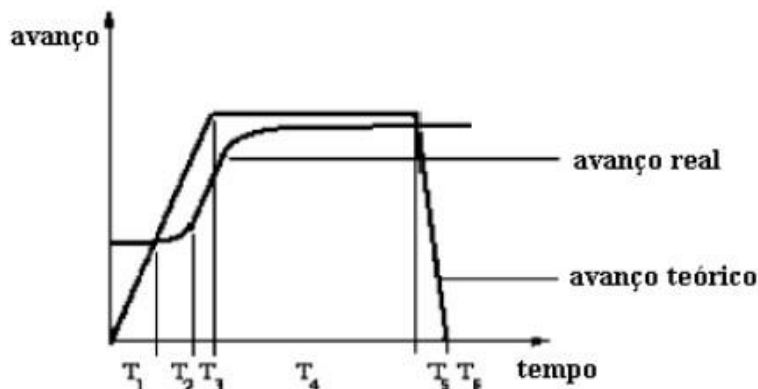


Figura 5 Ciclo de uma retificação cilíndrica (Hassui e Diniz, 2003 - modificado).

Cada intervalo da Figura 5, de acordo com Hassui e Diniz (2003), pode ser definido da seguinte forma:

T1: Nessa fase, o rebolo avança em direção à peça, mas ainda não há contato entre eles. O rebolo se aproxima sem causar qualquer remoção de material.

T2: É o estágio inicial de contato entre o rebolo e a peça. Nesse momento, a força de corte aumenta, gerando deformações elásticas tanto na peça quanto no rebolo. Devido a essas deformações, o avanço real se torna menor do que o avanço programado, resultando em uma diferença entre a posição real e a posição teórica.

T3: Nessa etapa, a profundidade de corte desejada é alcançada e mantida ao longo de um ciclo de retificação. A remoção de material ocorre conforme o rebolo avança, seguindo as especificações do processo.

T4: Esse período é conhecido como "spark-out" e é caracterizado pela ausência de avanço do rebolo. Durante o spark-out, a peça e o rebolo permanecem em contato, permitindo que ocorra a recuperação das deformações elásticas sofridas na fase T2. É nesse estágio que as tolerâncias dimensionais, geométricas e superficiais da peça são alcançadas.

T5: É a fase de recuo da ferramenta, na qual o rebolo se afasta da peça, encerrando o processo de retificação para uma determinada peça e preparando-se para a próxima operação.

Esses intervalos representam as diferentes etapas do ciclo de retificação e são essenciais para o controle e a obtenção das dimensões desejadas, bem como para garantir a qualidade e a precisão da peça final.

2.5. Parâmetros utilizados no processo de retificação

A fim de alcançar uma qualidade superficial satisfatória na retificação cilíndrica externa de mergulho, uma opção viável é reduzir a profundidade de corte. No entanto, é importante considerar que uma profundidade de corte muito baixa resultará em um aumento no tempo de processamento, acarretando em maiores custos financeiros, impactos ambientais e demanda por energia. Portanto, é crucial ajustar os parâmetros de usinagem de forma adequada, visando obter um equilíbrio entre qualidade e eficiência (Winter et al., 2015).

Além disso, de acordo com Winter et al. (2015), os resultados da retificação podem ser classificados em três aspectos principais: tecnológico, econômico e ambiental. No aspecto tecnológico, são considerados parâmetros como a rugosidade superficial e a precisão geométrica da peça. Já no aspecto econômico, são avaliados o custo e o tempo necessários para realizar o processo de retificação. Por fim, no aspecto ambiental, são levados em conta fatores como poluição e impactos na saúde humana.

Para auxiliar na compreensão e controle desses parâmetros, a Figura 6 apresenta os principais elementos envolvidos na operação de retificação cilíndrica externa de mergulho. A Figura 6 é útil para orientar os operadores e engenheiros no ajuste adequado dos parâmetros durante o processo de retificação.

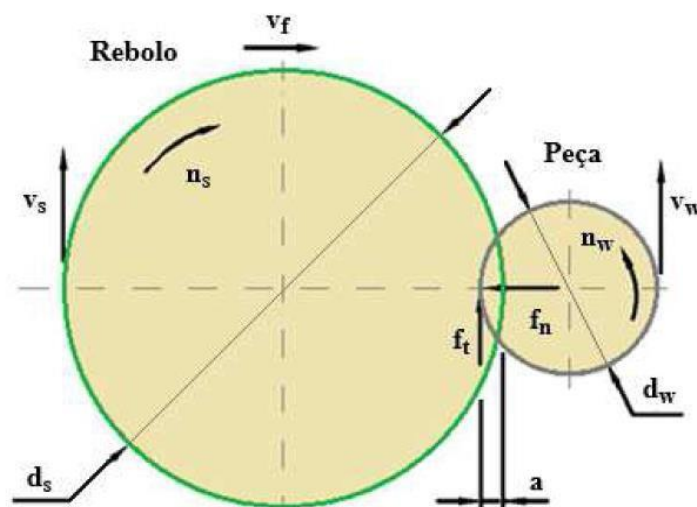


Figura 6 Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho, adaptado (MALKIN, 1989).

Onde:

a - profundidade de corte;

d_s - diâmetro do rebolo;

d_w - diâmetro da peça;

F_n - força normal de corte;

F_t - força tangencial de corte;

v_f - velocidade de mergulho (avanço) do rebolo;

v_s - velocidade de corte ou periférica do rebolo;

v_w - velocidade periférica da peça;

n_s - rotação do rebolo;

n_w - rotação da peça.

No item a seguir, serão detalhados os principais parâmetros de influência neste trabalho.

2.5.1. Profundidade de corte (a)

De acordo com Marinescu et al. (2007), a profundidade de corte na retificação é definida como a quantidade de material removido a cada revolução do rebolo. Malkin (1989) complementa essa definição, descrevendo a profundidade de corte como a distância que o rebolo penetra na peça em uma revolução completa, mantendo uma determinada velocidade. Matematicamente, a profundidade de corte pode ser expressa pela Equação (2):

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

Conforme mencionado por Marinescu et al. (2007), durante o processo de retificação, ocorrem deformações na peça, no rebolo e nos componentes da máquina devido ao contato entre o rebolo e a peça. Essas deformações resultam em uma profundidade de corte real (a_e) menor do que aquela calculada com base na velocidade de avanço v_f . Esse fenômeno ocorre devido à flexão e à falta de rigidez dos elementos mecânicos, além do desgaste do rebolo e das deflexões térmicas.

Os mesmos autores destacam que a profundidade de corte real pode ser determinada pela diferença entre a profundidade de corte programada e as deflexões, o desgaste do rebolo e a expansão térmica. Portanto, pode-se expressar a profundidade de corte real pela Equação (3):

$$ae = a - \delta - asw + at \quad (3)$$

A Equação 3, a representa a profundidade de corte programada, δ corresponde às deflexões do sistema, asw é a profundidade desgastada do rebolo a cada volta e at é a expansão térmica do rebolo e da peça. Ao considerar esses fatores, é possível obter uma estimativa mais precisa da profundidade de corte real durante o processo de retificação.

Uma alternativa para determinar a profundidade de corte real é medir a peça antes e depois da retificação. Essa abordagem permite uma análise direta das alterações dimensionais e possibilita o ajuste dos parâmetros de usinagem para alcançar as dimensões desejadas.

É importante destacar a relação significativa entre a profundidade de corte e a espessura equivalente do cavaco, que são diretamente proporcionais. Aumentar a profundidade de corte resulta em uma maior espessura do cavaco, o que leva a um maior desgaste do rebolo, forças de retificação mais intensas e aumento da rugosidade da peça (DINIZ; DE OLIVEIRA, 2008).

Além disso, o aumento da profundidade de corte implica em um maior número de grãos abrasivos em atividade e prolonga o tempo de contato entre a peça e o rebolo. Isso significa que cada grão abrasivo remove uma quantidade maior de material, o que resulta em um aumento da temperatura durante o processo de retificação (MARINESCU ET AL., 2007). Esses efeitos devem ser considerados ao definir os parâmetros de corte adequados para obter resultados desejados na usinagem.

2.5.2. Comprimento de contato (L_c)

De acordo com Marinescu et al. (2016), o comprimento de contato na retificação é definido como a extensão de contato entre o rebolo e a peça. Essa medida é importante para determinar a área de interação entre os dois elementos durante o processo de retificação. O comprimento de contato pode ser calculado utilizando a Equação (4), proposta por Marinescu et al.(2016):

$$I_c = \sqrt{a_e \times d_s} \quad (4)$$

A Equação 4 é uma boa aproximação quando a retificação envolve uma profundidade de corte considerável. No entanto, os mesmos autores destacam que o comprimento de contato real pode ser maior do que o valor calculado pela Equação (4), devido às deformações que ocorrem durante o processo. Alguns autores também se

referem a esse parâmetro como comprimento de corte estático, como mencionado por Malkin e Guo (2008a).

É importante ressaltar que o comprimento de contato afeta a geração de calor e a remoção de material ao longo da área de contato entre o rebolo e a peça. Esse parâmetro é influenciado pelos contatos mecânicos que ocorrem durante a retificação e pela cinemática geral do processo (ANDERSON, WARKENTIN, BAUER, 2008).

2.5.3. Taxa de remoção de material (Q_w)

De acordo com Klock (2009), a taxa de remoção do material na retificação é definida como o volume de material removido por unidade de tempo. Essa taxa pode ser calculada utilizando a Equação (5) proposta por Marinescu et al. (2007), como mostrado a seguir:

$$Q_w = bw \times ae \times V_w = bw \times \pi \times dw \times Vf \quad (5)$$

Na Equação 5, bw representa a largura da retificação, ae é a profundidade de corte, V_w é a velocidade relativa entre a peça e o rebolo, dw é o diâmetro da peça, e Vf é a velocidade de mergulho. A taxa de remoção é expressa em mm^3/min .

A taxa de remoção do material ocorre quando cada grão abrasivo penetra na peça e remove o material em seu caminho. Para aumentar a taxa de remoção, é necessário aumentar a velocidade de avanço, o que resultará em maior força de retificação. No entanto, isso pode comprometer a qualidade superficial, reduzir a vida útil do rebolo e aumentar o consumo de energia (ROWE, 2014a).

Além disso, conforme mencionado pelo mesmo autor, dividindo a taxa de remoção pelo valor da largura de retificação, é possível obter a taxa específica de remoção do material (Q'_w), que representa a taxa de remoção por unidade de largura da retificação. Portanto, a Equação (6) pode ser utilizada:

$$Q'_w = a_e \times V_w \quad (6)$$

A taxa de remoção do material tem influência no aumento da temperatura, ocorrência de danos térmicos, desgaste dos grãos abrasivos e outros aspectos relacionados ao comportamento abrasivo do processo (ROWE, 2014a).

2.5.4. Velocidade de corte (V_s)

A velocidade de corte, também conhecida como velocidade periférica do rebolo (v_s), é definida por Marinescu et al. (2007) como o deslocamento de um ponto na superfície de corte do rebolo em um determinado intervalo de tempo. Esse parâmetro desempenha um papel crucial na vida útil do rebolo, na capacidade de remoção dos grãos abrasivos e tem impacto direto no acabamento superficial do componente, nas tensões residuais, nas vibrações, entre outros fatores. A Equação (7) representa a relação para calcular a velocidade de corte:

$$v_s = \frac{\pi \times d_s \times n_s}{60 \times 1000} \quad (7)$$

Onde: n_s é a rotação do rebolo e d_s é o diâmetro do rebolo. Aumentar a velocidade de corte resulta em uma melhor qualidade superficial da peça e em um menor desgaste do rebolo, mas também leva a um aumento na temperatura. Além disso, o aumento da velocidade de corte contribui para a redução das forças envolvidas no processo, melhorando a qualidade da peça e aumentando a produtividade (JACKSON et al., 2007). A maioria das retificadoras utiliza uma velocidade de corte de 43 m/s como valor padrão para abrasivos convencionais. Além disso, o aumento da velocidade de corte leva à diminuição da espessura do cavaco e do número de arestas de corte ativas (MARINESCU et al., 2007).

2.5.5. Velocidade da peça (V_w)

A velocidade da peça, conforme definida por Silva Neto (2012), é a velocidade periférica da peça e pode ser calculada com base em seu diâmetro e rotação, utilizando a Equação (8).

$$v_w = \frac{\pi \times d_w \times n_w}{60 \times 1000} \quad (8)$$

Onde: n_w representa a rotação por minuto da peça e d_w é o diâmetro da mesma. Ao aumentar a velocidade da peça, ocorre um aumento na taxa de remoção de material,

o que resulta em um maior esforço em cada grão abrasivo e, conseqüentemente, um aumento na força tangencial de corte. Isso faz com que o rebolo adquira um comportamento mais suave à medida que a velocidade da peça aumenta.

2.5.6. Velocidade de mergulho (v_f)

Conforme mencionado por Marinescu et al. (2007), a velocidade de mergulho, também conhecida como velocidade de avanço, refere-se à velocidade na qual o rebolo avança sobre a peça durante o processo de retificação. Essa velocidade tem influência direta na rugosidade superficial e nas forças de retificação, sendo diretamente proporcional a ambas.

Durante a fase de desbaste na retificação, aproximadamente 95% do material da peça é removido, e é recomendado utilizar uma velocidade de mergulho entre 0,4 mm/min e 2,0 mm/min. já para o acabamento, a velocidade de mergulho ideal situa-se entre 0,1 mm/min e 0,3 mm/min.

2.5.7. Espessura equivalente de corte (heq)

A espessura equivalente de corte (heq) é definida como a relação entre a taxa de remoção específica de material ($Q_{w'}$) e a velocidade de corte (v_s) de acordo com Malkin e Guo (2008a). Essa relação pode ser expressa pela equação (9):

$$heq = \frac{Q_{w'}}{v_s} = \frac{\pi \times d_w \times v_f}{60 \times 1000 \times v_s} \quad (9)$$

Na Equação (9), v_f representa a velocidade de mergulho e d_w é o diâmetro da peça. A espessura equivalente (heq) é medida em milímetros.

O parâmetro de espessura equivalente é considerado fundamental para caracterizar o processo de retificação, pois abrange as três principais características do processo (v_s , v_f , d_w) como mencionado por Silva Neto (2012).

No entanto, de acordo com Marinescu et al. (2007), esse parâmetro não leva em conta o espaçamento dos grãos do rebolo, o que evidencia que o comportamento da retificação está intimamente relacionado à combinação da espessura equivalente de corte e a densidade das arestas de corte.

Além disso, Malkin e Guo (2008a) afirmam que a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada a variáveis importantes no processo de retificação, como a rugosidade e o desgaste do rebolo. Por sua vez, Marinescu et al. (2007) destacam que a espessura equivalente é um fator crucial, pois determina a espessura dos cavacos formados durante a retificação.

2.6. Rebolo

Conforme mencionado por Rasim et al. (2015), o rebolo é uma circunferência que contém grãos abrasivos de formato irregular, distribuídos de forma aleatória. Esses grãos abrasivos são unidos por um material ligante, o que resulta na formação de porosidades controladas e definidas. Essas porosidades são de extrema importância, pois permitem a acomodação dos cavacos e o transporte dos fluidos de corte. O rebolo pode ser considerado uma ferramenta de geometria indefinida devido à aleatoriedade da geometria de corte dos grãos (MALKIN; BITTER, 1989).

O desempenho do rebolo está diretamente relacionado a três características essenciais, conforme destacado pelo mesmo autor: o tipo e tamanho dos grãos abrasivos, as propriedades abrasivas do material ligante e a porosidade do rebolo.

Além dos grãos abrasivos, do ligante e dos poros, o material do centro do rebolo também desempenha um papel importante, dependendo do design, de acordo com Winter et al. (2015). Webster e Tricard (2004) explicam que o design do rebolo envolve o perfil, a espessura, o material do centro (se não for composto inteiramente pela mistura de abrasivos, ligante e porosidade), a capacidade de resistir ao estresse rotacional, a precisão e a resistência ao ataque químico.

O rebolo pode ser constituído integralmente pela mistura de abrasivos, ligante e porosidade, ou pode ter apenas uma fina camada dessa mistura, dependendo do tipo de grão abrasivo e do tipo de ligante.

2.6.1. Dureza do rebolo

A dureza do rebolo está relacionada à sua capacidade de resistir ao desprendimento dos grãos abrasivos, ou seja, à habilidade do ligante em reter os grãos abrasivos. Conforme afirmado por Malkin e Guo (2008a), quanto maior a dureza, menor será a tendência de ocorrer o desprendimento dos grãos.

No entanto, de acordo com Rowe (2014a), os rebolos de alta dureza têm a tendência de perder a afiação à medida que retêm os grãos abrasivos por mais tempo, o que aumenta o risco de causar uma queima superficial na peça. Por outro lado, os rebolos de baixa dureza têm a capacidade de desprender os grãos abrasivos desgastados, mantendo as arestas de corte afiadas.

Rowe (2014a) também afirma que a dureza do rebolo geralmente indica a forma como ele irá se desgastar. Rebolos de baixa dureza desgastam-se mais rapidamente em comparação com rebolos de alta dureza, devido ao volume de ligante presente no rebolo. Quanto maior o volume de ligante, menor será a quantidade de porosidade, o que resulta em um rebolo mais duro. É importante ressaltar que a dureza é uma característica intrínseca do rebolo e não pode ser alterada.

Marinescu et al. (2007) mencionam que o abrasivo utilizado no rebolo deve ter uma dureza maior do que o material a ser retificado. A dureza pode ser determinada por meio de um teste de dureza Knoop, que é baseado na resistência à indentação estática.

A Figura 7 ilustra a dureza de alguns materiais na escala Knoop.

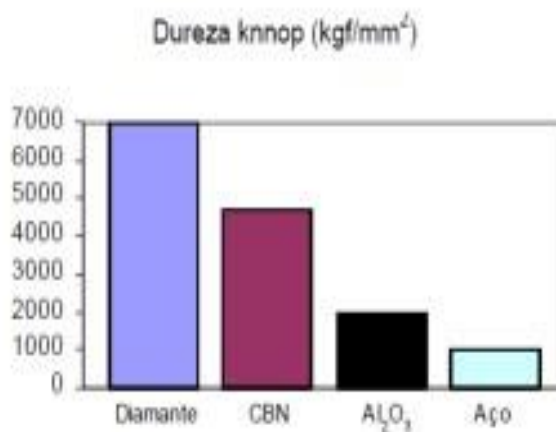


Figura 7 Características dos abrasivos.

2.6.2. Estrutura do rebolo

Conforme mencionado por Rowe (2014a), a porosidade e a estrutura do rebolo estão intimamente relacionadas. Um rebolo com alta porosidade apresentará uma estrutura aberta, com uma menor quantidade de ligante em comparação a um rebolo com porosidade regular e a mesma estrutura. Além disso, rebolos com alta porosidade tendem a ser mais macios, enquanto os de baixa porosidade tendem a ser mais duros.

De acordo com Rowe, (2014a) rebolos com estrutura aberta são essenciais para a retificação com alta taxa de remoção, pois possuem uma grande quantidade de poros onde o cavaco pode se acomodar. Essa porosidade também favorece o transporte de fluidos durante o processo, especialmente em casos em que há geração significativa de calor.

Marinescu et al. (2007) afirmam que a porosidade é necessária para obter uma ação de corte efetiva. A presença de poros reduz a velocidade máxima na qual o rebolo pode ser utilizado, uma vez que uma maior porosidade está associada a uma menor velocidade. Além disso, a porosidade facilita a remoção dos grãos abrasivos do rebolo.

2.6.2.1. Abrasivos

Conforme destacado por Malkin e Guo (2008a), os abrasivos podem ser classificados como naturais ou sintéticos, e é essencial que sejam significativamente mais duros do que os materiais que serão usinados.

Marinescu et al. (2007) descrevem os abrasivos como ferramentas de corte com geometria não definida, caracterizadas por alta dureza, arestas de corte bem definidas e boa capacidade de corte. A nitidez dos grãos abrasivos é descrita em termos do raio da aresta e do ângulo do vértice, e sua eficiência de corte depende de fatores como a estrutura do grão e sua fragilidade.

Durante o processo de retificação, ocorrem temperaturas elevadas, portanto, um bom abrasivo deve manter sua dureza, não reagir quimicamente e resistir à difusão no material da peça. Além disso, as propriedades térmicas dos abrasivos desempenham um papel crucial em sua resistência ao desgaste. A condutividade térmica dos abrasivos é alta e está diretamente relacionada à pureza do material do grão (ROWE, 2014a).

O aumento da temperatura tende a reduzir a dureza da maioria dos abrasivos, com exceção do SiO_2 , que se torna mais duro em temperaturas elevadas. Portanto, é importante levar em consideração as propriedades térmicas do abrasivo, assim como a temperatura durante o processo de retificação, a fim de evitar um desgaste prematuro.

Klocke (2009) também ressalta a importância de os abrasivos possuírem alta dureza e resistência mecânica para facilitar a formação do cavaco e manter as arestas de corte afiadas por um período prolongado.

Sinha et al. (2016) atribuem o desgaste dos abrasivos aos seguintes fatores:

- Atrito entre a peça e o abrasivo;
- Deformações plásticas em altas temperaturas;

- Fratura devido ao impacto mecânico;
- Reações químicas entre o abrasivo e a peça em altas temperaturas.

2.6.2.2. Granulometria

As dimensões dos grãos abrasivos e sua uniformidade podem ser classificadas de acordo com a norma americana ANSI Standard B74.12-1977 ("*Specification for Size of Abrasive Grain*"). Essa norma define o tamanho dos grãos em mesh, que representa a quantidade de furos por polegada linear da peneira na qual os grãos ficam retidos durante o processo de seleção. Essa classificação é comumente utilizada para grãos abrasivos convencionais (MARINESCU et al., 2007).

No caso dos grãos superabrasivos, é utilizada a Norma Europeia FEPA (*Federation European Producers of Abrasives*), que especifica o diâmetro teórico do grão.

- Quando se trata de grãos abrasivos grossos, eles são indicados para:
- Materiais macios, dúcteis ou fibrosos, como aços macios ou alumínio;
- Remoção significativa de material (desbaste);
- Peças que não requerem alta qualidade de acabamento superficial;
- Áreas de contato extensas.

Por outro lado, os grãos mais finos devem ser escolhidos para:

- Materiais duros ou quebradiços, como metal duro ou vidro;
- Peças que necessitam de um bom acabamento superficial;
- Áreas de contato menores.

2.6.2.3. Friabilidade

A friabilidade dos grãos abrasivos é definida por Marinescu et al. (2007) como a tendência do grão em se desintegrar em pequenos fragmentos quando submetido a pressão. Nascimento et al. (2016) destacam a importância da friabilidade como uma característica essencial na avaliação de um abrasivo.

Uma maior friabilidade indica uma maior facilidade de fratura do grão, resultando na formação de novas arestas de corte. Portanto, a friabilidade é uma vantagem para manter o rebolo afiado. No entanto, essa característica está diretamente relacionada ao desgaste do rebolo. Quanto maior a friabilidade, maior será a fratura dos grãos e, consequentemente, maior será o desgaste do rebolo (ROWE, 2014a).

Quando considerada em relação à resistência do grão, um grão mais resistente tem menor probabilidade de fraturar ao entrar em contato com a peça. Por outro lado, quanto mais friável o grão (ou seja, menos resistente), maior é a probabilidade de fratura do grão, resultando na formação de novas arestas de corte. Isso implica que o rebolo se afiará automaticamente durante o processo de retificação (MALKIN; GUO, 2008a).

Marinescu et al. (2007) mencionam que a friabilidade dos grãos está relacionada ao tamanho do cristal, sendo que cristais maiores tendem a ser mais friáveis. Além disso, a taxa de resfriamento influencia no tamanho dos cristais, sendo que um resfriamento rápido resulta em cristais maiores e grãos mais friáveis.

2.7. Tipos de abrasivos

Os abrasivos são classificados em dois grupos principais, de acordo com Marinescu et al. (2007): os abrasivos convencionais, como o carbeto de silício (SiC) e o óxido de alumínio (Al_2O_3), e os superabrasivos, como o diamante e o nitreto cúbico de boro (CBN). Esses grupos apresentam diferenças significativas em termos de dureza dos materiais, o que resulta em desgastes distintos nos rebolos e impacta diretamente no processo de retificação. Além disso, os superabrasivos possuem um custo consideravelmente mais elevado, sendo de 10 a 100 vezes maior em comparação aos abrasivos convencionais (MARINESCU et al., 2007).

Em certos casos, a retificação só é viável com o uso de superabrasivos, que são materiais mais duros e resistentes ao desgaste. Essa resistência permite espaçar os intervalos entre as operações de dressagem, reduzindo os custos a longo prazo e justificando o investimento inicial mais alto em superabrasivos (ROWE, 2014a).

Quanto à construção dos rebolos superabrasivos, Marinescu et al. (2007) explicam que eles geralmente possuem uma fina camada de abrasivo em sua periferia, enquanto o centro é feito de materiais como plástico ou metais. Essa estrutura reduz a quantidade de abrasivo utilizado no rebolo, resultando em uma redução do custo. Além disso, essa configuração permite alcançar altas taxas de remoção, uma vez que o rebolo pode ser girado em velocidades elevadas.

2.7.1. Diamante

O diamante é amplamente reconhecido como o material mais duro existente e, portanto, é utilizado para retificar materiais extremamente duros, incluindo cerâmicas de alta dureza. Sua excepcional dureza o torna ideal para essas aplicações. Além disso, o diamante possui uma das mais altas condutividades térmicas em temperatura ambiente, o que contribui para a redução da temperatura durante o processo de retificação. No entanto, é importante notar que sua condutividade térmica diminui significativamente em altas temperaturas (Rowe, 2014a).

A dureza do diamante é uma propriedade desafiadora de mensurar devido à sua resistência à deformação em temperatura ambiente. Além disso, a dureza é comumente medida utilizando uma ponta de diamante, o que dificulta a aplicação de forças suficientes para causar deformação no próprio diamante durante os testes (Marinescu et al., 2007).

Em termos de condutividade térmica, o diamante apresenta o valor mais alto em comparação com qualquer outro material à temperatura ambiente, com valores variando entre 600 e 2000 W/m.K. No entanto, essa condutividade térmica diminui para aproximadamente 70 W/m.K em uma temperatura de 700 °C. Essas propriedades térmicas do diamante são benéficas para a redução da temperatura durante a retificação (Rowe, 2014a).

Uma característica única do diamante na indústria é sua capacidade de dresser qualquer tipo de rebolo. Esse atributo é ressaltado por Marinescu et al. (2007), que destacam o diamante como o único material capaz de realizar essa função essencial.

Outra propriedade relevante do diamante é sua estabilidade térmica. De acordo com Nascimento et al. (2016), o diamante é termicamente estável até uma temperatura de 800 °C em condições de ar e acima de 1400 °C em vácuo, o que o torna um abrasivo com excelente retenção de dureza em temperaturas elevadas.

No entanto, Rowe (2014a) observa que, devido ao diamante ser composto principalmente de carbono, sua utilização para retificar aços pode ser inadequada. Isso ocorre porque o carbono presente no diamante tem uma afinidade considerável com o ferro do aço, o que leva a um desgaste excessivo e um aumento significativo na temperatura durante o processo de retificação.

Marinescu et al. (2007) explicam que o diamante, quando metaestável em pressão ambiente, tem a tendência de se transformar em grafite em temperaturas relativamente baixas, como 700 °C em ar e 1500 °C em uma atmosfera inerte. Essa transformação em

grafite facilita o desgaste químico do diamante e a formação de componentes específicos, como o Fe_3C , resultando em um desgaste prematuro dos grãos de diamante. Como resultado, o diamante é especialmente adequado para a retificação de cerâmicas.

Outro desafio enfrentado pelo abrasivo de diamante é o contato com o oxigênio em altas temperaturas. O diamante é termicamente estável até aproximadamente 760°C em condições de ar antes de começar a oxidar, enquanto em um ambiente de vácuo sua estabilidade é de até 1400°C (Rowe, 2014a). Portanto, precauções devem ser tomadas para evitar a oxidação do diamante em altas temperaturas durante o processo de retificação.

Quanto à origem dos diamantes utilizados na indústria, os diamantes naturais geralmente são aqueles que não atendem aos padrões de forma, cor, tamanho ou apresentam defeitos cristalinos e, portanto, são rejeitados pelo mercado de joias. No entanto, a maioria dos diamantes utilizados na indústria é de origem sintética devido ao seu custo menor em comparação com os diamantes naturais. Os diamantes sintéticos são produzidos por meio da exposição de grafite a altas temperaturas e pressões elevadas, na presença de um catalisador como níquel ou outros metais do grupo VII da tabela periódica (MARINESCU et al., 2007). Os parâmetros de temperatura, pressão e tempo de processo influenciam o tamanho dos cristais e suas estruturas, podendo variar de acordo com esses fatores (Malkin; Guo, 2008a).

O uso de catalisadores no processo de síntese do diamante tem o objetivo de reduzir a temperatura e a pressão necessárias para a transformação do carbono em diamante, tornando o processo mais flexível. Além disso, permite obter grãos de diamante de alta qualidade com formas definidas, controlando o tempo e a densidade de nucleação. Em temperaturas baixas, predominam cristais com estrutura cúbica, enquanto em temperaturas intermediárias predominam cristais com estrutura cúbico-octaédrica, e em temperaturas elevadas predominam cristais com estrutura octaédrica (Marinescu et al., 2007).

2.8. Ligantes

Os ligantes desempenham um papel de extrema importância na estrutura do rebolo, pois são responsáveis por fixar os grãos abrasivos. Esses compostos devem possuir habilidades específicas para enfrentar diferentes desafios. Eles devem resistir às forças geradas durante o processo de retificação, suportar as altas temperaturas resultantes da operação, lidar com as forças centrífugas geradas pela rotação intensa do rebolo e

resistir aos ataques químicos decorrentes do uso de fluido de corte. Além disso, os ligantes devem garantir a rigidez do rebolo e manter as partículas abrasivas em sua posição correta (Malkin; Bitter, 1989).

Rowe (2014a) classifica os tipos de ligantes utilizados em rebolos em três categorias principais: ligante resinoide, ligante vitrificado e ligante metálico.

De acordo com Marinescu et al. (2007), um ligante adequado deve ser capaz de realizar diversas funções:

- Proporcionar uma retenção adequada dos grãos no rebolo, evitando que o abrasivo se solte prematuramente.
- Permitir uma erosão controlada do ligante, expondo as arestas de corte dos grãos abrasivos.
- Ser suficientemente resistente para transferir as forças de retificação do eixo para a peça.
- Garantir uma dispersão térmica adequada durante o processo de usinagem.

A maioria dos rebolos convencionais é fabricada com ligantes vitrificados ou resinoides, enquanto rebolos que contêm superabrasivos são mais comumente ligados com ligantes resinoides ou metálicos. No entanto, o ligante vitrificado também é utilizado em rebolos de nitreto de boro cúbico (CBN) (Malkin; Guo, 2008a).

Jackson et al. (2001) afirmam que a escolha do ligante deve levar em consideração o tamanho do rebolo, as condições de trabalho, a vida útil do rebolo e o custo de produção. Além disso, o tipo de ligante está diretamente relacionado à agressividade do rebolo em questão (BIANCHI et al., 2011).

2.8.1. Resinoide

Os rebolos com ligantes resinoides possuem uma característica distintiva de serem mais elásticos em comparação a rebolos com outros tipos de ligantes. Portanto, a elasticidade é um fator crucial na escolha de um ligante resinoide. Essa propriedade pode ser benéfica em duas situações: na segurança do ambiente devido à alta velocidade de rotação e na aplicação de uma carga para obter uma superfície mais polida. Os ligantes resinoides são amplamente utilizados em abrasivos convencionais e também podem resultar em baixas rugosidades superficiais quando combinados com grãos superabrasivos. É importante destacar que, devido à natureza orgânica dos ligantes

resinoides, os rebolos que os utilizam têm uma vida útil limitada, mesmo quando não estão em uso (ROWE 2014b).

Rebolos com ligantes resinoides são amplamente empregados na retificação de carbonetos cimentados e cerâmicas, assim como na retificação de ferramentas de corte utilizando grãos superabrasivos de nitreto de boro cúbico (CBN) (Webster; Tricard, 2004). Malkin e Guo (2008a) afirmam que rebolos resinoides com abrasivos convencionais são comumente utilizados em retificação pesada devido à sua alta resistência e capacidade de suportar impactos. No entanto, os ligantes resinoides são suscetíveis a ataques químicos por fluidos alcalinos, especialmente em altas temperaturas e em períodos prolongados.

Segundo Rowe (2014a), todos os ligantes resinoides sofrem desgaste excessivo quando expostos a altas temperaturas.

Os rebolos com ligantes resinoides são produzidos pela mistura de grãos abrasivos com resinas sintéticas e plastificantes, moldando o rebolo em sua forma final e levando-o ao forno em temperaturas entre 150°C e 200°C (Malkin; Guo, 2008a).

Outra aplicação dos ligantes resinoides é em discos de corte, que são reforçados com fibra de vidro para aumentar sua resistência e operar em altas velocidades (100 m/s) (Webster; Tricard, 2004).

Marinescu et al. (2007) classificam os ligantes resinoides em três tipos:

- Ligante plástico: é o mais macio e popular em abrasivos convencionais. Esse tipo de ligante é utilizado na retificação de duplo disco e na retificação cilíndrica. Em superabrasivos, o ligante plástico é empregado na retificação de alta precisão, geralmente utilizando micro grãos de diamante na indústria de vidro e cerâmica.
- Resina fenólica: é o segundo ligante mais utilizado e domina o setor de retificação bruta. Esse tipo de ligante era conhecido como baquelite.
- Resina poliamida: apresenta maior resistência, maior resistência térmica e menor alongamento em comparação às resinas fenólicas. Portanto, é capaz de manter os grãos abrasivos por mais tempo em altas temperaturas.

2.9. Dressagem

O processo de dressagem tem como objetivo principal restaurar as características de corte do rebolo, criando e expondo novas arestas de corte na sua superfície. Isso é

realizado por meio de um processo que reestabelece o corte da ferramenta no rebolo (SRIVASTAVA; SRI RAM; LAL, 1988). Segundo Marinescu et al. (2007), a dressagem é responsável por deixar o rebolo circular e concêntrico com o eixo de rotação, remover o material da peça incorporado na superfície do rebolo, obter novos grãos abrasivos com arestas de corte afiadas e remover o ligante em volta dos grãos para expor novas arestas.

Embora se esperasse que o rebolo se auto afia quando desgastado, nem sempre isso ocorre de maneira efetiva. Portanto, a dressagem é necessária para restaurar as características de corte da ferramenta (JACKSON et al., 2007). De acordo com Rowe (2014), a dressagem desempenha várias funções preparatórias para a retificação, incluindo a eliminação de desvios na forma do rebolo, a obtenção de arestas de corte afiadas e uniformes, a remoção do ligante em volta dos grãos abrasivos para criar uma superfície mais aberta do rebolo, e a remoção da camada de abrasivo carregada com cavacos gerados durante a usinagem.

Durante o processo de retificação, aproximadamente 10% do rebolo é gasto efetivamente na usinagem da peça, enquanto cerca de 90% é gasto no processo de dressagem. Apesar disso, a dressagem é de extrema importância, pois durante a usinagem, as arestas de corte dos grãos abrasivos tornam-se arredondadas, aumentando as forças de retificação e causando o empastamento do rebolo, onde os poros ficam entupidos com material da peça. Sem a dressagem, o rebolo perde sua capacidade de corte e a qualidade superficial da peça é comprometida (JACKSON et al., 2007).

É indispensável o uso de fluido de corte durante a dressagem para manter o diamante em temperaturas baixas. É importante ligar o fluido antes do início da dressagem para evitar choque térmico no dressador (ROWE, 2014).

Os defeitos macroscópicos no rebolo, como rugosidade, ondulação, desgaste e perda de perfil, causam problemas no processo de retificação e falta de precisão dimensional nas peças usinadas. Já a falta de corte nos grãos abrasivos, que resulta em um aumento das forças durante a retificação, é considerada um defeito microscópico. Esses defeitos aumentam o risco de danos térmicos nas peças, e, portanto, a dressagem tem como objetivo criar as condições ideais para que o rebolo seja eficiente (KLOCKE, 2009).

Segundo o mesmo autor, a dressagem é necessária tanto no primeiro uso do rebolo quanto durante o processo de retificação, para manter a qualidade da peça. O conceito de ponto de dressagem, definido por Oliveira et al. (2009), refere-se ao momento adequado para realizar essa operação, quando os grãos abrasivos perdem suas arestas de corte e não

removem o material de maneira eficiente. É importante destacar que uma dressagem tardia aumenta o risco de queimas superficiais na peça, trincas e peças fora da tolerância, enquanto uma dressagem precoce resulta em desgaste prematuro da ferramenta e perda de tempo na linha de produção.

O tipo de dressagem é determinado pelos requisitos econômicos e de qualidade, bem como pelo tipo de abrasivo do rebolo, seu ligante e seu formato. Esses parâmetros influenciam os métodos e ferramentas utilizados no processo de dressagem (KLOCKE, 2009). Marinescu et al. (2007) identificam dois tipos básicos de dressadores: estacionários e rotativos. Os dressadores estacionários podem ser classificados em dressadores estáticos de ponta única e conglomerado, conforme descrito por Rowe (2014).

No processo de dressagem mecânica, a ferramenta não apresenta movimento na direção periférica do rebolo. O perfil do rebolo é formado pelo movimento axial ao longo do contorno do rebolo, o que faz com que esse processo seja comparado ao torneamento (KLOCKE, 2009). Os dressadores de ponta única de diamante são compostos por um diamante de estrutura octaédrica soldado em um suporte de aço, onde cerca de um terço do diamante fica exposto após a soldagem (MARINESCU et al., 2007). Rowe (2014) afirma que o dressador deve ser periodicamente rotacionado para apresentar uma nova aresta para a operação de dressagem, caso contrário, o diamante se desgastará em apenas uma aresta, resultando em uma perda de eficiência no processo devido ao aumento das forças.

Durante a dressagem com dressadores de ponta única, ocorre o macro efeito e o micro efeito. O macro efeito é causado pelo formato do dressador e pelas condições de dressagem, determinando a disposição das arestas cortantes na topografia do rebolo. Isso resulta na formação de uma rosca na superfície do rebolo, que é gerada pela combinação dos movimentos relativos entre o dressador e o rebolo. O micro efeito, conforme definido por Malkin (1989), é gerado pelo arrancamento dos grãos desgastados do ligante pela fratura, o que cria novas arestas de corte.

Além disso, a lisura do rebolo durante a dressagem depende do grau de recobrimento U_d , que é determinado pelo número de vezes que um ponto da superfície do rebolo é recoberto pelo dressador. Esse parâmetro pode ser calculado usando a Equação (10).

$$U_d = \frac{b_d}{s_d} \quad (10)$$

Onde: bd é a largura útil do dressador e sd é o avanço por volta do dressador (Rowe, 2014). Um aumento nesse parâmetro resulta em uma superfície mais lisa, mas também aumenta as forças de retificação e a energia específica. Por outro lado, um valor baixo de grau de recobrimento resulta em uma superfície mais afiada, porém com maior rugosidade.

A Figura 8 apresenta três interpretações físicas diferentes para os valores do grau de recobrimento

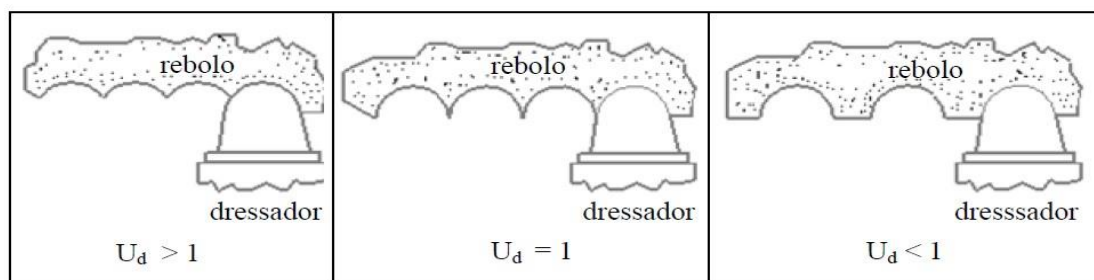


Figura 8 Influência do grau de recobrimento de dressagem na topografia do rebolo (OLIVEIRA, 1988).

No caso dos dressadores conglomerados, eles possuem múltiplos pontos de corte, o que resulta em uma vida útil mais longa. Além disso, é possível criar diferentes formatos de dressadores para lidar com os diversos tipos de rebolos. Esse tipo de dressador possui um arranjo espacial de grãos que permite avanços maiores na dressagem e uma largura de dressagem mais ampla. No entanto, nessas condições, os resultados da dressagem podem ser imprevisíveis (ROWE, 2014).

Em relação aos dressadores rotativos, eles possuem uma vida útil maior devido à presença de uma maior quantidade de diamantes em comparação com os dressadores de ponta única. Existem dois tipos de dressadores rotativos: um disco estreito com uma camada de diamantes em sua periferia ou um formato de copo com uma camada de diamantes em sua borda. Este último substitui o dressador de ponta única e é usado de maneira semelhante, movendo o dressador transversalmente na superfície do rebolo.

Uma vez que os dressadores rotativos são mais finos do que os rebolos a serem dressados, Klocke (2009) afirma que eles devem ter um movimento lateral. Além disso, os dressadores em formato de copo são normalmente utilizados para dressar rebolos em produção em série. No entanto, eles estão limitados à aplicação em rebolos com perfis

simples, pois rebolos com perfis não lineares são dressados com dressadores em formato de disco.

2.10. Fluido de corte

Durante o movimento relativo de corte entre a peça e a ferramenta, a maior parte da energia fornecida à máquina é convertida em calor, chegando a aproximadamente 99%. Ao usinar um material ferroso, a temperatura aumenta com a velocidade, enquanto a força da ferramenta diminui. Isso resulta em um desgaste mais rápido da ferramenta e pode até levar a uma falha prematura (BRUNI et al., 2006).

A remoção de material em processos abrasivos é problemática devido às altas temperaturas envolvidas, como destacado por Barczak et al. (2010). Portanto, é de extrema importância garantir uma lubrificação e refrigeração eficazes para evitar que a temperatura se torne excessiva. Oliveira et al. (2012) afirmam que o fluido de corte desempenha um papel fundamental nesse sentido, reduzindo a temperatura e o atrito, minimizando as forças e o estresse residual na peça. Além disso, Debnath et al. (2014) enfatizam que o fluido de corte também melhora a qualidade final da peça, proporcionando um melhor controle dimensional e uma superfície de qualidade superior. Vale ressaltar que a melhoria na qualidade superficial não se limita apenas à aparência, uma vez que uma baixa rugosidade favorece a resistência à corrosão da peça e reduz as tensões residuais. O fluido de corte também desempenha a função de remover os cavacos gerados durante a operação de corte.

Embora a usinagem em alta velocidade resulte em maior produtividade, a alta temperatura gerada durante o processo limita a velocidade de corte devido ao desgaste da ferramenta. O uso de uma ferramenta desgastada aumenta o consumo de energia e compromete a qualidade do acabamento superficial da peça. Portanto, é necessário resfriar a zona de corte de forma a aumentar a vida útil da ferramenta e, consequentemente, manter a qualidade do acabamento da peça (SHARMA; TIWARI; DIXIT, 2016). Seguindo essa mesma linha de pensamento, Sanchez et al. (2010) ressaltam a importância de remover grandes quantidades de energia térmica do processo, pois, caso contrário, podem ocorrer queima da peça e deformações induzidas pelo calor.

Ao analisar o aumento da temperatura na zona de corte, Malkin & Guo (2008) afirmam que diversos tipos de danos térmicos podem surgir, como queima da peça,

transformação da estrutura, alteração da dureza superficial, tensões residuais desfavoráveis, trincas na peça e no rebolo, além de redução da resistência à fadiga.

Os fluidos de corte são utilizados para melhorar as características dos processos tribológicos que ocorrem no contato entre a peça e a ferramenta. Geralmente, eles contribuem para aumentar a eficiência do sistema de produção no qual são utilizados (SOKOVIĆ; MIJANOVIĆ, 2001).

De acordo com Irani et al. (2005), um dos principais desafios no processo de retificação é o dano térmico, que pode ser mitigado por meio da aplicação de fluidos de corte. Esses fluidos desempenham várias funções essenciais, como resfriar a zona de corte, lubrificar o contato entre a peça e a ferramenta para reduzir o atrito e remover o cavaco resultante. Klocke (2009) também destaca a importância dos fluidos de corte na proteção contra a corrosão da máquina retificadora e da peça, muitas vezes incorporando aditivos anticorrosivos em sua composição.

A viscosidade é uma característica física fundamental dos fluidos de corte, pois está relacionada às suas principais funções: lubrificação e refrigeração. Fluidos de corte de baixa viscosidade têm maior capacidade de resfriamento e são mais fáceis de remover da peça e filtrar. No entanto, eles tendem a gerar mais vapor, formando uma névoa que pode causar irritação na pele e problemas respiratórios.

Os fluidos de corte desempenham um papel crucial na redução da temperatura durante o processo de retificação, removendo o calor diretamente e mantendo a eficiência de corte do rebolo, o que resulta em menor consumo de energia específica (ROWE, 2014). Como resultado dessas funções, os fluidos refrigerantes reduzem a potência necessária para o corte, aumentam a vida útil da ferramenta e contribuem para um melhor acabamento da superfície usinada. No entanto, é importante destacar que os custos associados ao uso de fluidos de corte representam uma parte significativa dos custos totais da peça fabricada (BRUNI et al., 2006).

Portanto, de acordo com Barczak et al. (2010), é crucial controlar a geração de calor no processo de retificação para garantir a qualidade e a integridade térmica da peça final. É importante ressaltar que, devido ao atrito, deformação elástica e remoção de cavaco, as temperaturas na zona de corte podem atingir até 1800°C, porém, essa temperatura é mantida por apenas alguns milissegundos e é proporcional à velocidade de corte. Os autores concluem que o método convencional, no qual o fluido lubrificante é abundantemente aplicado na área de corte com baixa velocidade, é o mais amplamente utilizado na indústria.

2.10.1. Problemas na utilização do fluido de corte durante a retificação

Apesar dos benefícios econômicos do uso de fluidos refrigerantes, seu uso inadequado e métodos inadequados de descarte podem ter sérios impactos na saúde humana e no meio ambiente. Além disso, esses fluidos representam de 16% a 20% do custo total de fabricação na indústria de produção (SHARMA; TIWARI; DIXIT, 2016).

As várias substâncias presentes nos fluidos de corte podem afetar os operadores de máquinas por meio do contato com a pele, ingestão, inalação e irritação causada pela névoa formada pela evaporação do fluido. Após o uso, os fluidos de corte podem ser descartados internamente na empresa ou externamente por meio de empresas especializadas em eliminação de resíduos (SOKOVIĆ; MIJANOVIĆ, 2001).

De acordo com Bruni et al. (2006), a forma como esses fluidos são descartados pode resultar na poluição da água, solo e/ou ar. A resolução 430/11 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) estabelece que a quantidade de óleo mineral, animal e vegetal presente na água deve ser zero, o que obriga as indústrias a adotarem práticas adequadas de descarte. No entanto, o descarte correto implica em um aumento significativo nos custos para as empresas.

Durante o uso, os fluidos de corte sofrem alterações, pois novas substâncias são formadas ou aderem a eles, além da presença de corpos estranhos e micro-organismos. Originalmente, esses fluidos já apresentam riscos para a saúde, mas esses riscos aumentam ao longo de sua vida útil (SOKOVIĆ; MIJANOVIĆ, 2001).

Levando em consideração todos os efeitos negativos dos fluidos de corte no meio ambiente e na saúde humana, há uma crescente exigência na escolha de fluidos que sejam eficazes, ambientalmente amigáveis e estejam em conformidade com as normas regulatórias. Normalmente, os parâmetros ecológicos dos fluidos de corte impõem restrições adicionais aos parâmetros de usinabilidade. Portanto, a busca por fluidos de corte de qualidade e ecologicamente corretos tornou-se um interesse comum (SOKOVIĆ; MIJANOVIĆ, 2001).

Nessas condições, a indústria está cada vez mais buscando se adequar aos padrões de sustentabilidade, com uma visão mais consciente do meio ambiente (UMEDA et al., 2012). Consequentemente, as pesquisas científicas estão se esforçando para estudar a sustentabilidade dos processos abrasivos, seguindo essa tendência (AURICH et al., 2008).

2.10.2. Custos dos fluidos de corte

Os custos totais da usinagem são influenciados por diversos fatores, incluindo o custo da máquina (desgaste, funcionários, fluidos de corte e manutenção), localização e consumo de energia (WINTER; HERRMANN, 2014).

Conforme destacado por Walker (2013), os gastos com fluidos de corte no método convencional são altos em comparação com outras despesas. É importante considerar que esses custos envolvem a aquisição, manutenção e descarte dos fluidos. Estima-se que essas despesas variem entre 8% e 16% dos custos totais de produção, chegando a ser superiores aos gastos relacionados às ferramentas de corte (DHAR; KAMRUZZAMAN; AHMED, 2006). Portanto, torna-se justificável a redução do uso de fluidos de corte (WALKER, 2013).

Além dos fatores mencionados anteriormente, a reciclagem, medidas de segurança e outros aspectos também acarretam custos na utilização de fluidos de corte, como aponta Alberdi et al. (2011). Na indústria automobilística, por exemplo, os fluidos refrigerantes representam de 15% a 30% dos custos de fabricação (RABIEI et al., 2015).

2.10.3. Manutenção e descarte

A utilização de fluidos de corte em operações de usinagem inevitavelmente leva ao acúmulo de pequenas quantidades de materiais, como pedaços de rebolo e cavacos. Esse acúmulo resulta na proliferação de microrganismos devido à alta concentração de compostos orgânicos presentes nos fluidos. Consequentemente, ocorre uma mudança na composição química, alterando as propriedades fundamentais do fluido, o que leva ao aumento do desgaste da ferramenta e à produção de peças defeituosas (OLIVEIRA et al., 2012).

O monitoramento e a manutenção da qualidade dos fluidos de corte são dois elementos essenciais para o sucesso do processo de redução do consumo de fluidos na fonte. Os aspectos mais relevantes desse monitoramento incluem inspeções do sistema, medidas e ajustes periódicos dos parâmetros (como concentração, pH e crescimento microbiológico), correção apropriada de biocidas, remoção de óleo contaminante e cavacos (HUI et al., 2006).

A estocagem adequada dos fluidos de corte também é um ponto crucial para garantir sua qualidade. A temperatura é um parâmetro a ser observado, evitando temperaturas extremas. Os fluidos de corte solúveis em água requerem cuidados

adicionais de estocagem em comparação com os óleos integrais, devido à complexidade de sua composição química e maior suscetibilidade a mudanças físicas causadas por temperaturas extremas (HUI et al., 2006).

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

O descarte adequado dos fluidos de corte tem se tornado cada vez mais importante na indústria devido à pressão das leis ambientais, que exigem procedimentos específicos para o descarte de diferentes tipos de fluidos (LAUER-SCHMALTZ; KÖNIG, 1980). Sokovic & Mijanovic (2001) descrevem alguns desses procedimentos.

No caso dos óleos integrais, eles podem ser vendidos para refinamento ou reciclados pelo fabricante do fluido ou por empresas especializadas. Também é possível incinerar esses óleos refrigerantes em caldeiras, desde que atendam às normas ambientais, ou seja, estejam isentos de impurezas, secos e apresentem baixas concentrações de enxofre e cloro.

Para os fluidos de corte solúveis em água, é necessário separar o óleo e outros produtos químicos dissolvidos na água. Mesmo após essa separação, esses fluidos não devem ser descartados diretamente no sistema de esgoto.

Os processos de descarte de emulsões podem ser químicos, físicos ou físico-químicos, dependendo do estado da emulsão, de sua composição e dos custos associados ao processo. Todos esses procedimentos envolvem a quebra da emulsão, a separação do óleo e o tratamento da água resultante, que deve estar em conformidade com as regulamentações para descarte adequado (HUI et al., 2006).

Entre os processos físicos mais utilizados estão a ultra filtração e a quebra térmica. Na ultra filtração, a emulsão passa por membranas tubulares com poros que impedem a passagem de moléculas de óleo, promovendo a quebra da emulsão. No processo de quebra térmica, a separação da fase oleosa da fase aquosa ocorre pelo aquecimento da emulsão e subsequente evaporação do óleo.

Portanto, a reciclagem dos fluidos de corte pode ser uma alternativa viável, uma vez que os resíduos poluentes são separados e removidos, permitindo que o fluido seja reutilizado em conjunto com um refrigerante limpo. Isso reduz a frequência de descarte e tem um impacto direto nos custos do processo de usinagem (HUI et al., 2006).

Por fim, é compreensível que os processos envolvidos no uso de óleos de corte tornem seu uso altamente dispendioso. Isso se deve principalmente aos produtos que não são biodegradáveis, resultando em custos adicionais com tratamento e descarte adequados (SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012). Além disso, o descarte inadequado de fluidos de corte à base de óleo apresenta problemas, como a contaminação da água superficial e subterrânea, bem como a poluição do ar e do solo (HADAD, 2015).

Considerando que o descarte dos fluidos de corte é um fator que eleva significativamente o custo do processo, o uso de técnicas alternativas de lubrificação e refrigeração se torna extremamente interessante.

2.10.4. Mínima quantidade de lubrificante – MQL

A técnica conhecida como Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), conforme explicado por Bianchi et al. (2012), envolve a aplicação direta de um jato de ar comprimido contendo uma quantidade mínima de fluido de corte na zona de corte. É fundamental que essa quantidade seja suficiente para reduzir o atrito e evitar a aderência de materiais.

Essa abordagem, de acordo com os mesmos autores, utiliza uma pequena quantidade de óleo lubrificante combinada com um fluxo de ar comprimido. Essa combinação forma uma névoa que é direcionada para a região de contato entre a peça e o rebolo. Ao reduzir o atrito nessa zona de contato, o calor gerado durante o processo de retificação é reduzido, garantindo a integridade da ferramenta e da peça devido às baixas temperaturas.

No entanto, conforme apontado por Malkin e Guo (2008b), a lubrificação convencional na retificação não é tão eficiente, pois o fluido não consegue penetrar adequadamente na zona de contato entre a peça e o rebolo. Além disso, o alto volume de fluido pode ter efeitos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente.

Emami, Sadeghi e Sarhan (2013) afirmam que a técnica MQL reduz os custos de produção devido à menor quantidade de fluido de corte, podendo alcançar uma redução de até 20% nos custos totais do processo. Além disso, problemas respiratórios e dermatológicos são eliminados, e há uma redução na contaminação do solo e da água devido ao descarte inadequado. Diante desse contexto, fica evidente a importância de buscar alternativas de lubrificação e refrigeração.

No estudo realizado por Lopes et al. (2018a), os autores concluíram que a combinação da técnica MQL com a limpeza do rebolo é uma alternativa viável à aplicação

convencional de fluidos de corte na retificação. Embora tenha havido uma redução de desempenho em algumas variáveis, a técnica MQL está associada a uma considerável redução de custos.

No estudo de RUZZI et al. (2020), a retificação de aço AISI 4340 utilizando rebolo de óxido de alumínio foi investigada. Os autores relataram que a utilização do MQL melhorou a rugosidade média em maiores velocidades de mergulho, apresentando valores menores em comparação com a lubrificação convencional. Esse efeito pode ser atribuído ao uso do jato de ar comprimido na técnica MQL, que rompe a barreira de ar formada ao redor do rebolo durante a retificação. Ao contrário, na lubrificação convencional, uma barreira de ar pode estar presente devido à menor pressão do fluido de corte, a menos que a velocidade do jato de fluido de corte seja maior que a velocidade de corte. Além disso, o MQL apresentou melhor desempenho em relação ao desgaste diametral do rebolo em todas as velocidades de mergulho, devido à sua melhor capacidade de lubrificação em comparação com a lubrificação convencional. Também foram registrados valores mais baixos de potência de retificação após a usinagem com a técnica MQL em comparação com a técnica convencional, devido à melhor lubrificação fornecida pelo MQL.

2.11. Variáveis de saída do processo

Winter et al. (2014) categorizam as variáveis de saída em três camadas distintas. A primeira camada está relacionada à transformação da peça no formato desejado e à obtenção do acabamento adequado. A segunda camada abrange o consumo de energia, os custos envolvidos e os impactos ambientais decorrentes do processo. Por fim, a terceira camada compreende os parâmetros que definem o desempenho da retificação.

Nesta seção, abordaremos as principais variáveis de saída relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

2.11.1 Rugosidade

A rugosidade superficial se refere às pequenas variações geométricas na superfície do material usinado. Essas variações são resultantes do perfil da ferramenta e de outras irregularidades presentes (CARPINETTI, 2000).

No entanto, no contexto da retificação, a compreensão da rugosidade é altamente complexa, conforme destacado por Winter (2004). Isso ocorre porque o resultado final da

rugosidade depende de vários parâmetros, como a composição da peça e do rebolo, a dressagem, o fluido de corte, a técnica de lubrificação, bem como fatores como a rigidez do equipamento, a velocidade de remoção, a granulometria do rebolo, entre outros. Esses parâmetros são de suma importância, uma vez que influenciam a força de corte, resultando em alterações na rugosidade superficial ao final do processo.

Conforme mencionado por Carpinetti (2000), é possível quantificar a rugosidade por meio da amplitude (altura) e espaçamento (largura) das irregularidades na peça. Alguns dos parâmetros comumente utilizados são: Rugosidade média (Ra), Rugosidade média quadrática (Rq), Máxima distância entre pico e vale (Rt), Média das distâncias entre saliências (Sm), Fração de contato (tp), Média da inclinação das irregularidades do perfil (Δa), entre outros.

Para medir a rugosidade, é comum utilizar dispositivos eletrônicos, como o rugosímetro. Esse instrumento obtém o valor da rugosidade ao movimentar um apalpador sobre a superfície da peça, registrando as variações das irregularidades presentes na superfície usinada.

2.11.2. Relação G

O desgaste do rebolo durante a retificação pode ser observado não apenas pela redução de seu diâmetro, mas também pela diminuição volumétrica. De acordo com Liao et al. (2000), existem três formas de desgaste do rebolo: atrito entre a peça e o grão abrasivo, fratura do ligante e fratura do grão. Esses desgastes podem ocorrer devido às demandas do processo de retificação ou à deterioração térmica do ligante.

Uma medida utilizada para expressar o desgaste total do rebolo é a relação "G", definida como a taxa volumétrica de material removido em relação ao volume desgastado do rebolo. Essa relação é um indicativo do desempenho do rebolo. Conforme descrito por Lauer-Schmaltz e König (1980), a relação "G" pode ser determinada matematicamente pela Equação (11).

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

Onde Z_w representa o volume de material removido e Z_s é o volume desgastado do rebolo.

O desgaste do rebolo está frequentemente relacionado à qualidade da rugosidade superficial da peça e às tolerâncias exigidas. Aumentar a taxa de remoção de material na retificação tende a reduzir a relação G , o que resulta em um acabamento de superfície inferior. A utilização de fluidos de corte pode aumentar a relação G , uma vez que eles reduzem a temperatura durante o processo de usinagem (MALKIN, 1989).

2.11.3. Circularidade

O desvio de circularidade refere-se a qualquer diferença ou desvio entre a peça usinada e a peça projetada, em relação às tolerâncias especificadas (JEDRZEJEWSKI; MODRZYCKI, 1997).

De acordo com Holesovsky e Hrala (2004), a precisão de uma peça na retificação é determinada por diversos fatores, incluindo a precisão da máquina de retificação, o desgaste do rebolo, as vibrações do conjunto, a taxa de remoção de material e a energia específica.

O atrito que ocorre entre a peça e a ferramenta durante a retificação é um fator crucial no surgimento de erros de circularidade. Nesse sentido, a aplicação de um fluido de corte adequado tem o potencial de reduzir o atrito e, consequentemente, aumentar a qualidade geométrica final da peça (MINKE, 1999).

2.11.4. Microscopia confocal

De acordo com Neauport et al. (2009) e Fine et al. (2006), a microscopia confocal está emergindo como uma ferramenta altamente eficaz na caracterização da superfície e subsuperfície de uma variedade de materiais. Seu funcionamento consiste em direcionar luz monocromática à superfície da peça e coletar a luz refletida. Essa técnica opera de maneira semelhante a um microscópio óptico, onde uma fonte de excitação emite luz que passa por um orifício posicionado em um plano conjugado (confocal) com o ponto de estudo da amostra, e um segundo orifício está localizado em frente ao detector (BORATTO et al., 2014).

Uma vantagem é que ela é uma técnica de seccionamento óptico não destrutiva, permitindo a visualização em 3D da superfície do material (topografia) ou até mesmo da estrutura interna de materiais semitransparentes (estudo abaixo da superfície). Um mapa bidimensional da luz capturada é obtido ao escanear a superfície com um feixe de laser. Dessa forma, é possível obter informações sobre o perfil de profundidade, pois o

microscópio confocal tem a capacidade de focar a luz incidente na superfície ou abaixo dela, e apenas a luz proveniente desse ponto focal é coletada usando uma abertura confocal. É importante ressaltar que o material a ser analisado deve ser transparente à luz incidente para que possa ser completamente estudado.

Quando utilizado no modo de reflexão, como mencionado por Klopstein e Lucca (2011), a intensidade da luz refletida é medida, fornecendo informações sobre defeitos ou regiões de espalhamento abaixo da superfície. As resoluções espaciais lateral e de profundidade são comumente limitadas a aproximadamente 1 μm .

Denkena et al. (2015) utilizaram a microscopia confocal para medir a rugosidade superficial de uma peça, permitindo uma comparação visual e quantitativa do acabamento. No estudo de Tahvilian et al. (2015), a microscopia confocal foi empregada para analisar a topografia de rebolos usados na restauração de turbinas, devido à capacidade desse microscópio de analisar a superfície em 3D. A partir do microscópio confocal, foi possível quantificar a altura dos grãos do rebolo. Os autores destacam ainda que esse método de análise proporciona uma excelente distinção entre os grãos e o ligante do rebolo.

2.11.5. Potência de retificação

De acordo com Malkin (2008), a potência de retificação (P) está relacionada às componentes tangencial (F_t) e normal (F_n) da força de corte, conforme a Equação (12).

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

Onde v_s é a velocidade do rebolo e v_w é a velocidade da peça. O sinal de adição deve ser utilizado quando a direção da velocidade do rebolo é oposta à da peça, e o sinal de subtração é utilizado quando elas têm a mesma direção.

No entanto, devido à diferença geralmente significativa entre a velocidade da peça e a velocidade do rebolo, a Equação (12) pode ser simplificada para a Equação (13):

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

Segundo Rowe (2014), o ciclo de potência é dividido em estágios como ilustrado na Figura 9. Inicialmente, o rebolo gira sem carga, resultando em uma potência dissipada

(P_{NL}) devido ao atrito do motor e dos mancais. Em seguida, com a ativação do fluido de corte, há um aumento na potência dissipada (P_f) devido à resistência causada pelo fluido ao giro do rebolo. A potência dissipada P é resultante do contato entre o rebolo e a peça, e depois ocorre o período de spark-out, no qual a potência se estabiliza e diminui.

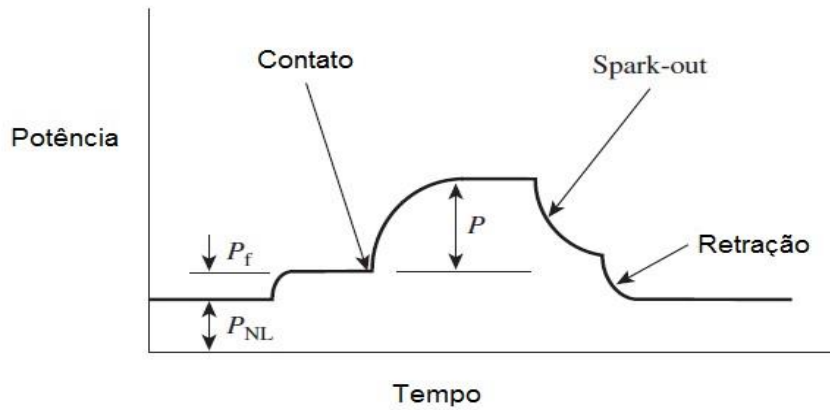


Figura 9 Ciclo de variação da potência (Rowe, 2014-modificado).

2.11.6. Análise de custos e poluição no processo de retificação

Field et al. (1980) desenvolveram uma técnica para avaliar o custo e o tempo em três diferentes tipos de processos de retificação, incluindo a retificação cilíndrica externa de mergulho. Essa técnica permite uma análise detalhada dos fatores que influenciam o custo. Em seu trabalho, os cálculos de custo foram realizados utilizando computadores e calculadoras programáveis.

Posteriormente, Sato et al. (2022) utilizaram o trabalho de Field et al. (1980) como referência e fizeram adaptações para a análise de custos. Além das análises das variáveis de saída, os autores apresentam o custo por peça para cada condição de usinagem. A Equação (14) utilizada pelos autores é descrita a seguir:

$$C = \frac{C_s \cdot V}{G} + \frac{\pi \cdot b_s \cdot C_s}{N_d} (d_s \cdot a_d - a_d^2) + \frac{v_{jet} \cdot a_e}{N_c \cdot v_w} \cdot (C_f + C_w) + \frac{P_c \cdot C_e}{60000} \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (14)$$

A Equação (14) considera três principais fatores: o custo do rebolo, o custo do fluido e o custo da energia. O custo do rebolo leva em conta o desgaste durante a retificação e a dressagem necessária. O custo do fluido é o custo de compra e descarte do fluido de corte. O custo da energia é o custo da energia utilizada no processo de retificação e nos equipamentos de lubrificação e refrigeração. Dessa forma, é possível obter o valor do custo por peça em US\$ para cada método analisado.

Os mesmos autores avaliaram o custo por peça comparando a lubrificação e refrigeração mínima (MQL) com a lubrificação e refrigeração convencional na retificação de aço AISI 4340. Além disso, eles também avaliaram o MQL em conjunto com a limpeza do rebolo. Os autores concluíram que o MQL reduziu o custo do processo devido à diminuição do custo com fluido de corte. É importante destacar que o uso do MQL resultou em um maior desgaste do rebolo, o que levou a um aumento de custo nesse aspecto. No entanto, a redução do custo com o fluido de corte foi mais significativa do que o aumento do custo com o desgaste do rebolo.

Para a análise da poluição segundo, Winter et al. (2014), há uma falta de estudos experimentais de retificação com análise de custo e poluição com variação de parâmetros de retificação. A análise da poluição consiste na emissão de carbono, energia consumida e quantidade de fluido de corte utilizado no processo. A partir disso, as Equações (15), (16) e (17) possibilitam conhecer os resultados ambientais para cada parâmetro apresentado.

$$CE_{energy} = \frac{(P_c + P_{bo} + P_{air}) * CE_e * 3,6}{60000} * \left(\frac{2R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (15)$$

$$CE_{fluid} = \frac{V_{jet} * k_p * CE_{oil}}{N_c} * \left(\frac{2R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (16)$$

$$CE_{method} = CE_{fluid} + CE_{energy} \quad (17)$$

Os parâmetros e as variáveis dos cálculos serão apresentados mais a diante no decorrer deste trabalho.

2.12. Cerâmicas Avançadas

De acordo com Rodríguez et al. (2022), as cerâmicas avançadas são amplamente utilizadas em diversas aplicações estruturais e funcionais. Em aplicações estruturais, como ferramentas de usinagem, rotores e válvulas, a alta resistência é um requisito fundamental.

Shareef et al. (2022) complementam que as cerâmicas de engenharia possuem diversas propriedades, tais como resistência ao calor, isolamento térmico, resistência à abrasão, alta resistência mecânica, auto lubrificação, estabilidade dimensional,

isolamento elétrico, propriedades não magnéticas, dielétricas, condutividade iônica, emissão de elétrons, fluorescência, transparência, polarização, fotossensibilidade, absorvidade, compatibilidade biológica, atividade catalítica, resistência à corrosão, entre outras. Essa combinação de propriedades torna as cerâmicas úteis em uma ampla gama de aplicações, como motores, selos mecânicos, pás de turbinas, ferramentas, abrasivos, relógios, aquecedores, sensores de gás, transformadores, baterias, diodos laser, ossos e dentes artificiais, trocadores de calor, materiais para reatores nucleares e de fusão, combustível nuclear, entre outros.

As principais cerâmicas avançadas incluem a zircônia, o carboneto de silício, a alumina e o nitreto de silício. No entanto, apesar das propriedades altamente desejáveis desses materiais em ambientes extremos, sua alta fragilidade inerente e baixa resistência ao cisalhamento representam um desafio significativo para a usinabilidade. A usinagem de cerâmicas também é prejudicada por danos na superfície e desgaste excessivo da ferramenta (BHARATHI et al., 2021).

As cerâmicas são naturalmente frágeis e possuem baixa tenacidade à fratura. Os componentes cerâmicos falham sob tensão devido a falhas introduzidas durante o processamento e/ou usinagem. Em materiais otimizados, essas falhas podem ser tão pequenas que estão além da detecção pelas técnicas de avaliação não destrutivas atuais. Como o tamanho, a forma e a orientação das falhas podem variar, a resistência pode variar consideravelmente, tornando as abordagens estatísticas de projeto obrigatórias. Existem dois tipos de defeitos presentes na cerâmica: defeitos intrínsecos, como contornos de grão, poros, aglomerados ou inclusões, que estão distribuídos por toda a massa dos componentes, e defeitos extrínsecos associados ao processo de moldagem ou usinagem, que estão localizados na superfície (RODRÍGUEZ et al., 2022).

Dessa forma, é crucial avaliar os processos de fabricação de cerâmicas, como a retificação, devido à influência da distribuição de defeitos nesses materiais. Segundo Shareef et al. (2022), o uso comercial de cerâmicas avançadas tem sido limitado pela falta de um processo de usinagem eficiente e de baixo custo. Para viabilizar economicamente a usinagem de cerâmicas, dois requisitos essenciais são a obtenção de taxas de remoção de material suficientemente altas e o desenvolvimento de um processo de usinagem que não cause danos superficiais e subsuperficiais ao componente cerâmico. Portanto, é importante estudar a fundo processos de usinagem que tenham o potencial de usar cerâmicas avançadas de maneira eficiente e confiável.

Choudhary et al. (2018) realizaram um estudo sobre a retificação de alumina utilizando rebolo de diamante, comparando a lubrificação e refrigeração convencionais com a lubrificação mínima (MQL). A principal conclusão dos autores foi que a utilização do MQL resultou em maiores deformações plásticas na alumina, enquanto a lubrificação e refrigeração convencionais levaram a mais fraturas frágeis. Além disso, a rugosidade da peça foi menor ao utilizar a lubrificação e refrigeração convencionais. Os autores atribuem esse comportamento ao baixo atrito proporcionado pelo óleo puro no MQL, o que aumentou a deformação plástica e ajudou a manter os picos e vales intactos na superfície da peça. Essa maior deformação plástica gerou um aumento nas tensões residuais na peça.

Portanto, é necessário estudar a retificação de cerâmicas avançadas a fim de atender à demanda por aplicações cerâmicas em projetos. No entanto, é importante avaliar diversos aspectos devido à complexidade desse processo de usinagem.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foram descritos os equipamentos e técnicas utilizados durante a pesquisa experimental. Os testes foram conduzidos no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), localizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (FEB/UNESP), no campus de Bauru, São Paulo.

A metodologia adotada consistiu na realização de experimentos e na obtenção de resultados por meio da análise de parâmetros e variáveis de saída. Diversos testes foram conduzidos para garantir uma maior confiabilidade estatística.

Os experimentos foram realizados em uma retificadora cilíndrica, modelo RUAP515H, fabricada pela empresa Sulmecânica. Essa retificadora está equipada com um sistema CNC Fagor, que proporciona maior precisão e controle durante o processo.

As peças utilizadas no estudo foram fabricadas em forma de anel e confeccionadas com alumina comercial. Essa alumina é composta por 96% de óxido de alumínio e 4% de óxidos fundidos, como SiO_2 , CaO e MgO . A densidade aparente do material é de 3,7 g/cm³. As dimensões das peças são as seguintes: diâmetro externo de 54 mm, diâmetro interno de 30 mm e espessura de 4,5 mm. A geometria da peça de trabalho está ilustrada na Figura 10.

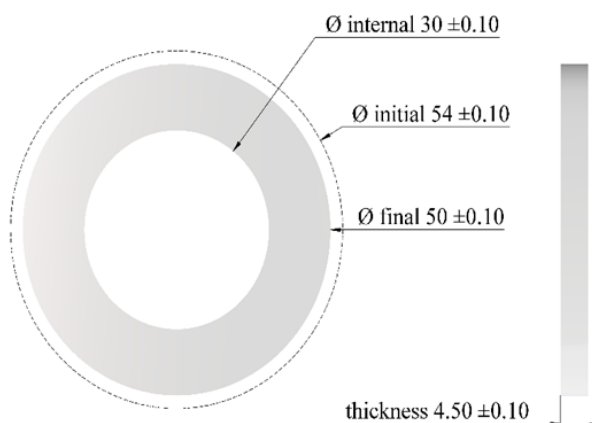


Figura 10 Dimensões da peça

Foi utilizado um rebolo diamantado devido a peça ser de cerâmica. O rebolo é composto por um ligante resínóide com dimensões de 350 mm (diâmetro externo) $\times$ 15 mm (largura) $\times$ 5 mm (camada de abrasivo) e diâmetro interno de 127 mm. A dureza do ligante é N, a concentração de 50 e o tamanho de grão de 126 mm (D107N115C50). A ferramenta é da empresa Nikkon Cutting Tools Ltda. – Grupo Saint Gobain.

Para a aplicação de fluidos de corte, no método de lubrificação convencional, foi utilizada uma emulsão de água com óleo semissintético Rocol 4847 Ultracut 370, composto por anticorrosivos, biocidas, fungicidas, agentes alcalinizantes, antiespumantes, tensoativos não iônicos e alquilolamidas. Essa aplicação foi realizada com uma taxa de fluxo de 17 l/min, utilizando um sistema circulatório de reutilização, mas exigindo um bactericida para controlar as propriedades do fluido de corte.

Para a aplicação de MQL (*Minimum Quantity Lubrication*), foi utilizado um equipamento ITW AccuLube 79053D, cujo funcionamento ocorre pelo princípio de pressurização, envolvendo o bombeamento do fluido de corte por meio de um tubo separado, preenchido com ar comprimido, para atomizar o fluido de corte dentro do bico.

Em seguida, o fluido de corte atomizado é inserido na interface de corte. Essa aplicação foi realizada na mesma velocidade de corte, exigindo uma pressão de 8 bar e uma taxa de fluxo de 100 mL/h. Para a medição da taxa de fluxo de ar comprimido, foi utilizado um medidor de fluxo tipo turbina, modelo SVTG12/12BA4A44BS, fornecido pela empresa Contech, calibrado a uma pressão de 8 kgf/cm². A configuração do setup para os métodos de lubrificação é mostrada na Figura 11.

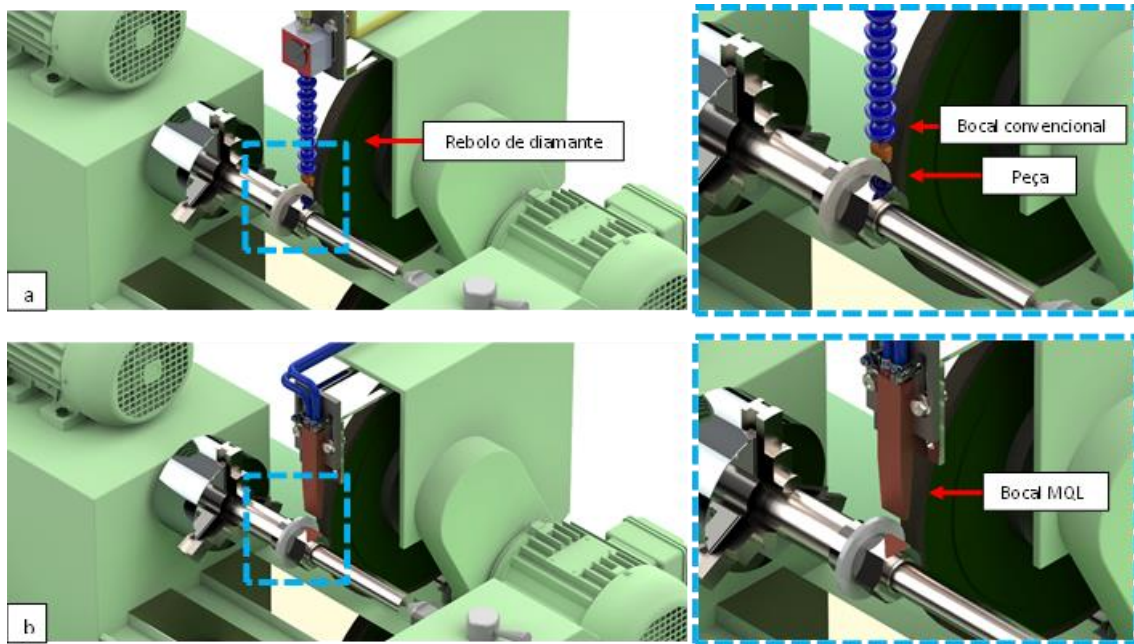


Figura 11 Montagem experimental com (a) lubrificação convencional e (b) MQL

O sistema de jato do bocal de limpeza foi aplicado com ar comprimido, com uma taxa de fluxo de 8 l/s e uma pressão de 8 bar, direcionado para a superfície abrasiva do rebolo. A posição do bico de jato do bocal de limpeza foi variada em 0° , 30° , 60° e 90° , conforme ilustrado na Figura 12. Portanto, o foco foi avaliar a retificação de peças de cerâmica avançada utilizando novas tecnologias de condições de lubrificação, como método de lubrificação convencional, MQL e MQL combinado com quatro posições diferentes dos ângulos do bico em relação ao eixo do rebolo.

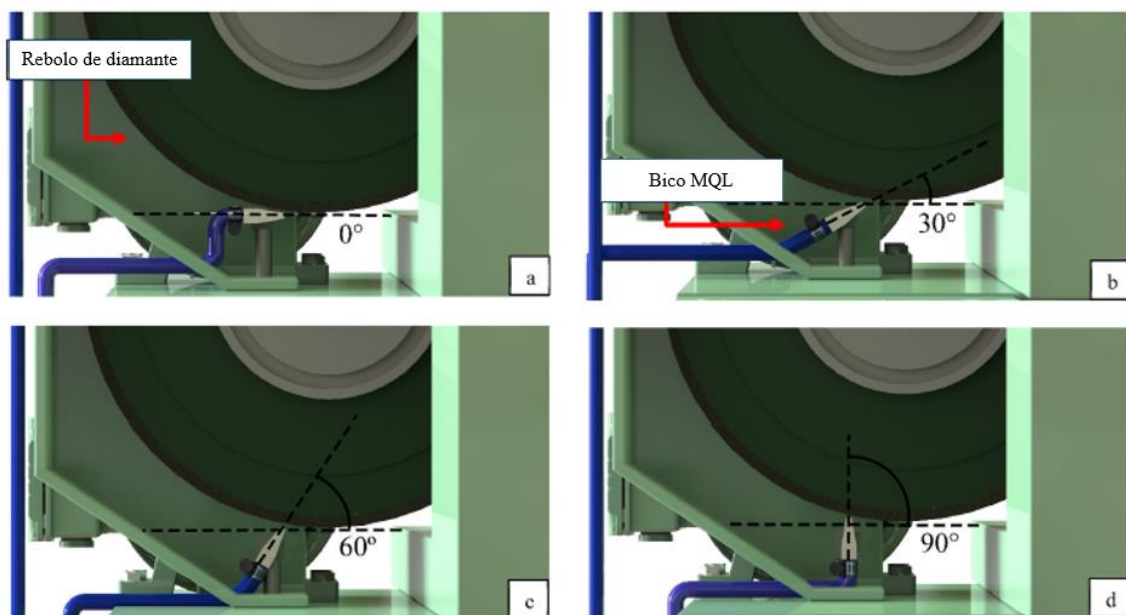


Figura 12 Configuração experimental para diferentes ângulos de bico WCJ, sendo em (a) a representação de 0° , em (b) 30° , em (c) 60° e em (d) 90° aplicação do bico.

Os parâmetros de entrada e saída foram estabelecidos com base na variação do ângulo do bocal do bico WCJ e nos métodos de lubrificação-refrigeração. Neste estudo, a avaliação do desempenho do processo foi realizada em termos de rugosidade, desvio de circularidade da peça, desgaste diametral do rebolo, razão G, potência de retificação e análise de custos. Além disso, a integridade superficial da peça foi examinada por meio de um microscópio confocal.

O parâmetro de rugosidade selecionado foi a média aritmética (R_a), medida com um rugosímetro modelo Surtronic 3+ da Taylor Hobson, com um comprimento de corte de 0,8 mm e uma ponta de medição com raio de 2 μm . As medições de desvio de circularidade foram realizadas em todos os experimentos utilizando o equipamento Taylor Hobson Talyrond 131C.

O desgaste diametral do rebolo foi medido para calcular a razão G. Para essas medições, um cilindro de aço AISI 1020 com 35 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento foi utilizado para imprimir o perfil do rebolo desgastado.

O processo de impressão da superfície desgastada do rebolo em uma barra de aço é ilustrado na Figura 13. Posteriormente, o desgaste diametral do rebolo foi medido por meio de projeção de perfil utilizando o software TalyMap, fornecido pela empresa Taylor Hobson.

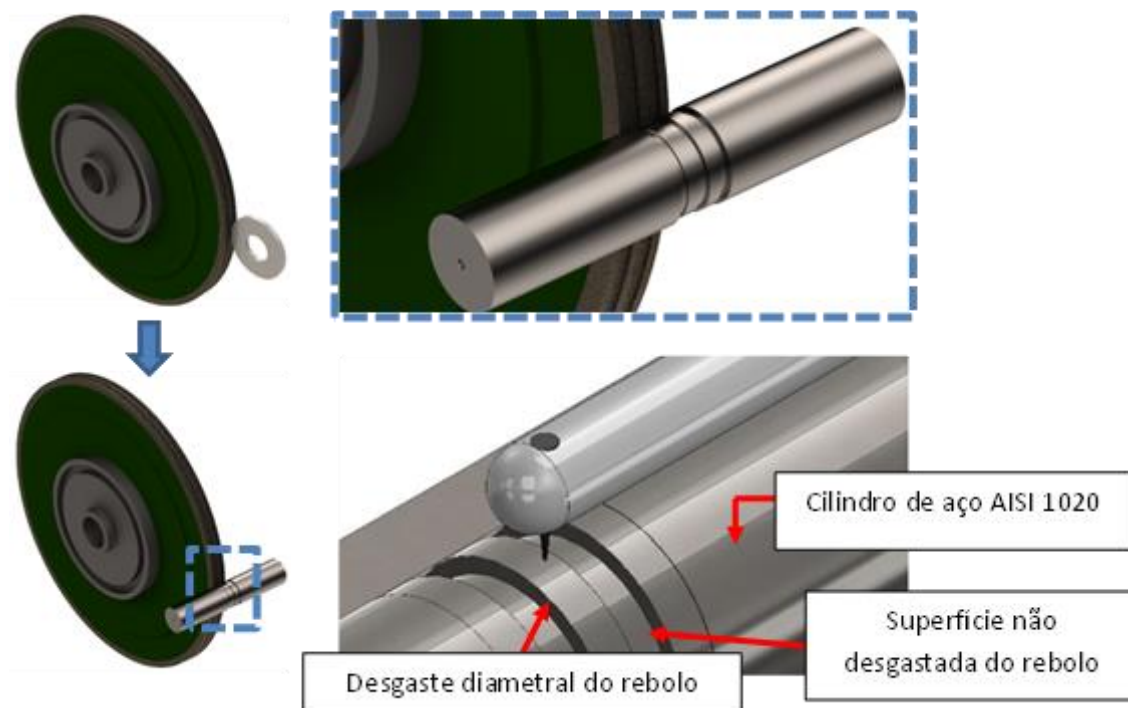


Figura 13 Metodologia para medição do desgaste diametral do rebolo

Por fim, a topografia da peça também foi examinada após o processo de retificação com um microscópio a laser da empresa Olympus, modelo OLS 4000, em ampliações de 20x e 100x.

A potência de retificação foi medida por sensores Hall com uma taxa de aquisição de 2k/s e um codificador para medir a rotação do rebolo. Os sensores e o codificador foram conectados a um módulo Curvepower e a uma placa PCI-6035EDAQ (16 bits) fabricada pela National Instruments. Os dados coletados foram posteriormente processados e analisados nos softwares LabView 7.1 e MatLab.

A potência de retificação foi medida por sensores Hall com uma taxa de aquisição de 2k/s e um codificador para medir a rotação do rebolo. Os sensores e o codificador foram conectados a um módulo Curvepower e a uma placa PCI-6035EDAQ (16 bits) fabricada pela National Instruments. Os dados coletados foram posteriormente processados e analisados nos softwares LabView 7.1 e MatLab.

Atualmente, a análise de custos desempenha um papel essencial na avaliação da viabilidade de novas técnicas. A Equação 14 mostra as variáveis consideradas no cálculo do custo. Os parâmetros utilizados para calcular o custo por peça foram selecionados com base nos estudos de Field (1980) e Pusavec et al. (2010). Para este trabalho, os parâmetros aplicados nas equações 14, 15, 16 e 17 estão apresentados na Tabela 1.

$$C = \frac{C_s \cdot V}{G} + \frac{\pi \cdot b_s \cdot C_s}{N_d} (d_s \cdot a_d - a_d^2) + \frac{v_{jet} \cdot a_e}{N_c \cdot v_w} \cdot (C_f + C_w) + \frac{P_c \cdot C_e}{60000} \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (14)$$

$$CE_{energy} = \frac{(P_c + P_{bo} + P_{air}) \cdot CE_e \cdot 3,6}{60000} \cdot \left(\frac{2R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (15)$$

$$CE_{fluid} = \frac{V_{jet} \cdot k_p \cdot CE_{oil}}{N_c} \cdot \left(\frac{2R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (16)$$

$$CE_{method} = CE_{fluid} + CE_{energy} \quad (17)$$

Tabela 1 Variáveis consideradas para análise de custo e poluição

Símbolo	Descrição	Unidade	Valor
ad	Profundidade de dressagem	[mm]	0.040
ae	Profundidade de retificação	[mm]	2.0
bs	Largura do rebolo	[mm]	5.0
bw	Largura da peça de trabalho	[mm]	4.0
vw	Taxa de avanço	[mm/min]	0.50
tso	Spark-out time	[min]	0.083
Cr	Preço do rebolo	[US\$]	2043.0
ds	Diâmetro externo do rebolo	[mm]	350.0
dmin	Diâmetro mínimo do rebolo	[mm]	340.0
dw	Diâmetro externo da peça	[mm]	54
Ω	Rotação do rebolo	[rad/s]	183.78
Nd	Número de peças de trabalho entre as operações de dressagem	[-]	2.0
R	Distância de avanço rápido	[mm]	300.0
r	Taxa de aproximação e retração rápida	[mm/min]	36000.0
V	Volume de material removido em uma peça durante o processo de retificação.	[mm ³ /min]	1306.9025
Cair	Custo do ar comprimido	[US\$/m ³]	0.0106 (Hitchcox, 2015)
Ce	Custo da energia	[US\$/kWh]	0.12 (Electricity Prices, 2020)
CEe	Emissão de carbon por energia	[kgCO ₂ /MJ]	0.128 (Abellan-Nebot &, 2019)
CEoil	Emissão de carbono por óleo	[kgCO ₂ /l]	3.0616 (Pusavec et al., 2010)
Cs	Custo de um rebolo utilizável	[US\$/mm ³]	0.075397924
Cw	Custo do descarte do fluido de corte	[US\$/l]	0.085 (Demirbas, 2017)
M	Custo de mão de obra	[US\$/h]	20 (Pusavec et al., 2010)

-	-	-	Fuído	MQL
kp	Proporção de diluição do óleo	[-]	0.05	1.0
Pair	Potência do compressor	[W]	0	5500.0
Pbo	Potência da bomba de óleo	[W]	372.85	0
Vjet	Fluxo de fluido	[l/min]	17.0	0.0017
Nc	Número de recirculação de fluido	[-]	10.0	1.0 (Wang, 2020)
Vair	Fluxo de ar comprimido	[m ³ /min]	0	0.85
Cf	Custo do fluido de usinagem	[US\$/l]	0.6875	13.75
G, Pc	Parâmetros de saída	[- ,W]	-	-
			G-ratio	G. Power
			Fuído	33.02 1156.78

	MQL	14.15	1956.01
	MQL+WCJ 0°	16.98	1771.0
	MQL+WCJ 30°	19.81	1693.10
	MQL+WCJ 60°	16.06	1870.0
	MQL+WCJ 90°	15.31	1969.0

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, os resultados obtidos durante e após os ensaios serão apresentados e discutidos para cada variável, parâmetro e ângulo utilizado. Serão incluídas figuras que auxiliarão na comparação e compreensão da técnica, além de explicar alguns fenômenos específicos do processo.

4.1. Rugosidade e desvio de circularidade

O avanço tecnológico acelerado exige processos de fabricação com alta qualidade superficial e dimensional, independentemente dos materiais utilizados. Portanto, à medida que os requisitos aumentam, há uma alta demanda por estudos que possam facilitar ou fornecer soluções para problemas como alta rugosidade superficial ou erro de circularidade (Cramer et al., 2022; Javaroni et al., 2019;)

Atualmente, a busca por eficiência energética é constante no ambiente industrial, incentivada por uma maior conscientização dos impactos ambientais gerados pela indústria, o que torna necessário cumprir a legislação ambiental, como a ISO 14000, tornando o estudo da rugosidade superficial um fator crucial (Awale et al., 2021; Dixit et al., 2012; Li et al., 2022). Superfícies retificadas com valores elevados de rugosidade superficial contribuem para um maior atrito entre componentes mecânicos, aumentando a perda de energia na forma de calor (Jin and Stephenson, 2003; Perez et al., 2008; Talon et al., 2021). Em outras palavras, valores mais altos de rugosidade superficial e erro de circularidade podem resultar em maiores folgas em componentes mecânicos de precisão, levando, em algumas aplicações, a uma perda de eficiência devido a uma maior viscosidade dos lubrificantes que deveriam suprimir a folga atual entre os elementos (de Moraes et al., 2019; Sato et al., 2020). A Figura 14 apresenta os valores de rugosidade superficial para cada método utilizado.

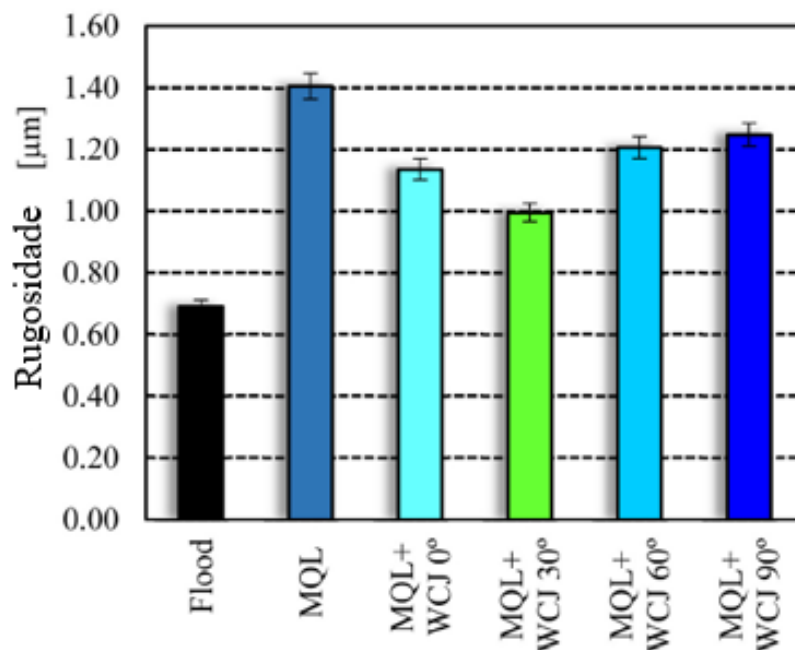


Figura 14 Rugosidade para cada condição de usinagem

Nesse sentido, os resultados de rugosidade superficial e erro de circularidade mostraram que o método de lubrificação convencional apresentou valores de rugosidade superficial 104% menores na retificação de cerâmicas avançadas em comparação com o método MQL. Essa diferença é explicada pela baixa capacidade de resfriamento do MQL, combinada com a dificuldade de manter a superfície de corte do rebolo sem ocorrer o fenômeno de empastamento, o que explica por que o método de lubrificação convencional, embora menos eficiente na aplicação, apresentou os melhores valores para essa análise. Assim, (Javaroni et al., 2020) encontraram resultados semelhantes ao comparar o método de lubrificação convencional com MQL, atribuindo que os grãos abrasivos não conseguiam cortar o material devido à empastamento dos poros. Ainda, outros pesquisadores, como Rodriguez et al. (2019), identificaram que a causa do empastamento se deve à deposição de cavacos camada a camada, soldados por um processo térmico, o que cria um aglomerado de material sobre os grãos abrasivos, impedindo um corte eficiente da superfície. Além disso, deforma a superfície da peça devido à falta de agressividade do grão abrasivo.

Além disso, Lopes et al. (2022) compararam a qualidade superficial do aço para moldes VP50IM retificado sob diferentes condições de lubrificação, analisando um aumento de 12,3% na rugosidade superficial para o MQL em comparação com o método de lubrificação convencional. Da mesma forma, eles concluíram trocas térmicas

mais significativas na região de corte ao usar a técnica de método de lubrificação convencional. No entanto, os métodos têm eficiências semelhantes devido à maior ductilidade do aço em relação às cerâmicas avançadas.

Por outro lado, o método de lubrificação convencional permite que grandes volumes de lubrificação cheguem à interface de corte. Além disso, a água possui calor específico mais elevado que o óleo, contribuindo para um desempenho térmico mais eficiente do método de lubrificação convencional, possibilitando uma menor rugosidade superficial, impacto ambiental temível devido à dificuldade de seu descarte.

Dada essa diferença, existem possibilidades de otimizar o MQL para que a técnica possa melhorar sua eficiência. No entanto, um dos principais obstáculos é a dificuldade de limpeza do rebolo, que pode ser aprimorada pela adição do sistema WCJ (da Silva et al., 2020; Ribeiro et al., 2020; Rodriguez et al., 2020).

Ao analisar os quatro ângulos de incidência aplicados ao sistema WCJ, o ângulo de 0° , o valor de rugosidade superficial foi reduzido em 19% em comparação com o MQL. Ainda, para 30° , 60° e 90° , essas reduções foram de 29%, 14% e 11%, respectivamente. Assim, o ângulo da boquilha que apresentou a maior otimização corresponde a 30° .

Para otimizar o processo de limpeza da superfície de corte, foi necessário romper a barreira aerodinâmica criada pelo deslocamento de ar causado pela rotação do rebolo, em que a incidência do ângulo da boquilha influencia diretamente o fluxo de ar inserido em direção à superfície de corte. Além disso, o movimento de ar causado pelo rebolo combinado com ar comprimido inserido em direção à superfície de corte pelo WCJ aumenta a turbulência na região e aumenta ou diminui a eficiência da limpeza de acordo com o ângulo.

De acordo com a Figura 12, para ângulos que tendem a tangenciar o rebolo, como 0° , a eficiência é baixa em comparação com o ângulo de 30° devido à peça de trabalho. Em seu estudo, Marinescu et al. (2007), afirmam que o controle da temperatura do processo contribui para um menor erro de forma, garantindo maior precisão à peça mecânica e menor desgaste do rebolo.

A Figura 15 apresenta os valores de erros de circularidade para cada método utilizado.

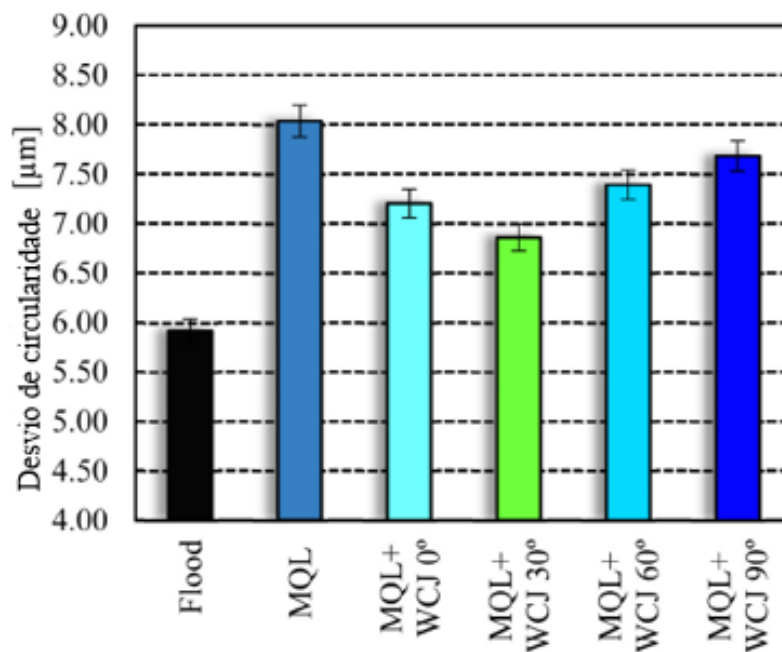


Figura 15 Desvio de circularidade para cada condição de usinagem

Portanto, como o MQL não possui uma capacidade de resfriamento tão intensa quanto o método convencional de método de lubrificação convencional, alternativas como diluir o fluido de corte óleo-água aplicado ao MQL são necessárias para maximizar seu desempenho. No entanto, essa técnica isolada não é relevante para suprimir o alto calor gerado pelo processo, exigindo técnicas auxiliares para contribuir com a refrigeração do sistema. Assim, o sistema WCJ com um ângulo de bico de 30° provou ser o mais viável em termos de posição entre todos os outros ângulos testados.

Nesse ângulo, o atrito do ar comprimido introduzido pelo sistema WCJ contribui para a remoção eficiente dos cavacos, otimizando o corte e mantendo a agressividade do rebolo. Além disso, Bianchi et al. (2019) explicam que o fenômeno de empastamento é formado principalmente devido à sobreposição de camadas de cavacos fundidos pelo calor gerado pelo processo. No entanto, a partir do momento em que a barreira aerodinâmica pode deslocar esse ar de maneira mais eficiente. No entanto, ângulos que tendem a ser normais à direção, como 60° e 90°, não obtêm atrito suficiente para remover uma quantidade expressiva de cavacos dos poros, diminuindo sua eficiência, enquanto os valores de rugosidade superficial estão mais distantes do método de lubrificação convencional. Portanto, o ângulo de 30° permite um equilíbrio entre turbulência e atrito gerados sobre a superfície de corte, obtendo valores próximos ao método de lubrificação convencional.

Semelhante aos resultados encontrados na rugosidade superficial, os valores mostram a mesma tendência na análise do erro de circularidade. Esse comportamento ocorre porque as variações topográficas na superfície de corte do rebolo devido à empastamento influenciam erros de forma mais significativos. No entanto, a elevada temperatura é adicionada a esses eventos porque, de acordo com Malkin e Guo (2008), a retificação é um dos processos de usinagem com maior geração de calor, exigindo um controle bem estabelecido para evitar distorções, ocorre uma menor geração de calor no processo, também ocorre uma menor incidência de empastamento, uma vez que o atrito resultante do posicionamento da boquilha contribui para a remoção de mais cavacos, portanto, a remoção de cavacos mais eficaz diminui significativamente a empastamento. Além disso, aumentar a agressividade do rebolo requer menos energia para cortar o material, ou seja, reduz a geração de calor e diminui os erros de circularidade.

A Figura 16 apresenta a microscopia confocal da superfície retificada relacionada a cada método utilizado. Na topografia 3D, independentemente do método de lubrificação-refrigeração, são observadas crateras na superfície da peça de trabalho. Devido à sinterização de cerâmicas avançadas, os contornos dos grãos de alumina apresentam micro trincas que podem influenciar o desprendimento do grão a partir de uma incidência de maior força ou do aumento do atrito relacionado à peça de trabalho. Assim, enfatiza-se que as temperaturas mais altas atingidas pelo MQL + WCJ em um ângulo de 30° permitem um leve aumento da deformação plástica, levando a um menor número de crateras e, conseqüentemente, a uma menor rugosidade superficial e erro de circularidade. Esses resultados demonstram uma maior homogeneidade da superfície, próxima aos valores encontrados pelo método de lubrificação-refrigeração convencional. Portanto, a técnica apresenta resultados promissores e soluções ecologicamente corretas, contribuindo como uma alternativa a técnica atualmente usada pelas indústrias.

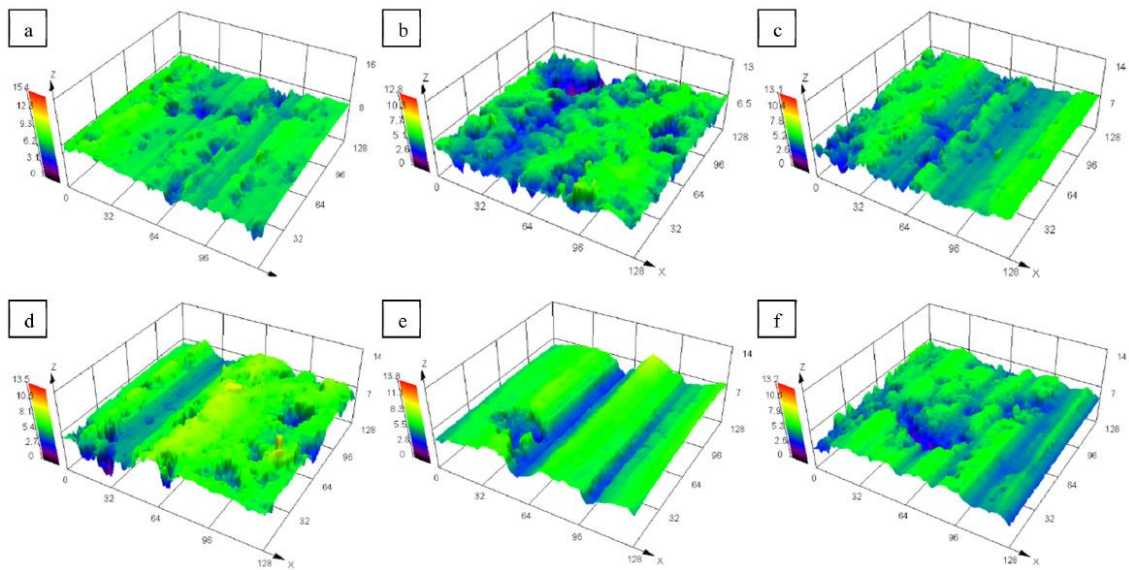


Figura 16 Microscopia confocal das superfícies retificadas pelos diferentes métodos de lubrificação aplicados, sendo em (a) Método de lubrificação convencional, em (b) MQL, em (c) MQL + WCJ 0°, em (d) MQL + WCJ 30°, em (e) MQL + WCJ 60° e em (f) MQL + WCJ 90°.

4.2. Desgaste diametral do rebolo e razão G

O custo do rebolo pode representar até 10% do custo de produção relacionado ao processo de retificação em toda a cadeia produtiva. Portanto, é essencial avaliar o desgaste do rebolo durante a usinagem, pois qualquer variação nas técnicas aplicadas no processo pode influenciar diretamente o custo final das peças devido ao maior consumo de suprimentos. A Figura 17 apresenta o desgaste diametral do rebolo relacionado a cada método utilizado.

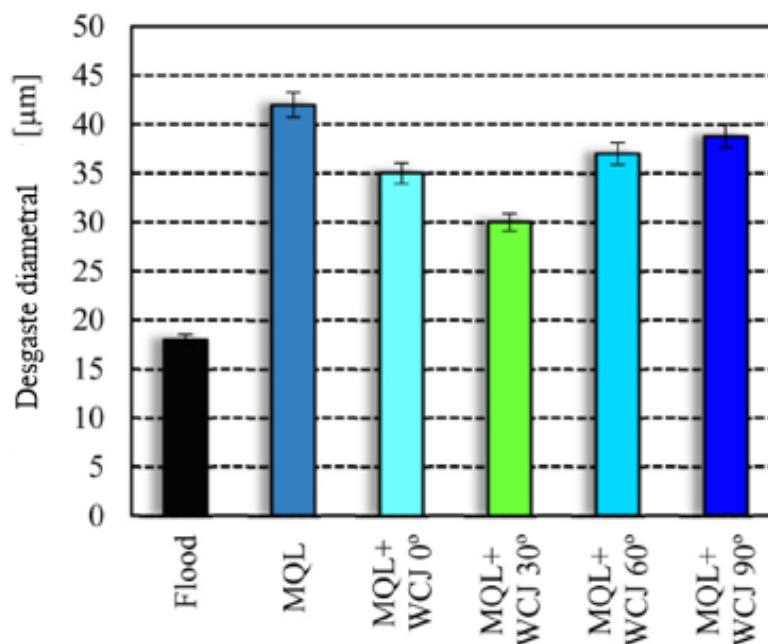


Figura 17 Desgaste diametral do rebolo para cada condição de usinagem

Para o método de lubrificação convencional, o desgaste corresponde a 43% dos valores em comparação com o MQL, ou seja, em relação ao desgaste entre os diferentes ângulos aplicados ao sistema de limpeza do rebolo, o método de lubrificação convencional representa 51% no total. Entre os quatro ângulos avaliados, o menor desgaste foi observado para o ângulo de 30°, sendo que o método de lubrificação convencional correspondia a 60% do valor em comparação com o MQL.

Devido às características de geometria indefinida dos grãos abrasivos, a manutenção do corte ocorre por meio de um mecanismo de friabilidade, pois o grão pode ser mais ou menos friável. Malkin et al. (Malkin e Guo, 2008) explicam que a friabilidade é uma característica dos grãos abrasivos relacionada à sua capacidade de se quebrar e gerar novas arestas de corte.

Além disso, de acordo com De Martini Fernandes (de Martini Fernandes et al., 2018), a friabilidade pode alterar significativamente o processo, pois uma maior geração de arestas de corte aumenta a capacidade de remoção de material, reduzindo a geração de calor e a potência consumida pelo processo. Por outro lado, em situações de menor friabilidade, a geração de arestas de corte torna-se menor, pois os grãos são menos fragmentados, aumentando a área superior dos grãos abrasivos, o que está diretamente relacionado a um aumento na potência de retificação.

No entanto, nos estudos de Lopes et al. (Lopes et al., 2019) e Souza et al. (de Souza et al., 2021), suas análises concluíram um fenômeno semelhante: grãos abrasivos mais friáveis causam irregularidades mais significativas na peça de trabalho do que grãos menos friáveis. Dessa forma, o desgaste maior do rebolo também provoca desvios topográficos mais intensos na superfície de corte do rebolo, criando variações que influenciam a peça de trabalho, como precisão geométrica, dimensional e superficial.

O desgaste do grão abrasivo ocorre na zona de contato, que ocorre quando a ferramenta e a peça de trabalho se aproximam (Novoselov et al., 2016); no entanto, a forma real da zona de contato difere de sua representação geométrica devido à variação na área de contato. Além disso, deformações elásticas e térmicas intensificam o desgaste do rebolo durante os espaços na zona de contato entre o rebolo e a peça de trabalho. Devido à melhor capacidade de lubrificação entre o método de lubrificação convencional e o método MQL, os desvios topográficos são mais intensos devido ao aumento do empastamento. Os melhores resultados foram evidenciados pela aplicação de fluido de corte pelo método de lubrificação convencional. No entanto, a aplicação do fluido de corte falha em suprimir o alto calor gerado. A Figura 18 apresenta razão G para cada método experimental usado.

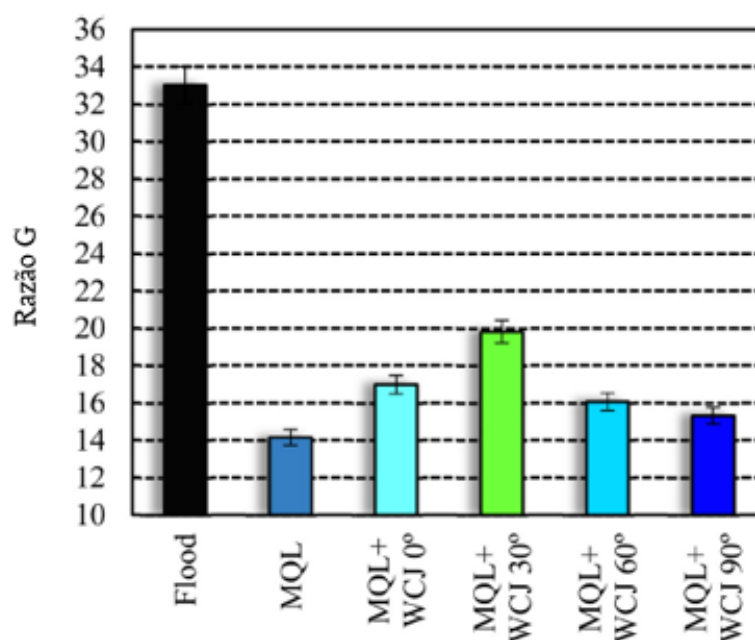


Figura 18 Razão G para cada condição de usinagem

Como resultado, os grãos abrasivos são cobertos por uma camada de material fundido que causa um aumento no desgaste do rebolo. Além disso, uma geração ainda mais intensa de calor aumenta a temperatura na interface de corte, intensificando a friabilidade dos grãos abrasivos, além da deterioração do aglomerante, aumentando o desprendimento dos grãos e, conseqüentemente, aumentando o desgaste do rebolo.

A análise da Figura 18 ainda mostra uma clara vantagem para o método de lubrificação convencional em relação ao método MQL, sendo o único a superar um valor de razão G acima de três dígitos. Para o MQL, a razão G representa 43% do valor do método de lubrificação convencional, enquanto o valor médio entre todos os sistemas de limpeza dos rebolos testados indicou 40% desse valor. A maior razão G entre os métodos relacionados ao MQL foi encontrada quando aplicada ao ângulo de 30°. Embora os resultados entre o método de lubrificação convencional e o jato de limpeza do rebolo com ângulo de 30° ainda não sejam próximos, a técnica ecologicamente amigável avança na fabricação de precisão. Portanto, o WCJ com ângulo de 30° torna-se uma opção para aplicações convencionais de fluido de corte, pois, combinado com outros métodos, pode se tornar competitivo em relação ao processo mais poluente.

4.3. Potência de retificação e força tangencial

Novamente, observa-se que o uso do sistema WCJ interfere diretamente nos valores de potência de retificação, principalmente nos métodos MQL + WCJ a 30° e MQL + WCJ a 90°. No método MQL, os valores de potência de retificação foram significativamente maiores do que os obtidos pelo método de lubrificação convencional. Isso ocorre porque a lubrificação de alta potência do MQL dificulta a remoção dos cavacos na região de corte, o que é menor do que no método de lubrificação convencional, pois remove todos os cavacos dos poros do rebolo. Além disso, é importante considerar que o rebolo de diamante possui um aglomerante de resina que precisa induzir a porosidade por meio do processo de afiação. A Figura 19 apresenta os valores de potência de retificação para cada método utilizado.

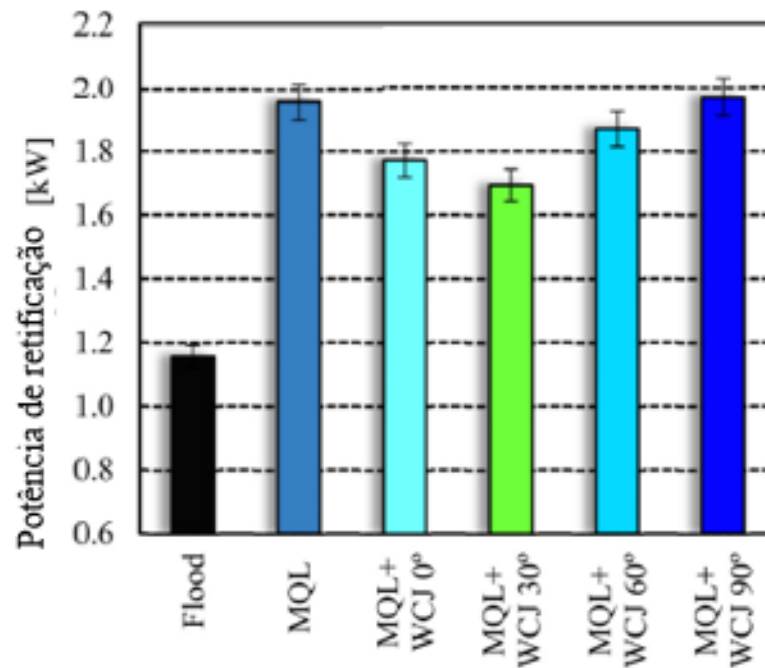


Figura 19 Potência para cada condição de usinagem

Nesse sentido, os cavacos gerados ficam alojados nos poros e, quando em grande quantidade, sem refrigeração, causam empastamento, prejudicando a potência de corte. Além disso, esse fenômeno aumenta o atrito e eleva as temperaturas e o calor gerado, o que também resulta em cavacos, ou seja, o momento em que os grãos abrasivos apenas arranham a superfície da peça sem remoção de cavacos (Marinescu et al., 2007; Rowe, 2014). Portanto, é necessária uma força muito maior para a remoção do material, elevando a potência de retificação e a força tangencial de corte. A Figura 20 apresenta os valores da força tangencial de retificação para cada método utilizado.

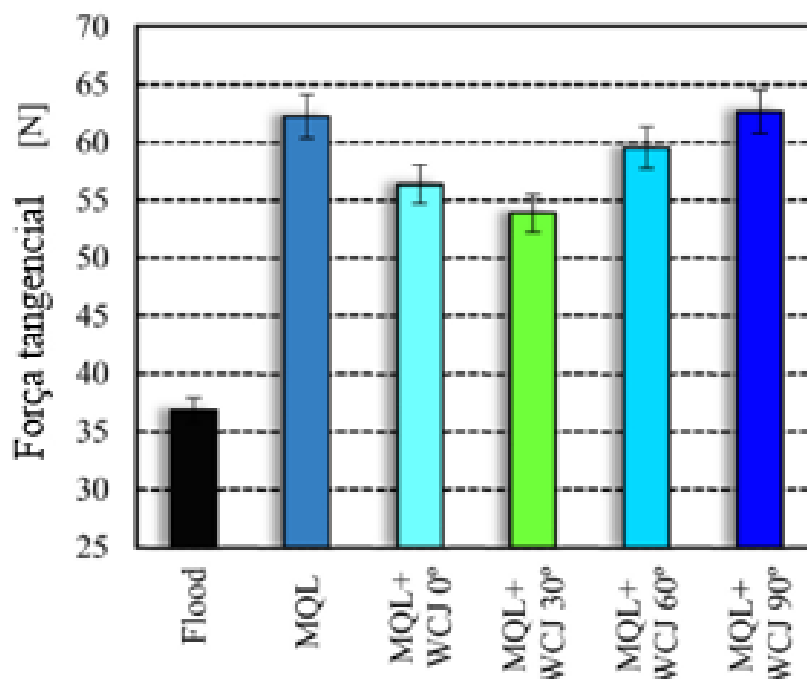


Figura 20 Potência para cada condição de usinagem

Como mencionado anteriormente, a mudança na área de contato que gera maior desgaste no rebolo também pode ser indicada como um fator para o aumento da potência consumida (Novoselov et al., 2016). O método de lubrificação por método de lubrificação convencional é melhor porque a força tangencial de retificação e a potência de retificação podem ser minimizadas, enquanto o calor é reduzido devido ao menor atrito. Assim, os valores de potência aumentam quando a força é necessária para a remoção do material. Por outro lado, o método MQL + WCJ reduziu o consumo de energia em quase todos os testes. No entanto, a melhor condição testada foi o MQL + WCJ a 30°, que mostrou uma redução de 13% em comparação com o MQL tanto nos valores de potência de corte quanto no processo de retificação tangencial.

Em seguida, o jato de ar comprimido do sistema WCJ age como um método de limpeza na superfície do rebolo, reduzindo as forças de corte ao diminuir o empastamento por cavacos e trabalhando com temperaturas menores na interface de corte. Por outro lado, a retificação de cerâmica avançada gera alta energia devido à resistência mecânica elevada e à alta dureza, resultando em esforços maiores, além de cavacos frágeis, exigindo mais potência do sistema, o que contribui para uma maior força tangencial de retificação. Consequentemente, o sistema WCJ associado à técnica MQL reduziu o consumo de energia em quase todos os testes, evitando a adesão e o risco de riscar a superfície da peça.

por empastamento dos cavacos. Além disso, como citado por Dogra et al. (2018), a eliminação da barreira de ar formada na interface do rebolo melhora a eficiência do processo de retificação.

As posições da boquilha de limpeza, conforme mostrado na Figura 12, condicionam a aplicação de ar comprimido contra a direção de rotação, sendo que o posicionamento a 30° foi o mais eficiente para quebrar a barreira de ar e limpar a superfície de corte. Portanto, técnicas relacionadas ao meio ambiente também podem ser aplicadas no âmbito industrial. Embora ainda haja diferença em comparação ao método de lubrificação convencional, o MQL + WCJ a 30° prova ser uma alternativa promissora para mitigar o desperdício industrial do fluido de corte convencional. Esses resultados estão relacionados à indicação encontrada por Winter et al. (2014) de que a eficiência geral de um processo de retificação está relacionada a vários fatores, como o fluido de corte e a potência consumida. Por outro lado, a lubrificação por método de lubrificação convencional apresenta menores valores de consumo de potência e menores valores da força tangencial. Em uma análise geral do processo, é evidente como o uso abundante de fluidos de corte pode gerar custos extras e mais poluição do ponto de vista ambiental, como será evidenciado em análises futuras.

4.4. Custos e análises de poluição

A maioria dos processos de fabricação pode causar danos ao meio ambiente devido ao constante desejo de alcançar lucros e resultados cada vez mais intensos. Portanto, investir em técnicas que visam ações de conduta ambientalmente corretas requer um alto investimento inicial. No entanto, ao longo dos anos, esse investimento tende a ser amortizado, uma vez que os custos trabalhistas e as responsabilidades ambientais se tornam escassos, agregando valor aos produtos devido a processos mais eficientes e otimização de recursos.

A análise de custo de retificação visa quantificar precisamente as despesas durante a retificação. A Figura 21 mostra os custos obtidos para cada condição testada, calculados a partir da Equação (14).

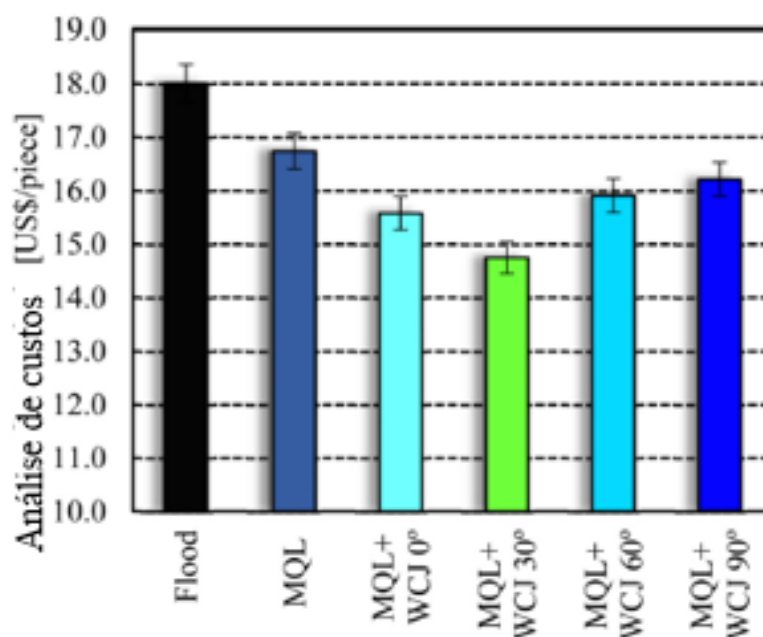


Figura 21 Custo do processo para cada condição de usinagem

De acordo com a Figura 21, observa-se uma tendência de redução nos custos ao substituir o método de lubrificação convencional pelo MQL e MQL + WCJ. Nesse sentido, o MQL + WCJ a 30° apresentou o menor preço de retificação por peça, representando reduções de 22% e 14% em relação ao método de lubrificação convencional e MQL, respectivamente. Essa tendência de redução nos custos dos processos aplicados a técnicas ambientalmente corretas também foi observada nos estudos de Lopes et al. (2022), que analisaram os efeitos do custo nos processos de retificação de aço para moldes, comparando a aplicação de fluido de corte por método de lubrificação convencional e por MQL. Eles concluíram que o MQL é uma boa alternativa do ponto de vista econômico, uma vez que, em média, os custos totais foram reduzidos em 63% ao substituir o método de lubrificação convencional pelo MQL.

A Figura 21 mostra análises de custo de retificação relacionadas a cada método utilizado. Além disso, Sato et al. (2022) afirmam que os custos de aplicação da técnica MQL + WCJ podem ser até 46% menores em comparação com a método de lubrificação convencional, uma vez que a disposição ecologicamente correta do fluido de corte é a principal responsável pelos altos custos de retificação. Ainda, Moretti et al. (2021) afirmam que empresas com conhecimento técnico para a disposição correta de fluidos de corte são responsáveis por aumentar o custo do processo. Essas empresas

agregam valor devido ao seu conhecimento químico para o processamento e separação de resíduos sem contaminação ambiental.

O MQL + WCJ a 30° apresentou o melhor resultado devido ao menor consumo de fluido de corte em comparação com o método de lubrificação convencional. Além disso, ocorre uma melhor eficiência em relação às outras condições de MQL + WCJ. Além disso, a Figura 21 mostra uma redução de 29,9% para 0,6% na participação do custo do fluido de corte. Mesmo com uma porcentagem maior de desgaste do rebolo, o menor custo total foi obtido com o MQL + WCJ a 30°, uma vez que essa técnica utiliza a menor quantidade de fluido de corte no processo, não exigindo disposição especializada.

Diretamente relacionado à aplicação do fluido de corte, era esperado que seu uso fosse o mais poluente entre todos os métodos estudados. A Figura 22 apresenta as análises de poluição da retificação relacionadas a cada método utilizado.

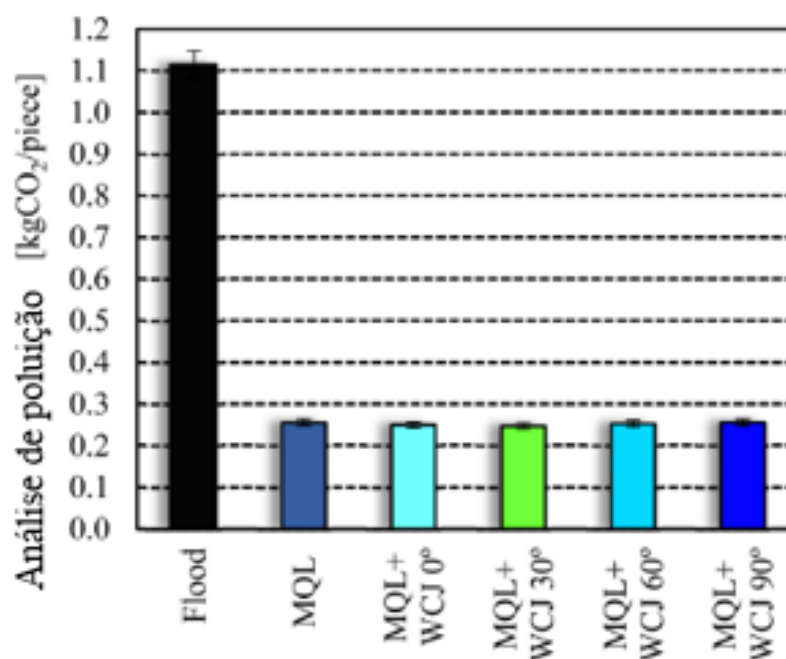


Figura 22 Poluição no processo para cada condição de usinagem

Com base nos resultados, verifica-se a relação de ecoeficiência do processo de retificação de cerâmicas avançadas aplicando MQL + WCJ, considerando o custo apresentado na Figura 21 e a poluição apresentada na Figura 22. Como apontado por Winter et al. (2014), há uma falta de estudos experimentais de retificação com análise de custo e poluição com variação de parâmetros de retificação. Portanto, essa investigação

permitiu determinar a influência da variação nos métodos de lubrificação e refrigeração na qualidade final dos componentes, custo e poluição. Os valores apresentados na Tabela 2 indicam todos os resultados obtidos durante o trabalho. Os valores destacados em vermelho são os valores para a condição de método de lubrificação convencional e em verde são os valores para MQL + WCJ (30°). Este método representa melhor uma retificação mais limpa e econômica para a condição avaliada.

Tabela 2 Resultado comparativo para todas as condições de usinagem

	Flood	MQL	MQL+ WCJ 0°	MQL+ WCJ 30°	MQL+ WCJ 60°	MQL+ WCJ 90°
Rugosidade (Ra) [μm]	0,69	1,40	1,14	1,00	1,21	1,25
Desvio de circularidade [μm]	5,92	8,04	7,20	6,86	7,39	7,68
Desgaste diametral [μm]	18,00	42,00	35,00	30,00	37,00	38,81
Razão G	33,02	14,15	16,98	19,81	16,06	15,31
Potência de retificação [KW]	1,16	1,96	1,77	1,69	1,87	1,97
Força tangencial [N]	36,81	62,25	56,36	53,88	59,51	62,66
Custo [US\$/peça]	18,00	16,74	15,58	14,75	19,91	16,21
Poluição [KgCO ₂ /peça]	1,12	0,256	0,251	0,247	0,253	0,256

Em comparação ao usar novos métodos de aplicação de fluido de corte na indústria, é possível reduzir as emissões de poluentes e diversos gases que causam o efeito estudado. É um fato que todas as aplicações de MQL realizadas neste estudo mostraram ser uma boa opção para o meio ambiente, embora o método MQL + WCJ a 30° tenha se mostrado o melhor entre todos. Além disso, a atualização do método de lubrificação convencional para MQL + WCJ a 30° contribui, além do meio ambiente, para a saúde dos funcionários que trabalham nesses processos. Além disso, a aplicação do método MQL contribui para uma melhoria nos custos em comparação com o método de lubrificação convencional, mostrando a maior aplicabilidade do MQL + WCJ a 30°.

5. CONCLUSÕES

A retificação de cerâmicas avançadas pode ser comparada em diferentes condições de lubrificação e refrigeração, citando o método de lubrificação convencional, MQL e MQL + WCJ com variações no ângulo de incidência do bico. Avaliações baseadas na qualidade final da peça retificada, consumo de energia, análise

de custo e poluição podem indicar que a retificação com menor impacto ambiental é tecnicamente viável.

A rugosidade da superfície e o erro de redondeza obtiveram seus melhores resultados ao aplicar o método de lubrificação convencional. No entanto, o MQL + WCJ a 30° apresentou resultados competitivos em relação ao método de lubrificação convencional, destacando-se por causar um impacto menor no meio ambiente e na saúde dos funcionários. Os outros métodos estudados apresentaram resultados muito diferentes do método de lubrificação convencional devido à menor capacidade de refrigeração do MQL, juntamente com a dificuldade que as diferentes angulações do WCJ têm em remover o empastamento.

Para o desgaste diametral do rebolo e a relação G, a diferença entre o método de lubrificação convencional e os outros métodos é muito mais significativa, chegando a 51%, principalmente devido às temperaturas mais altas durante a retificação. A alta temperatura gerada pelo MQL causou uma transferência de calor ineficiente. Além disso, em alguns casos, a deterioração do aglomerante e a queda dos grãos não permitiram um mecanismo de auto afiação eficiente. Em relação à potência de retificação e à energia tangencial de retificação, o método de lubrificação convencional mostrou-se mais eficaz do que os outros métodos, principalmente devido à maior capacidade de limpeza do rebolo que esse método oferece, permitindo que as arestas cortantes permaneçam limpas e minimizando os esforços na retificação. No entanto, entre os diferentes sistemas de limpeza angular, o ângulo de 30° se destacou por apresentar a menor potência de retificação devido à inclinação eficiente, proporcionando um efeito de alavanca nos cavacos de empastamento.

Ao realizar o estudo das análises de custo de retificação, o método MQL combinado com o WCJ apresentou os menores valores por peça, enquanto o método de lubrificação convencional mostrou-se o mais caro. Essa ocorrência se deve ao alto custo do consumo de fluido de corte, uma vez que todos os custos envolvendo sua compra e descarte se tornam proibitivos devido ao conhecimento de mercado. Assim, apenas empresas que possuem conhecimento para realizar o processo químico para o descarte no ambiente assumem a responsabilidade.

Ao analisar a poluição de CO₂ gerada por todos os métodos, foi observada uma diferença significativa entre os métodos MQL e método de lubrificação convencional. Enquanto o método de lubrificação convencional gerava uma emissão de 1,1 kg.CO₂ por peça, o método MQL + WCJ a 30° emitia 4,5 vezes menos

poluentes de CO₂ para a atmosfera, mostrando ser uma excelente alternativa ambiental e para a saúde dos funcionários.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e estudos deste trabalho, pode-se estabelecer algumas sugestões para trabalhos futuros envolvendo a MQL na retificação de cerâmicas avançadas. Dentre as sugestões de trabalhos futuros, destacam-se a necessidade de comparação com fluidos de corte vegetais e sintéticos, bem como a aplicação da variação da velocidade de avanço durante o processo. Por fim, análises de ecoeficiência mais completas podem ser realizadas, permitindo avanços na fabricação com preservação ambiental.

REFERÊNCIAS

- ALBERDI, R. et al. Strategies for optimal use of fluids in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 6, p. 491–499, 2011.
- ANDERSON, D.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 204, n. 1–3, p. 269–278, 11 ago. 2008.
- ARTINI, C.; MUOLO, M. L.; PASSERONE, A. Diamond–metal interfaces in cutting tools: a review. **Journal of Materials Science**, v. 47, n. 7, p. 3252–3264, 8 abr. 2012.
- AURICH, J. C. et al. High-performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern. **CIRP Annals**, v. 57, n. 1, p. 357–362, 2008.
- AWALE, A.S., Vashista, M., Khan Yusufzai, M.Z, Application of eco-friendly lubricants in sustainable grinding of die steel. **Mater. Manuf. Process**, v. 36, n. 6, p. 702–712. 27, dez. 2020.
- AYODE OTITOJU, T. et al. Advanced ceramic components: Materials, fabrication, and applications. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 85, p. 34–65, 2020.
- AZIZI, A.; REZAEI, S. M.; RAHIMI, A. Study on the rotary cup dressing of CBN grinding wheel and the grinding performance. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 47, n. 9–12, p. 1053–1063, 6 abr. 2010.
- BARCZAK, L. M.; BATAKO, A. D. L.; MORGAN, M. N. A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 11, p. 977–985, 2010.
- BENEDICTO, E.; CAROU, D.; RUBIO, E. M. Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems Used in Machining Processes. **Procedia Engineering**, v. 184, p. 99–116, 2017.
- BHARATHI, V. et al. A review on the challenges in machining of ceramics. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 1451–1458, 1 jan. 2021.
- BIANCHI, E. C. Optimization of ceramics grinding. **Advances in Ceramics-Synthesis and Characterization, Processing and Specific Applications**, 2011.
- BIANCHI, E. C. et al. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado. **Cerâmica**, v. 57, n. 344, p. 431–437, dez. 2011.
- BIANCHI, E. C. et al. Limpeza da superfície de corte de rebolos por um sistema de ar comprimido na retificação cilíndrica externa de mergulho de materiais cerâmicos refrigerados com a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL). **Cerâmica**, 2012.

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

BIANCHI, E.C. et al. 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**, v. 233, n. 4, p. 1144-1156, 2019.

BORATTO, M. H. et al. **Heterojunction between Al₂O₃ and SnO₂ Thin films for application in transparent FET**. Materials Research. **Anais...Universidade Federal de Sao Carlos**, 1 nov. 2014.

BRUNI, C. et al. Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420B. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 12–13, p. 1547–1554, 2006.

BRUZZONE, A. A. G. et al. Advances in engineered surfaces for functional performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 2, p. 750–769, 2008.

CHETAN; GHOSH, S.; VENKATESWARA RAO, P. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, p. 17–34, 1 ago. 2015.

CHOUDHARY, A.; NASKAR, A.; PAUL, S. Effect of minimum quantity lubrication on surface integrity in high-speed grinding of sintered alumina using single layer diamond grinding wheel. **Ceramics International**, v. 44, n. 14, p. 17013–17021, 1 out. 2018.

CRAMER, C. L. et al. Additive manufacturing of ceramic materials for energy applications: road map and opportunities. **Journal of the European Ceramic Society**, v.42, n. 7, p. 3049-3088, jul 2022.

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

DA SILVA, L. R. et al. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant-MQL in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 2, p. 412–418, 2007.

DAMBATTA, Y. S. et al. Ultrasonic assisted grinding of advanced materials for biomedical and aerospace applications—a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 9, p. 3825–3858, 2017.

DANIEL, D. M. et al. 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, v. 109, n. 9–12, p. 2679–2690, 5 ago. 2020.

de MARTINI FERNANDES, L. et al. Comparative analysis of two CBN grinding wheels performance in nodular cast iron plunge grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, n. 1-4, p. 237-249, 2018.

DE MELLO BELENTANI, R. et al. Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 88–96, 2014.

DE MORAES, D. L. et al. Performance of SAE 52100 steel grinding using MQL technique with pure and diluted oil. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 10, p. 4211–4223, 13 dez. 2019.

DE SOUZA, R. R. et al. Effect of grinding with different CBN grains applied to austempered ductile iron linked to quality and industrial cost. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 113, n. 3–4, p. 807–820, 2021.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33–47, nov. 2014.

DENKANA, B.; GROVE, T.; GÖTTSCHING, T. Grinding with patterned grinding wheels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 8, p. 12–21, 1 jan. 2015.

DENKANA, B. et al. Design of bronze-bonded grinding wheel properties. **CIRP Annals**, v. 65, n. 1, p. 333–336, 1 jan. 2016.

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

DING, K. et al. Wear of diamond grinding wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding of silicon carbide. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 71, n. 9, p. 1929–1938, 2014.

DINIZ, A. E.; DE OLIVEIRA, A. J. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 195, n. 1–3, p. 275–281, jan. 2008.

DIXIT, U.S.; SARMA, D.K.; DAVIM, J.P. Green manufacturing. **SpringerBriefs Appl. Sci. Technol.**, v. 9781461423072, p. 1-7, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2308-9_1.

DO NASCIMENTO, W. R. et al. A study on the viability of minimum quantity lubrication with water in grinding of ceramics using a hybrid-bonded diamond wheel.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 230, n. 9, p. 1630–1638, 2016.

DOGRA, M. et al. Environment-friendly technological advancements to enhance the sustainability in surface grinding - A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 218-231, 2018.

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

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

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

GUO, C. et al. Power and wheel wear for grinding nickel alloy with plated CBN wheels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2007.

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

HADAD, M.; SHARBATI, A. Thermal Aspects of Environmentally Friendly-MQL Grinding Process. **Procedia CIRP**, v. 40, p. 509–515, 2016.

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

HOLESOVSKY, F.; HRALA, M. Integrity of ground cylindrical surface. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153–154, n. 1–3, p. 714–721, 2004.

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

JKEDRZEJEWSKI, J.; MODRZYCKI, W. Intelligent Supervision of Thermal Deformations in High Precision Machine Tools. Em: KOCHHAR, A. K. et al. (Eds.). **Proceedings of the Thirty-Second International Matador Conference**. London: Macmillan Education UK, 1997. p. 457–462.

JACKSON, M. J. et al. High-speed grinding with CBN grinding wheels - applications and future technology. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 110, n. 1, p. 78–88, mar. 2001.

JACKSON, M. J. et al. Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 185, n. 1–3, p. 17–23, 30 abr. 2007.

JAVARONI, R. L. et al. Minimum quantity of lubrication (MQL) as an eco-friendly alternative to the cutting fluids in advanced ceramics grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, n. 5–8, p. 2809–2819, 28 ago. 2019.

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

JAYAL, A. D. et al. Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 2, n. 3, p. 144–152, 2010.

JIANG, J. L. et al. 2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 74, p. 29–40, nov. 2013.

JIN, T.; STEPHENSON, D.J. Investigation of the heat partitioning in high efficiency deep grinding. **International Journal of Machine Tool & Manufacture**, v. 43, n. 11, p. 1129–1134, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00123-8).

KING, R. I.; HAHN, R. S.; DEVEREUX, O. F. Handbook of Modern Grinding Technology. **Journal of Engineering Materials and Technology**, 2009.

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

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

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

LAKHDAR, Y. et al. Additive manufacturing of advanced ceramic materials. **Progress in Materials Science**, v. 116, p. 100736, 2021.

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

LEE, J. et al. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. **Manufacturing Letters**, v. 1, n. 1, p. 38–41, 2013.

LI, Y.; LIU, Y.; TIAN, Y.; WANG, Y.; WANG, J. Application of improved fireworks algorithm in grinding surface roughness online monitoring. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 74, p. 400–412, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.046>.

LI, Z. C. et al. Experimental studies on grinding forces and force ratio of the unsteady-state grinding technique. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 129, n. 1, p. 76–80, 2002.

LIAO, T. W.; LI, K.; MCSPADDEN, S. B. Wear mechanisms of diamond abrasives during transition and steady stages in creep-feed grinding of structural ceramics. **Wear**, v. 242, n. 1–2, p. 28–37, 2000.

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

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

LOPES, J. C. et al. Application of a wheel cleaning system during grinding of alumina with minimum quantity lubrication. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 1–4, p. 333–341, 3 maio 2019a.

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

LOPES, J. C. et al. Grinding performance using variants of the MQL technique: MQL with cooled air and MQL simultaneous to the wheel cleaning jet. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 10, p. 4429–4442, 14 dez. 2019c.

LOPES, J. C. et al. Behavior of hardened steel grinding using MQL under cold air and MQL CBN wheel cleaning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 10, p. 4373–4387, 14 dez. 2019d.

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

LOPES, J. C. et al. 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**, v. 120, n. 5, p. 4179–4190, 2022.

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

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

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

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

MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. [s.l.] CRC Press, 2016.

MARINESCU, I. D. et al. **Tribology of Abrasive Machining Processes**. [s.l.] Elsevier, 2013.

MARINESCU, I.; GUO, L.; WEI, P. Basic Research for the UV Fixed Abrasive Lapping Plate. **Applied Mechanics and Materials**, v. 371, p. 95–100, ago. 2013.

MORETTI, G. B. et al. 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**, v. 108, n. 11–12, p. 3661–3673, 23 jun. 2020.

MORETTI, G. B. et al. Industrial manufacturing linked to the mechanical and economic viewpoint of the mold steel grinding process using aluminum oxide wheel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 117, n. 9–10, p. 2655–2666, 2021.

NAKAI, M. E. et al. Evaluation of neural models applied to the estimation of tool wear in the grinding of advanced ceramics. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 20, p. 7026–7035, nov. 2015.

NOVOSELOV, Yu; BRATAN, S.; BOGUTSKY, V. Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear. **Procedia Engineering**, v. 150, p. 809–814, 2016.

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

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

PUŠAVEC, F.; STOIĆ, A.; KOPAČ, J. Sustainable machining process - Myth or reality. **Strojarsstvo**, v. 52, n. 2, p. 197 – 204, 2010.

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

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

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

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

ROBERTO, L. et al. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant — MQL in grinding. v. 47, p. 412–418, 2007.

RODRÍGUEZ, C. et al. Strength of advanced ceramics by the Small Punch Test. Proposal of a simple empirical equation for the Weibull effective volume. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 42, n. 16, p. 7620–7630, 1 dez. 2022.

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

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

RODRIGUEZ, R. L. et al. Grinding process applied to workpieces with different geometries interrupted using CBN wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 3–4, p. 1265–1275, 25 mar. 2020a.

RODRIGUEZ, R. L. et al. Application of hybrid eco-friendly MQL+WCL technique in AISI 4340 steel grinding for cleaner and greener production. **Journal of Cleaner Production**, p. 124670, out. 2020b.

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

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

RUZZI, R. DE S. et al. Topographical analysis of machined surfaces after grinding with different cooling-lubrication techniques. **Tribology International**, v. 141, p. 105962, jan. 2020.

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

SATO, B.K. et al. Toward sustainable grinding using minimum quantity lubrication technique with diluted oil and simultaneous wheel cleaning. **Tribology International**, v. 147, p. 106276, 2020.

SATO, B. K. et al. Eco-friendly manufacturing towards the industry of the future with a focus on less cutting fluid and high workpiece quality applied to the grinding process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 113, n. 3–4, p. 1163–1172, 2021.

SATO, B. K. et al. Novel comparison concept between CBN and Al₂O₃ grinding process for eco-friendly production. **Journal of Cleaner Production**, v. 330, n. September 2021, p. 129673, jan. 2022.

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

SHAREEF, I. et al. Effect of rotary ultrasonic machining parameters on surface integrity of advanced ceramics. **Manufacturing Letters**, v. 33, p. 214–225, 1 set. 2022.

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. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 1–18, jul. 2016.

SHAW, M. C.; COOKSON, J. O. **Metal cutting principles**. New York: Oxford university press, 2005.

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

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

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

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

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

SRINIVASU, D. S. et al. Influence of kinematic operating parameters on kerf geometry in abrasive waterjet machining of silicon carbide ceramics. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 14, p. 1077–1088, 1 nov. 2009.

SRIVASTAVA, A. K.; SRI RAM, K.; LAL, G. K. A simple analysis for evaluating grinding wheel loading. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 28, n. 2, p. 181–190, 1988.

TALON, A.G. et al. Effect of hardened steel grinding using aluminum oxide wheel under application of cutting fluid with corrosion inhibitors. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 1-4, p. 1437-1448, 2019.

TALON, A.G. et al. Grinding performance of hardened steel: a study about the application of different cutting fluids with corrosion inhibitor. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 108, n. 9-10, p. 2741-2754, 2020.

TALON, A. G. et al. 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**, 7 jan. 2021.

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

TIAN, C. et al. Porous structure design and fabrication of metal-bonded diamond grinding wheel based on selective laser melting (SLM). **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 100, n. 5, p. 1451–1462, 2019.

UMEDA, Y. et al. Toward integrated product and process life cycle planning—An environmental perspective. **CIRP Annals**, v. 61, n. 2, p. 681–702, 1 jan. 2012.

WALKER, T. **MQL Handbook**. [s.l.] Unist company, 2013. v. 1

WANG, Y. et al. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 487–499, 2016.

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

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

WINTER, M. et al. Determining optimal process parameters to increase the eco-efficiency of grinding processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 644-654, 2014.

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

WINTER, M.; HERRMANN, C. Eco-efficiency of Alternative and Conventional Cutting Fluids in External Cylindrical Grinding. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 68–73, jan. 2014.

YANG, Z. et al. The grinding force modeling and experimental study of ZrO₂ ceramic materials in ultrasonic vibration assisted grinding. **Ceramics International**, v. 45, n. 7, Part A, p. 8873–8889, 2019.