



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

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

ANTHONY GASPAR TALON

**APLICAÇÃO SUSTENTÁVEL DE DIFERENTES TÉCNICAS DE
LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE CERÂMICA
AVANÇADA**

BAURU

2023



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”



ANTHONY GASPAR TALON

**APLICAÇÃO SUSTENTÁVEL DE DIFERENTES TÉCNICAS DE
LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE CERÂMICA
AVANÇADA**

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

T152a	Talon, Anthony Gaspar Aplicação sustentável de diferentes técnicas de lubrificação no processo de retificação de cerâmica avançada / Anthony Gaspar Talon. -- Bauru, 2023 81 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 ANTHONY GASPAR TALON, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 17 dias do mês de fevereiro do ano de 2023, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ANTHONY GASPAR TALON, intitulada **APLICAÇÃO SUSTENTÁVEL DE DIFERENTES TÉCNICAS DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE CERÂMICA AVANÇADA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Campus de Bauru, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Materiais e Tecnologia / Faculdade de Engenharia de Guaratingueta UNESP. 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 noiva Maria Luiza e aos meus pais Airton e Agnes por sempre me apoiarem e me incentivarem nos estudos. Ademais, agradeço ao meu orientador e todos os professores que contribuíram para que esse estudo fosse possível.

AGRADECIMENTOS

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

Agradeço imensamente minha noiva, Maria Luiza, por me incentivar a seguir nessa jornada e por ter compreensão nos momentos que estive ausente em busca dos meus sonhos.

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

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

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Bauru, e a todos os professores que contribuíram para minha formação, especialmente ao Professor Titular Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, ao Prof. Dr. Cesar Renato Foschini, Prof. Dr. João Eduardo Guarnetti dos Santos, Prof. Dr. Luiz Daré Neto e Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon, pelo apoio, amizade e pelos conhecimentos que foram passados ao longo desses anos.

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

Agradeço a oportunidade de desenvolvimento profissional concedido pelo Laboratório de Usinagem por Abrasão e por todas as amizades que levarei para a vida toda, em especial aos meus companheiros: André Bueno Tavares, Bruno Kenta Sato, Fernando Sabino Fontequê Ribeiro, Henrique Ricciardelli Riehl, Kaic Aparecido da Silva, Lucas de Martini Fernandes, Mateus Vinícius Garcia, Rafael Lemes Rodriguez e Rodrigo Ráfaga de Souza. Vocês foram essenciais na minha vida.

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

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”

(Walter S. Landor)

RESUMO

Existe uma crescente demanda por projetos com materiais que serão utilizados em aplicações inertes, onde nenhuma reação física ou química pode interagir com os elementos ao seu redor. Juntamente com a demanda desses projetos, surge a necessidade de estudar os processos de fabricação desses materiais. Nesse sentido, um novo conceito de processo de fabricação precisa ser explorado, pois os estudos sobre aplicações cerâmicas avançadas como elementos internos de motores, estruturas aeronáuticas, sensores, supercondutores, capacitores e principalmente como biomateriais aplicados como próteses e órteses pela medicina, começam a ganhar espaço. No entanto, ainda faltam estudos sobre os processos de fabricação em larga escala desses produtos, principalmente relacionados à sua retificação. Portanto, é fundamental estudar as melhores formas de processamento de materiais que serão essenciais para as indústrias mecânica, eletrônica e biológica em um futuro próximo. Além disso, estudos sobre cerâmicas avançadas têm se tornado cada vez mais indispensáveis, baseados em fatores como alto valor agregado devido à dificuldade de fabricação aliada ao alto impacto ambiental causado por este processo. No entanto, as cerâmicas avançadas são materiais de difícil usinagem devido às suas propriedades de alta dureza e fragilidade, tornando necessários processos de fabricação mais complexos, como a retificação. Portanto, este trabalho explorou diversas condições aplicadas à cerâmica avançada, abordando as principais variáveis utilizadas pelas indústrias mundiais, sendo elas: rugosidade (R_a), desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, razão G , potência de retificação e análise de custos do processo. O processo de retificação utilizado na pesquisa foi do tipo cilíndrica externa de mergulho utilizando um rebolo diamantado aplicado a quatro diferentes velocidades de avanço: 0,25, 0,50, 0,75 e 1,00 mm/min. Além disso, foram utilizados dois sistemas de aplicação de fluido de corte no processo: técnicas de lubrificação convencional e MQL, com vazão de 15 l/min e 100 ml/h, respectivamente. Os resultados indicaram que o MQL gerou uma perda de qualidade nas variáveis de saída e apresentou custos mais elevados ao processo. Nesse sentido, o MQL não se mostra como uma alternativa viável para a retificação de cerâmicas com rebolo de diamante.

Palavras-chave: Retificação. MQL. Cerâmica avançada. Rebolo de diamante.

ABSTRACT

The growing demand for current and future projects lacks materials development and their manufacturing process, mainly when they need to be used in inert applications, where no physical or chemical reaction can interact with the elements around them. In this sense, a new manufacturing process concept needs to be explored because studies about advanced ceramic applications as internal elements to engines, aeronautical structures, sensors, superconductors, capacitors and mainly as biomaterials applied as prostheses and orthotics by medicine begin to gain space. However, there is still a lack of studies on the large-scale manufacturing processes of these products, mainly related to their grinding. Therefore, it is crucial to study the best ways of processing materials that will be essential to the mechanical, electronic and biological industries in the near future. Furthermore, studies about advanced ceramics have become increasingly indispensable, based on factors such as high added values due to the difficulty of manufacturing combined with the high environmental impact caused by this process. However, advanced ceramics are materials with difficult to machine because of their high hardness and fragility properties, becoming required manufacturing processes more complex, such as grinding. Therefore, this paper explored several conditions applied to advanced ceramic, approaching the main variables used by worldwide industries, being: surface roughness (Ra), roundness error, diametral wheel wear, Razão G, grinding power and analysis costs process. The grinding process used in the research was of kind plunge combined to a diamond wheel applied to four different feed rates: 0.25, 0.50, 0.75 and 1.00 mm/min, in which two systems by application of cutting fluid in the process were also used: flood and MQL lubri-refrigeration techniques, with a flow rate of 15 l/min and 100 ml/h, respectively. The results indicated that the MQL generated a loss of quality in the output variables and presented higher costs to the process. In this sense, the MQL does not appear to be a viable alternative for grinding ceramics with diamond grinding wheels.

Keywords: Grinding, Diamond wheel, Advanced ceramic, MQL.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representação da cinemática na retificação.....	23
Figura 2 Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho, adaptado (MALKIN, 1989)	24
Figura 3 Três componentes da força na retificação (Rowe, 2014).....	24
Figura 4 Formação de cavaco por um grão abrasivo, adaptado (MALKIN, 1989).....	26
Figura 5 Ciclo de uma retificação cilíndrica (Hassui e Diniz, 2003 - modificado).....	27
Figura 6 Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho, adaptado (MALKIN, 1989).	28
Figura 7 Características dos abrasivos.	34
Figura 8 Influência do grau de recobrimento de dressagem na topografia do rebolo (OLIVEIRA, 1988).....	44
Figura 9 Ciclo de variação da potência (Rowe, 2014-modificado).....	54
Figura 10 Dimensões da peça.....	58
Figura 11 Montagem experimental com (a) lubrificação convencional e (b) MQL	59
Figura 12 Metodologia para medição do desgaste diametral do rebolo	60
Figura 13 Rugosidade para cada condição de usinagem	62
Figura 14 Microscopia confocal da superfície retificada para (a) convencional a 0,25 mm/min, (b) convencional a 1,00 mm/min, (c) MQL a 0,25 mm/min e (d) MQL a 1,00 mm/min.	64
Figura 15 Desvio de circularidade para cada condição de usinagem	65
Figura 16 Desgaste diametral do rebolo para cada condição de usinagem	66
Figura 17 Razão G para cada condição de usinagem	68
Figura 18 Potência de retificação para cada condição de usinagem.....	69
Figura 19 Custo do processo para cada condição de usinagem.....	70

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	[-]
MLQ	Mínima quantidade de lubrificação	[-]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Motivação.....	20
1.2. Objetivo geral	21
1.3. Objetivos específicos	21
2. REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1. Processo de retificação	21
2.2. Cinemática da retificação	22
2.3. Danos térmicos causados pela retificação	23
2.4. Retificação cilíndrica externa de mergulho	24
2.4.1. Força tangencial de corte.....	24
2.4.2. Mecanismos de formação de cavaco.....	25
2.4.3. Ciclo da retificação externa de mergulho.....	26
2.5. Parâmetros no processo de retificação	27
2.5.1. Profundidade de corte (a)	28
2.5.2. Comprimento de contato (Lc)	29
2.5.3. Taxa de remoção de material (Qw).....	30
2.5.4. Velocidade de corte (Vs).....	31
2.5.5. Velocidade da peça (Vw)	31
2.5.6. Velocidade de mergulho (vf).....	32
2.5.7. Espessura equivalente de corte (heq)	32
2.6. Rebolo.....	33
2.6.1. Dureza do rebolo	33
2.6.2. Estrutura do rebolo	34
2.6.2.1. Abrasivos.....	35
2.6.2.2. Granulometria	36
2.6.2.3. Friabilidade	36
2.7. Tipos de abrasivos	37
2.7.1. Diamante	37
2.8. Ligantes	39
2.8.1. Resinoide.....	40
2.9. Dressagem	41
2.10. Fluido de corte	44
2.10.1. Problemas na utilização do fluido de corte	46
2.10.2. Custos dos fluidos de corte.....	47

2.10.3.	Manutenção e descarte	48
2.10.4.	Mínima quantidade de lubrificante – MQL.....	49
2.11.	Variáveis de saída do processo	51
2.11.1.	Rugosidade.....	51
2.11.2.	Relação G	52
2.11.3.	Circularidade	52
2.11.4.	Microscopia confocal	53
2.11.5.	Potência de retificação	54
2.11.6.	Análise de custos na retificação	55
2.12.	Cerâmicas Avançadas	55
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1.	Rugosidade.....	61
4.2.	Desvios de circularidade	64
4.3.	Desgaste diametral do rebolo	66
4.4.	Razão G	67
4.5.	Potência de retificação e análise de custos	68
5.	CONCLUSÕES	71
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	73

1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação envolve a redução de irregularidades superficiais na peça, oriundas de etapas anteriores do processo de fabricação como torneamento, fresamento ou sinterização, por exemplo (ROWE, 2014a). A remoção do material é realizada por atrito entre o rebolo e a peça (RODRIGUEZ et al., 2020a). O rebolo é uma ferramenta composta de grãos abrasivos aderidos por um ligante. Os grãos abrasivos podem ser óxidos de alumínio, carbeto de silício, nitreto cúbico de boro e diamante, de acordo com a dureza e reação química do processo (LOPES et al., 2021, 2022; TALON et al., 2021). Além disso, não possuem uma forma geométrica pré-definida (MALKIN; GUO, 2008a). Os ligantes podem ser resinóides, vitrificados ou metálicos e devem ser escolhidos de acordo com a aplicação (DENKENA et al., 2016). As arestas de corte perdem eficiência durante o processo de retificação devido ao atrito e ao calor, diminuindo a eficiência de corte, aumentando a temperatura e intensificando o desgaste do rebolo, o que torna possível alterações dimensionais e geométricas na peça (JAVARONI et al., 2020; KING; HAHN; DEVEREUX, 2009; RODRIGUEZ et al., 2020a). Além disso, com o desgaste do rebolo, há um aumento da área de contato, o que gera um aumento do gasto energético (LOPES et al., 2022; SATO et al., 2022). Portanto, a friabilidade do grão abrasivo e o tipo de ligante são essenciais para que, de acordo com o aumento das forças de usinagem, ocorra a ruptura e liberação desses grãos, gerando novas arestas de corte e mantendo a potência de usinagem constante (LOPES et al., 2019b). O processo de retificação proporciona excelente acabamento superficial, precisão dimensional e geométrica, tornando-se a principal opção na usinagem de materiais com determinadas especificidades, como na fabricação de cerâmicas avançadas (DA SILVA et al., 2020; JIANG et al., 2013; ROWE, 2014b). Este tipo de material possui propriedades mecânicas como resistência ao desgaste, temperatura e corrosão (DA SILVA et al., 2020). Tais propriedades resultam da combinação de ligações iônicas e covalentes em sua microestrutura (AYODE OTITOJU et al., 2020). Comparada às ligas metálicas especiais, a cerâmica avançada vem ganhando espaço no mercado aeroespacial devido à sua resistência térmica e baixa densidade, permitindo a produção de equipamentos com menor peso e maiores faixas de temperatura de operação (DAMBATTA et al., 2017). No entanto, a retificação de cerâmica avançada é um processo complexo, pois sua dureza e fragilidade dificultam a remoção do material por meio de grãos abrasivos comuns. Portanto, é necessário o uso de um rebolo diamantado (NAKAI et al., 2015). O rebolo diamantado consiste em um corpo com uma camada de abrasivos (DING

et al., 2014). Os corpos dos rebolos são feitos de resinas reforçadas com fibras de carbono, reduzindo significativamente o peso do rebolo (RODRIGUEZ et al., 2019a). Em seguida, o corpo recebe uma camada externa composta por grãos abrasivos de diamante sintético (ARTINI; MUOLO; PASSERONE, 2012). Os rebolos diamantados geralmente possuem ligações resinóides ou metálicas devido aos altos níveis de adesão de grãos e resistência ao desgaste abrasivo (TIAN et al., 2019). Tais especificações tornam o investimento de compra elevado e, quando somadas às técnicas de lubrificação-refrigeração, a retificação se torna responsável por cerca de 70% do custo final de fabricação do produto (LAKHDAR et al., 2021). Devido ao atrito, 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 da cerâmica avançada, há dificuldades na formação do cavaco, contribuindo para o 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 é garantida com técnicas corretas de lubrificação e refrigeração (YANG et al., 2019).

Nesse sentido, o fluido de corte reduz a temperatura através de trocas térmicas na zona de corte, inserindo filmes lubrificantes na interface rebolo-peça e limpando os poros do rebolo. Essa limpeza é feita expelindo os cavacos e evitando o empastamento (JAVARONI et al., 2019). Atualmente, a técnica de lubrificação-refrigeração convencional insere centenas de litros de fluido na interface de corte, garantindo excelente lubrificação, refrigeração e limpeza (RODRIGUEZ et al., 2019b). No entanto, quando em contato com o rebolo em altas velocidades, o fluido forma névoas compostas de água e óleo, que os operadores podem inalar (WANG et al., 2016). Com toda a complexidade química dos fluidos de corte, essas partículas de aerossol desencadeiam diversas doenças ocupacionais, como dermatites alérgicas, dificuldades respiratórias e câncer de pulmão e laringe. Cerca de 20 a 30% dessas doenças resultam da inalação de partículas com fluidos lubrificantes (WANG et al., 2016). Em consonância com isso, os fluidos de corte de base mineral não biodegradáveis contêm em suas composições diversos componentes tóxicos que também são prejudiciais ao meio ambiente (GARCIA et al., 2020). Quando descartados de forma inadequada, contaminam a água, o solo e o ar (CHETAN; GHOSH; VENKATESWARA RAO, 2015).

Portanto, com o aumento dos ideais ecologicamente corretos, regulamentações rígidas são criadas pelos órgãos ambientais para o descarte correto desses fluidos, tornando o processo complexo e caro (BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017). Dada a exigência ambiental, técnicas alternativas como a Quantidade Mínima de Lubrificante (MQL) têm ganhado espaço nos processos de fabricação mecânica (DE MORAES et al., 2019). Ao

contrário da técnica convencional de lubrificação-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). Assim, o fluido descartado é reduzido exponencialmente no final do processo juntamente com o tamanho da névoa gerada pela rotação do rebolo, quando comparado aos 60 l/h utilizados no processo da técnica de lubrificação-refrigeração convencional (HADAD, 2015). No entanto, a técnica de MQL ainda não é atrativa para um percentual grande de empresas, em função de algumas barreiras a serem superadas (HADAD; SHARBATI, 2016). Devido à lubrificação-refrigeração ser feita apenas com óleo, há uma perda considerável na capacidade de troca de calor na região de corte (WANG et al., 2016). Além disso, o calor específico do óleo é baixo em relação à água, com cerca de 70% do calor transferido para a peça; por outro lado, cerca de apenas 36% do calor é transferido para a peça com a técnica de lubrificação-refrigeração convencional (RODRIGUEZ et al., 2020b; SATO et al., 2021). Lopes et al. (2022) estudaram o comportamento da técnica MQL na retificação do aço VP50, mostrando 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, quando comparado com a técnica de lubrificação-refrigeração convencional. Apesar do aumento, os valores ainda são inferiores à rugosidade superficial máxima de 1,6 μm aceita pelo processo de retificação (MALKIN; GUO, 2008a). No entanto, no mesmo trabalho, houve um aumento de 40% para energia específica gasta ao aplicar o MQL. Como a retificação está no final do processo de produção, o produto chega a esta etapa com um custo agregado de toda a cadeia produtiva, isto é, há um valor passivo embutido (BRUZZONE et al., 2008; DE SOUZA et al., 2021). Portanto, caso o produto saia das especificações de projeto após o processo de retificação, esse valor deve ser desembolsado novamente (JAYAL et al., 2010). Isto posto, estudos de análises comparativas dos custos de implantação de uma técnica de lubrificação-refrigeração são essenciais para minimizar passivos trabalhistas e ambientais e proporcionar menores custos para aplicação de processos ecologicamente corretos (DEBNATH; REDDY; YI, 2014; LEE et al., 2013). Assim, um rebolo diamantado foi utilizado em diferentes velocidades de avanço: 0,25, 0,50, 0,75 e 1,00 mm/min, combinado com duas técnicas de lubrificação-refrigeração (convencional e MQL). Para tanto, foram realizadas diversas análises: rugosidade média aritmética (R_a), microscopia confocal, desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, razão G , potência de retificação e custo do processo.

1.1. Motivação

As cerâmicas avançadas estão se tornando cada vez mais aplicáveis na indústria, em função das suas propriedades específicas, como a resistência à corrosão, resistência ao calor, dureza, etc. Entretanto, os projetos de peças cerâmicas são complexos, uma vez que a resistência mecânica teórica da peça pode ser muito diferente da resistência mecânica real em função de defeitos em sua microestrutura. Nesse sentido, estudar os processos de fabricação das cerâmicas avançadas se faz extremamente necessário, uma vez que processos inadequados podem ocasionar perda da integridade física e geométrica da peça.

Contudo, em função de sua elevada dureza, as cerâmicas avançadas comumente são retificadas com rebolos de diamante. Tais ferramentas possuem um custo elevado, o que torna esse processo extremamente caro. Além disso, o diamante tem propriedades térmicas que fazem com que o calor na zona de corte seja muito prejudicial à vida da ferramenta.

Isto posto, faz-se necessário a aplicação de fluido de corte. Contudo, os fluidos de corte trazem consigo diversas discussões acerca de seus impactos ambientais e os perigos à saúde humana. Nesse sentido, estudos sobre alternativas para a técnica convencional de aplicação de fluidos de corte vêm surgindo para minimizar os impactos da utilização desses e para adequar as empresas no cenário de sustentabilidade que a sociedade vem exigindo das companhias. A técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) surge para suprir essa necessidade e atender os aspectos ecológicos dos processos de usinagem, além de, normalmente, gerar uma redução de custos ao processo.

Entretanto, estudos bibliométricos realizados em bancos de dados internacionais como Scopus, Google Scholar, Science Direct e outros, comprovaram que o meio acadêmico carece de estudos acerca do tema de retificação de cerâmicas com rebolo de diamante utilizando a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante.

Portanto, existe uma tendência de crescimento na utilização de cerâmicas avançadas na indústria e no apelo da sociedade por processos mais sustentáveis, contudo, existem poucos estudos acerca de processos mais sustentáveis para cerâmicas avançadas.

Nesse sentido, a presente pesquisa visa trazer resultados para ampliar o conhecimento do meio acadêmico, ao passo, que traz informações relevantes para uma indústria em pleno desenvolvimento e expansão.

1.2. Objetivo geral

Avaliar o desempenho da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) em diferentes velocidades de avanço na retificação cilíndrica de Alumina com rebolo de diamante.

1.3. Objetivos específicos

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

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentado uma revisão da literatura sobre os principais assuntos abordados neste trabalho, onde serão tratados sobre o processo de retificação, características do rebolo de Diamante, friabilidade dos grãos abrasivos, cerâmicas avançadas, além das variáveis de saída no processo de retificação cilíndrica e outros temas análogos à pesquisa.

2.1. Processo de retificação

Usinagem por abrasão é um processo onde a superfície de corte não é só distribuída como também é organizada de forma aleatória (MARINESCU et al., 2013). Na retificação, a ferramenta apresenta geometria de corte indefinida, diferentemente de torneamento e fresamento, uma vez que os abrasivos apresentam arestas de corte irregulares (REN, Y. H.; ZHANG, B.; ZHOU, [s.d.]).

A remoção de material no processo de retificação é feita pelo rebolo, ferramenta na qual os grãos abrasivos estão dispostos de forma irregular (RASIM; MATTFELD; KLOCKE,

2015), e ocorre por fricção, deformação e cisalhamento do material, sendo este último responsável pela formação do cavaco, enquanto a fricção e a deformação consomem energia sem remover material (SINHA et al., 2016).

A retificação é um dos processos finais de uma peça, destinado a dar acabamento e tolerâncias, tendo então muito valor agregado. Logo, um erro nesta etapa pode custar caro. Por conseguinte, os parâmetros da retificação devem ser muito bem definidos (ANDERSON; WARKENTIN; BAUER, 2008).

Segundo Sinha et al. (2016), a retificação é um processo complexo e dinâmico, muito aplicado na fabricação de peças de alta qualidade, com tolerâncias mais restritas, além de um excelente acabamento superficial. Silva et al. (2020) afirmam que o processo de retificação é de alta complexidade, envolvendo diversas variáveis, e por isso, é muito sensível a qualquer alteração, desde as condições de usinagem ou o ambiente de trabalho, até a habilidade do operador.

Na retificação, a ferramenta abrasiva apresenta uma velocidade tangencial maior comparada com outros processos de usinagem, tais como torneamento e fresamento, atingindo velocidades de entre 20 m/s e 45 m/s na retificação convencional e podendo ser maior em retificação de alta velocidade, chegando a 140 m/s ou mais (MARINESCU et al., 2013).

Hassui e Diniz (2003) afirmaram que a maioria dos pesquisadores de usinagem relatam que a retificação é um objeto de difícil estudo, uma vez que envolve muitas variáveis e é sensível a pequenas alterações nos seus valores, além de utilizar uma ferramenta de formato irregular.

2.2. Cinemática da retificação

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

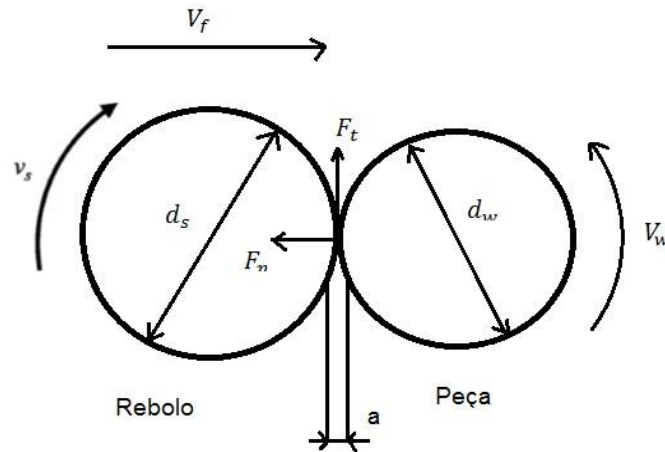


Figura 1 Representação da cinemática na retificação.

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

2.3. Danos térmicos causados pela retificação

Na retificação, muitos grãos abrasivos estão em contato com a peça em determinado instante, porém apenas parte deles estão efetivamente cortando e removendo material. Logo, os outros grãos estão apenas se movendo sobre a superfície da peça, o que gera alto atrito, e por consequência, altas temperaturas (TAWAKOLI et al., 2009).

As altas temperaturas geradas no processo podem ocasionar queima visível na peça, como manchas ou descoloração, ou defeitos microestruturais onde se altera a microestrutura do material, ocasionando redução da dureza superficial, o que gera aumento das tensões residuais e resulta em redução da resistência a fadiga. Pode ocorrer a têmpera ou retêmpera do material, além de expansões térmicas não controladas, ocasionando erros dimensionais e de forma (normalmente são de circularidade), além da possibilidade de formação de trincas no material (DA SILVA et al., 2007; IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005).

As causas da queima devem ser devidamente estudadas, uma vez que, segundo Anderson et al. (2008) esse é o erro mais comum de se ocorrer na retificação.

2.4. Retificação cilíndrica externa de mergulho

Segundo Diniz e Oliveira (2008) na retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo avança perpendicularmente à superfície retificada e geralmente o rebolo é mais espesso que a peça, possibilitando a usinagem de várias superfícies simultaneamente. Na retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo se move na direção do corpo de prova com uma velocidade de mergulho (V_f), sendo esta velocidade muito menor do que a velocidade tangencial da peça (V_w), que é geralmente menor do que a velocidade periférica do rebolo (V_s) (Marinescu et al., 2013).

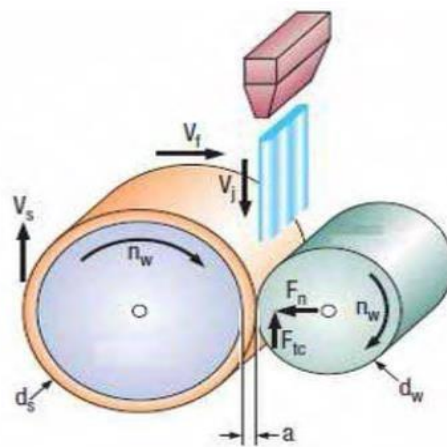


Figura 2 Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho, adaptado (MALKIN, 1989)

Segundo Silva Neto (2012) a retificação a cilíndrica externa de mergulho se destaca por ser um processo rápido e econômico.

2.4.1. Força tangencial de corte

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

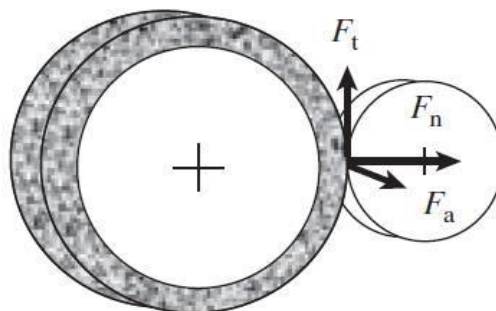


Figura 3 Três componentes da força na retificação (Rowe, 2014).

Segundo Marinescu et al. (2007) a força tangencial de corte é dada 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 grão e peça e K_n (N/mm²) é a tensão de escoamento do material.

Logo, a partir da equação (1) é possível concluir que a força tangencial de corte é afetada principalmente pela espessura máxima do cavaco e a largura média no topo dos grãos abrasivos. Então, o tamanho do grão abrasivo e a resistência do ligante do rebolo são cruciais no aumento das forças de corte durante o processo de retificação (LI et al., 2002).

Ao retificar, os grãos abrasivos do rebolo tendem a perder sua geometria original, e por consequência, seu grau de afiação, originando um aumento dos esforços na remoção de material. Dessa forma, ocorre também o aumento da força tangencial de corte.

Segundo Schwarz et al. (2015), um rebolo gasto tende a dar um acabamento superficial menos rugoso, mas, em contrapartida, aumenta as chances do aparecimento de danos térmicos, formação de lóbulos e trepidações.

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

As forças de corte na retificação são de grande importância, uma vez que influenciam na geometria da peça, em suas dimensões, sua rugosidade, a vida do rebolo (desgaste volumétrico) e o tempo necessário para a realização do processo. A potência necessária para a máquina retificadora, bem como suas necessidades estruturais, também são fatores influenciados pelos valores médios empregados na usinagem do material (KING; HAHN, 2012).

2.4.2. Mecanismos de formação de cavaco

As três fases necessárias para que a esta remoção de material ocorra estão demonstradas na Figura 4.

Na primeira fase, apenas uma deformação elástica ocorre no material da peça, fazendo com que a energia fornecida ao processo seja consumida pelo atrito, calor e deformações.

Em seguida, na fase dois, com a sequente penetração dos grãos abrasivos na peça, ocorrem deformações plásticas, escoamento lateral e recuperação das deformações elásticas ocorridas no estágio anterior. Quanto maior a penetração dos grãos, maior a força de atrito, e por consequência, a maioria da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor.

Por fim, na última fase, a aresta de corte atinge um valor de penetração no qual se inicia a formação de cavaco, e por consequência, grande parte da energia passa a ser consumida no cisalhamento do material.

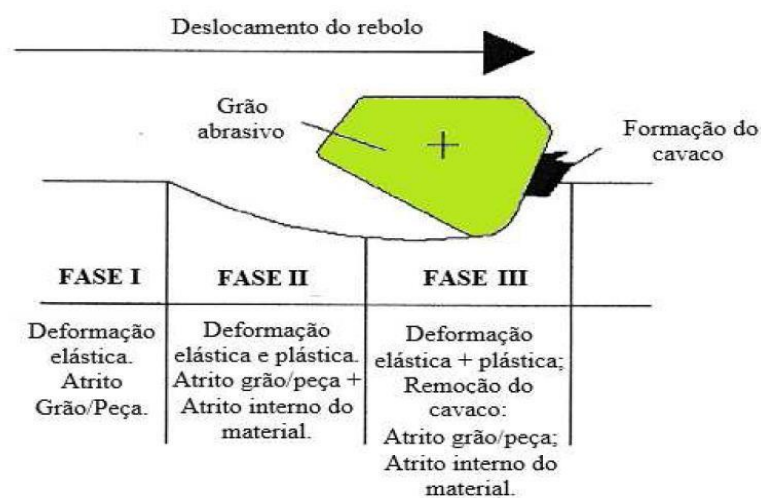


Figura 4 Formação de cavaco por um grão abrasivo, adaptado (MALKIN, 1989).

2.4.3. Ciclo da retificação externa de mergulho

Na retificação, no momento em que ocorre o avanço do rebolo na peça, existe uma diferença entre o avanço real e o programado. Isso ocorre devido as deformações elásticas sofridas tanto pela ferramenta, quanto pela peça, mas principalmente pela máquina. Essas deformações se devem à falta da rigidez. A Figura 5 demonstra essa diferença entre o avanço teórico e o avanço real. Para combater esse problema, a solução é um período chama *spark-out*, ou tempo de faíscamento, onde não há avanços mas a peça e o rebolo continuam em contato, fazendo que as deformações elásticas sejam eliminadas enquanto o rebolo remove o material, gerando as dimensões necessárias da peça (HASSUI; DINIZ, 2003).

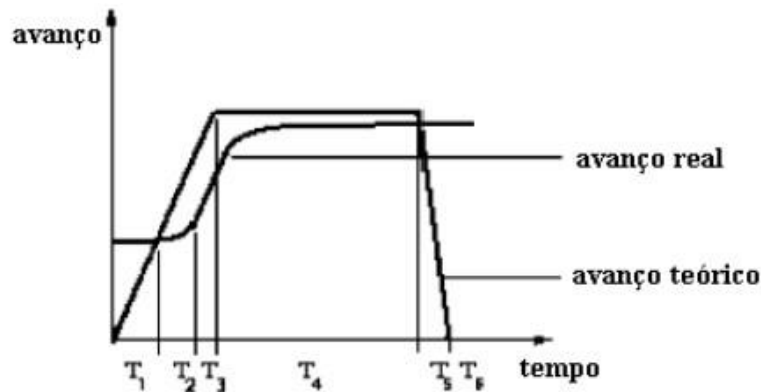


Figura 5 Ciclo de uma retificação cilíndrica (Hassui e Diniz, 2003 - modificado).

Hassui e Diniz (2003) definem cada intervalo da Figura 5 como:

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

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

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

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

T5: recuo da ferramenta.

2.5. Parâmetros no processo de retificação

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

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

A seguir, a Figura 6 mostra os principais parâmetros da operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.

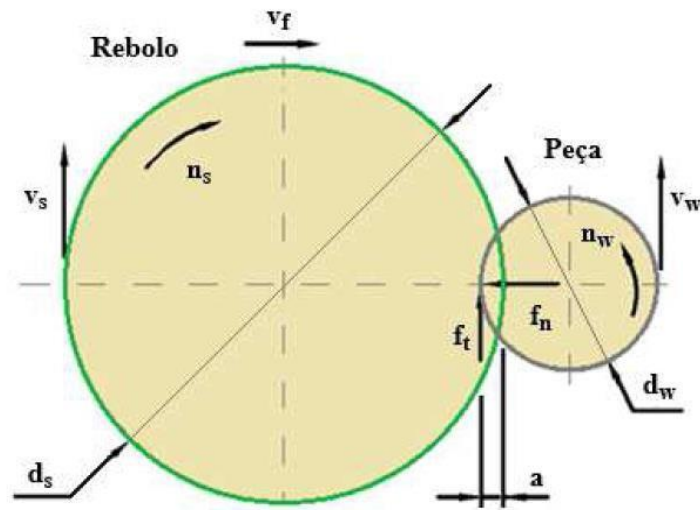


Figura 6 Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho, adaptado (MALKIN, 1989).

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.

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

2.5.1. Profundidade de corte (a)

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

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

Onde a é a profundidade de corte; V_f é a velocidade de avanço; V_w é a velocidade da peça e d_w é o diâmetro da peça.

Porém, a peça, o rebolo e os componentes da máquina sofrem deformação quando ocorre o contato entre o rebolo e a peça, e, portanto, se calculado o real valor da profundidade de corte, será um valor menor do que o calculado com base na velocidade de avanço V_f . Isso ocorre justamente devido as flexões e falta da rigidez dos elementos mecânicos, além do desgaste do rebolo e de deflexões térmicas (MARINESCU et al., 2007).

Por conseguinte, os mesmos autores definem que a profundidade de corte real ae é representada pela diferença entre a profundidade de corte programada, deflexões e o desgaste do rebolo mais a expansão térmica. Portanto, pode-se definir a profundidade de corte real pela seguinte expressão:

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

Onde: a é a profundidade de corte programada; δ é as deflexões do sistema; asw é a profundidade desgastada do rebolo a cada volta e at é a expansão térmica do rebolo e da peça.

A profundidade de corte real também pode ser determinada medindo a peça antes e depois da retificação.

Existe uma profunda relação entre a profundidade de corte e a espessura equivalente do cavaco, sendo diretamente proporcionais. Aumentando a profundidade de corte, ocorre o aumento da espessura equivalente do cavaco, gerando maior desgaste do rebolo, maiores forças de retificação e aumento da rugosidade da peça (DINIZ; DE OLIVEIRA, 2008).

Somado a isso, a elevação da profundidade de corte provoca um aumento no número de grãos ativos e um aumento também no tempo de contato entre a peça e o rebolo fazendo com que cada grão abrasivo remova uma quantidade maior de material, e, portanto, a temperatura é elevada durante o processo (MARINESCU et al., 2007).

2.5.2. Comprimento de contato (Lc)

De acordo com Marinescu et al. (2016) o comprimento de contato é definido como sendo a extensão de contato entre o rebolo e a peça. O comprimento de contato pode ser expresso pela equação 4:

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

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

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

2.5.3. Taxa de remoção de material (Q_w)

Klock (2009) define a taxa de remoção do material como o volume de material removido por unidade de tempo. Esse parâmetro pode ser definido matematicamente, segundo Marinescu et al. (2007) de acordo com a seguinte equação:

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

Onde: bw é 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 V_f é velocidade de mergulho. Logo, a taxa de remoção é dada em mm^3/min .

A taxa de remoção ocorre quando cada grão abrasivo penetra a peça e remove o material que está em sua trajetória.

Para aumentar a taxa de remoção do material é necessário aumentar a velocidade de avanço, o que aumentará as forças de retificação e reduzirá a qualidade superficial, além de diminuir a vida do rebolo e a energia específica (ROWE, 2014a).

De acordo com o mesmo autor, dividindo a taxa de remoção pela largura de retificação, é possível obter a taxa específica de remoção do material (Q'_w), que é a taxa de remoção do material pela largura da retificação. Portanto, é possível definir a equação 6:

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

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

2.5.4. Velocidade de corte (V_s)

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

A equação 7 representa essa variável:

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

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

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

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

2.5.5. Velocidade da peça (V_w)

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

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

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

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

2.5.6. Velocidade de mergulho (V_f)

Segundo Marinescu et al. (2007) a velocidade de mergulho é a velocidade que o rebolo avança sobre a peça, também sendo denominada velocidade de avanço. A velocidade de mergulho interfere na rugosidade superficial e nas forças de retificação, sendo diretamente proporcional a ambas.

Na fase de desbaste na retificação, remove-se cerca de 95% do material da peça, utilizando-se uma velocidade de mergulho entre 0,4 mm/min a 2,0 mm/min. Para o acabamento, a velocidade de mergulho deve estar entre 0,1 mm/min a 0,3mm/min.

No presente trabalho, a metodologia de ensaios define que será alterada a velocidade de mergulho, para estudar o desempenho das diferentes técnicas de lubrificação. Altera-se a velocidade de mergulho, uma vez que a mesma interfere diretamente na espessura equivalente de corte, como será visto a seguir.

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

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

$$h_{eq} = \frac{Q_w'}{v_s} = \frac{\pi \times d_w \times v_f}{60 \times 1000 \times v_s} \quad (9)$$

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

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

Marinescu et al. (2007) afirmam que esse parâmetro não considera o espaçamento dos grãos do rebolo, ficando evidente que o comportamento da retificação está intimamente

relacionado com a combinação da espessura equivalente de corte e a densidade das arestas de corte.

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

2.6. Rebolo

Segundo Rasim et al. (2015), o rebolo é uma ferramenta no formato circular na qual estão localizados de forma aleatória vários grãos abrasivos que possuem formato irregular.

Além disso, os grãos abrasivos dos rebolos são ligados por uma matriz ligante, e perante a união desses dois componentes, surgem porosidades controladas e definidas, que são de suma importância para acomodar os cavacos e transportar os fluidos de corte. O rebolo pode ser considerado uma ferramenta de geometria indefinida, uma vez que os grãos apresentam geometria de corte aleatória (MALKIN; BITTER, 1989) .

O mesmo autor ainda apresenta que o desempenho do rebolo está diretamente relacionado a três importantes características, sendo elas: tipo e tamanho do grão abrasivo, propriedades abrasivas do material ligante e porosidade do conjunto.

De acordo com Winter et al. (2015) além dos grãos abrasivos, do ligante e dos poros, outra característica seria o material do centro do rebolo, dependendo do design. Webster e Tricard (2004) explicam que o design do rebolo depende do perfil, espessura, material do centro (se não for constituído inteiro da mistura abrasivo, ligante e porosidade), capacidade de resistir ao estresse rotacional, precisão e resistência ao ataque químico.

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

2.6.1. Dureza do rebolo

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

Porém, segundo Rowe (2014a), uma vez que os rebolos com alta dureza retêm os grãos abrasivos por mais tempo, os mesmos tendem a perder a afiação, o que aumenta a possibilidade de ocorrer uma queima superficial na peça. Por sua vez, os rebolos com baixa dureza têm a habilidade de desprender os grãos abrasivos gastos, renovando assim as arestas de corte, mantendo a afiação do rebolo

O mesmo autor ainda afirma que a dureza do rebolo geralmente indica a maneira como o mesmo vai se desgastar, sendo que um rebolo com dureza baixa irá se desgastar mais rápido que um rebolo de dureza elevada, uma vez que essa característica depende do volume de ligante presente no rebolo. Logo, quanto maior o volume de ligante menor será a quantidade de porosidade tornando o rebolo mais duro e a dureza é uma característica intrínseca do rebolo, não podendo ser alterada.

De acordo com Marinescu et al. (2007), o abrasivo deve ter dureza maior que o material a ser retificado. A dureza pode ser determinada por um teste de dureza Knoop, definido em razão da resistência a indentação estática.

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

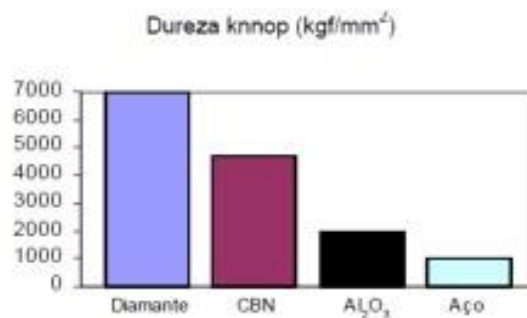


Figura 7 Características dos abrasivos.

2.6.2. Estrutura do rebolo

De acordo com Rowe (2014a), a porosidade e a estrutura do rebolo estão relacionadas, sendo que um rebolo com alta porosidade terá uma estrutura aberta e uma menor porção de ligante que um rebolo com porosidade regular com uma mesma estrutura. Além disso, um rebolo com alta porosidade tende a ser mole enquanto um rebolo com baixa porosidade tende a ser duro.

Segundo o mesmo autor, rebolos com estrutura aberta são essenciais para retificação com alta taxa de remoção, por apresentarem uma grande quantidade de poros onde o cavaco se acomoda. Nesse tipo de retificação, a porosidade também favorece o transporte de fluido, uma vez que ocorre uma grande geração de calor.

Marinescu et al. (2007) afirmam que a porosidade é requerida para obter uma efetiva ação de corte. Ela reduz a velocidade máxima que o rebolo pode ser submetido, uma vez que quanto maior a porosidade, menor será a velocidade do rebolo. A porosidade também permite que os grãos abrasivos sejam facilmente retirados do rebolo.

2.6.2.1. Abrasivos

Segundo Malkin e Guo (2008a), os abrasivos podem ser naturais ou sintéticos e devem ser muito mais duros que os materiais que vão ser usinados.

De acordo com Marinescu et al. (2007), os abrasivos podem ser considerados ferramentas de corte com geometria não definida com alta dureza, arestas de corte e boa habilidade de corte. O grau de afiação dos grãos abrasivos é descrito em termos do raio da aresta e do ângulo do vértice, e sua habilidade de corte depende de fatores como estrutura do grão e friabilidade.

Na retificação ocorrem altas temperaturas, por conseguinte, um bom abrasivo deve manter sua dureza, não reagir quimicamente e não se difundir facilmente no material da peça, além do fato que as propriedades térmicas dos abrasivos são de extrema importância na resistência ao desgaste.

O mesmo autor ainda cita que o aumento da temperatura reduz a dureza da maioria dos abrasivos, com exceção do SiO_2 que em altas temperaturas se transforma em uma estrutura mais dura. Devido a esse fato, deve-se considerar as propriedades térmicas do abrasivo assim como a temperatura em que ocorre a retificação, para evitar um desgaste prematuro do mesmo.

Klocke (2009) também afirma que o abrasivo deve possuir um alto grau de dureza e resistência mecânica para facilitar a formação do cavaco e manter as arestas de corte afiadas por um período considerável.

De acordo com Sinha et al. (2016), pode-se atribuir o desgaste do abrasivo aos seguintes fatores:

- O atrito entre peça e abrasivo
- Deformações plásticas em altas temperaturas
- Fratura devido ao choque mecânico
- Reações químicas entre o abrasivo e peça em altas temperaturas

2.6.2.2. Granulometria

As dimensões dos grãos abrasivos e suas uniformidades podem ser classificados pela norma americana ANSI Standard B74. 12-1977 (“Specification for Size of Abrasive Grain”), que determina o tamanho do grão em mesh, definido como a quantidade de furos por polegada linear da peneira na qual os grãos ficam retidos durante o processo de seleção. Essa norma é comumente usada para grãos de natureza convencional (MARINESCU et al., 2007).

De acordo com os mesmos autores, para grãos superabrasivos a norma utilizada é usada a Norma Europeia FEPA (Federation European Producers of Abrasives), que especifica o diâmetro teórico do grão. Na tabela 1 estão correlacionadas as normas FEPA e ANSI.

Os grãos grossos devem ser usados para:

- Materiais dúcteis ou fibrosos, como aços baixo carbono ou alumínios;
- Grande remoção de material (desbaste);
- Peças sem grande exigência de qualidade superficial;
- Grandes áreas de contato.

Já os grãos mais finos, devem ser escolhidos para:

- Materiais duros ou quebradiços, como metal duro ou vidro;
- Peças com bom acabamento superficial;
- Para pequenas áreas de contato.

2.6.2.3. Friabilidade

Marinescu et al. (2007) definem a friabilidade como a tendência da desintegração do grão em pequenos fragmentos quando estiver sob pressão. Segundo Nascimento et al. (2016), a friabilidade é uma característica essencial para avaliação de um abrasivo.

Quanto maior a friabilidade do grão, maior sua facilidade de se fraturar e produzir novas arestas de corte, portanto, a friabilidade é uma vantagem para manter o rebolo afiado. Porém, essa característica também está ligada ao desgaste do rebolo, uma vez que quanto maior for a friabilidade, mais os grãos vão se fraturar e consequentemente maior será o desgaste do rebolo (ROWE, 2014a).

Quando relacionada com a resistência do grão, um grão mais resistente implica em um grão com menos possibilidade de se fraturar quando se choca com a peça, porém, quanto mais friável o grão (menos resistente), maior a chance do grão se fraturar e gerar novas arestas de corte e por consequência o rebolo vai se auto afiando durante a retificação (MALKIN; GUO, 2008a).

De acordo com Marinescu et al. (2007) quanto maior for o cristal mais friável ele será, e quanto menor for a taxa de resfriamento, maiores serão os cristais. Logo, grãos friáveis são obtidos quando se resfria rapidamente o material.

2.7. Tipos de abrasivos

Marinescu et al. (2007) afirmam que os abrasivos são divididos em dois grupos:

- Abrasivos convencionais como carbetto de silício (SiC) e óxido de alumínio (Al_2O_3).
- Superabrasivos como diamante e nitreto cúbico de boro (CBN)

Existe uma grande diferença entre a dureza dos materiais desses dois grandes grupos, o que resulta em diferentes desgastes do rebolo, influenciando diretamente no processo de retificação. O custo é outro fator que diferencia os convencionais dos superabrasivos, uma vez que um rebolo feito de superabrasivo é de 10 a 100 vezes mais caro que o abrasivo convencional (MARINESCU et al., 2007)

Em alguns casos a retificação só é possível com superabrasivos, que são mais duros e resistentes ao desgaste, e por consequência disso, pode-se espaçar o tempo entre uma dressagem e outra, o que diminui o custo e faz com que compense investir em superabrasivos, mesmo havendo um valor mais alto de investimento inicial (ROWE, 2014a).

De acordo com Marinescu et al. (2007), os rebolos superabrasivos geralmente são construídos com apenas uma pequena camada de abrasivo em sua periferia e seu centro é feito de materiais como plástico ou metais. Com isso, a quantidade de abrasivo é reduzida, e, por conseguinte, o custo do rebolo também é reduzido. Além disso, essa estrutura possibilita altas taxas de remoção, uma vez que é possível rotacionar o rebolo em grandes velocidades.

2.7.1. Diamante

O diamante é o mais duro material existente, sendo, portanto, utilizado para retificar materiais muito duros, incluindo as mais duras cerâmicas. Além disso, possui uma das maiores condutividades térmicas em temperatura ambiente, o que reduz a temperatura da retificação. Entretanto sua condutividade térmica reduz em altas temperaturas (ROWE, 2014a).

Segundo Marinescu et al. (2007), a dureza do diamante é uma propriedade difícil de mensurar, uma vez que o diamante quase não se deforma a temperatura ambiente, e pelo fato

de que a dureza é medida com uma ponta de diamante, o que torna difícil causar uma deformação no diamante testado.

À temperatura ambiente, a condutividade térmica do diamante é a mais elevada em relação a qualquer material, com valores entre 600 e 2000 W/m.K, porém, este valor se reduz para 70 W/m.K à uma temperatura de 700 °C.

Marinescu et al. (2007) afirmam que o diamante ocupa um lugar único na indústria, uma vez que é o único material capaz de dresser qualquer rebolo.

Nascimento et al. (2016) afirma que o diamante é termicamente estável até 800°C no ar e para mais de 1400°C em vácuo, sendo, portanto, um abrasivo com boa retenção de dureza em temperaturas elevadas.

Rowe (2014a) afirma que, como o diamante é formado por carbono, é, portanto, inadequado para retificar aços, uma vez que o carbono do diamante tem grande afinidade com o ferro do aço, causando um desgaste excessivo e com isso há um grande aumento de temperatura.

Marinescu et al. (2007) explicam que o diamante (quando metaestável à pressão normal) tem tendência a se transformar em grafite numa temperatura relativamente baixa (700°C no ar e 1500°C em meio a uma atmosfera inerte), facilitando o desgaste químico, levando à formação de componentes específicos, como é o caso do Fe_3C , causando o chamado desgaste prematuro dos grãos de diamante. Por conseguinte, o diamante é convenientemente utilizado na retificação de cerâmicas.

Além disso, Rowe (2014) ainda explica que outro problema de desgaste que o abrasivo de diamante pode ter, é o contato com oxigênio em altas temperaturas, pois o mesmo é termicamente estável até 760°C em ar e 1400°C em vácuo antes de começar a oxidar.

Os diamantes naturais utilizados na indústria são geralmente os que são rejeitados pelo mercado de joias (não atendem o padrão de forma, cor, tamanho e ainda apresentam defeitos cristalinos). Entretanto, a maior parte dos diamantes utilizados no setor industrial é de origem sintética, por vista do custo do diamante sintético ser menor do que um diamante natural. A maioria destes diamantes é utilizada em rebolos ou em dressadores de ponta única (MARINESCU et al., 2007).

Nos diamantes naturais, seu formato e tamanho são determinados pela natureza durante sua formação geológica (MALKIN; GUO, 2008a). Eles crescem predominantemente na forma octaédrica, e possuem pontos afiados ótimos para ferramentas com uma única ponta de diamante. Então, o diamante sintético domina a produção de rebolos, porém o diamante natural é comumente utilizado para ferramentas de dressagem (MARINESCU et al., 2007).

Os diamantes sintéticos por sua vez, são produzidos submetendo o grafite a altas temperaturas e elevadas pressões, na presença de um catalizador como o níquel ou outro metal do grupo VII da tabela periódica. O tamanho dos cristais e suas estruturas variam de acordo com a temperatura, pressão e tempo de processo (MALKIN; GUO, 2008a).

De acordo com Marinescu et al. (2007), o catalizador tem a função de reduzir a temperatura e pressão necessárias para transformar o carbono em diamante, o que torna o processo mais flexível. Além disso, é possível criar grãos de alta qualidade com formas definidas, através do controle do tempo e da densidade de nucleação: cúbica em baixas temperaturas, cubo-octaédrica em temperaturas intermediárias e octaédrica em altas temperaturas.

2.8. Ligantes

Os ligantes são de extrema importância na estrutura do rebolo, devido à sua função de fixação dos grãos abrasivos. As competências necessárias a estes compostos são: resistir às forças de retificação, às elevadas temperaturas, às forças centrífugas originadas da elevada rotação do rebolo e aos ataques químicos oriundos da utilização de fluido de corte. Além disso, os ligantes devem assegurar a rigidez do rebolo e manter as partículas abrasivas em posição (MALKIN; BITTER, 1989).

Rowe (2014a) separa os tipos de ligantes utilizados nos rebolos em três principais classes: Ligante resinoide, ligante vitrificado e ligante metálico.

Segundo Marinescu et al. (2007), o ligante deve ser capaz de:

- Proporcionar uma adequada retenção do grão no rebolo, sem que o abrasivo se solte de maneira prematura.
- Permitir uma controlada erosão do ligante para que as arestas de corte dos grãos abrasivos sejam expostas.
- Ser resistente o suficiente para transferir as forças de retificação do eixo para a peça.
- Proporcionar uma adequada dispersão térmica durante a usinagem.

A maioria dos rebolos de abrasivos convencionais são feitos com ligante vitrificado ou resinoide, enquanto a maioria dos rebolos constituídos de superabrasivos são utilizados ligantes resinoides ou metálicos. Entretanto, também é utilizado o ligante vitrificado para rebolos de CBN (MALKIN; GUO, 2008a).

Jackson et al. (2001) afirmam que para a escolha do ligante deve-se considerar o tamanho do rebolo, as condições de trabalho, a vida do rebolo e o custo de sua produção. Além disso, o ligante está diretamente relacionado à agressividade de um determinado rebolo (BIANCHI, 2011; BIANCHI et al., 2011).

2.8.1. Resinoide

Os rebolos com ligantes resinoides têm a tendência de serem mais elásticos do que rebolos com outro tipo de ligante. Logo, a elasticidade é um fator determinante na escolha de um ligante resinoide. Essa propriedade pode ser útil em duas situações: na segurança do local devido à alta velocidade e na aplicação de uma carga para a realização de uma superfície mais polida. Esse tipo de ligante é utilizado principalmente em abrasivos convencionais, porém, eles também podem gerar rugosidades superficiais baixíssimas quando utilizados com grãos superabrasivos. Um ponto importante sobre esse tipo de ligante, é que devido à natureza orgânica do mesmo, os rebolos que utilizam os resinoides em sua composição, têm uma vida limitada, mesmo sem serem utilizados (ROWE, 2014b)

Os rebolos com esse tipo de ligante são os mais utilizados, sendo aplicados com os diamantes em alguns casos no processo de retificação de carbeto cementados e cerâmicas, como também com grãos superabrasivos de CBN na retificação de ferramentas de corte (WEBSTER; TRICARD, 2004).

Malkin e Guo (2008a) afirmam que os rebolos resinoides com abrasivos convencionais são amplamente utilizados para retificação pesada, devido à sua alta resistência e habilidade de resistir ao choque, porém os ligantes resinoides são suscetíveis ao ataque químico por fluidos alcalinos principalmente em altas temperaturas e por tempo prolongado.

Segundo Rowe (2014a), todos os ligantes resinoides se desgastam demasiadamente quando expostos a altas temperaturas.

Os rebolos com esse tipo de ligante são produzidos misturando os grãos abrasivos com resinas sintéticas e plastificantes, moldando o rebolo em sua forma final e levando ao forno com temperaturas entre 150-200°C (MALKIN; GUO, 2008a).

Uma outra aplicação para o ligante resinoide é em discos cut-off, sendo que os mesmos são reforçados com fibra de vidro para aumentar a resistência e operar em velocidades altas (100m/s) (WEBSTER; TRICARD, 2004).

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

- Plástico - é o mais macio. Popular em abrasivos convencionais. Esse ligante é utilizado na retificação de dois discos e na retificação cilíndrica. Em superabrasivos, o ligante plástico é usado na retificação de alta precisão, normalmente usando micro grãos de diamantes na indústria de vidro e cerâmicas.
- Resina fenólica - é o segundo ligante mais utilizado, dominando o setor de retificação bruta. Esse tipo de ligante era denominado baquelite.
- Resina poliamida - esse ligante apresenta uma maior resistência, maior resistência térmica e menor estiramento que as resinas fenólicas. Portanto, é capaz de reter os grãos abrasivos por mais tempo em altas temperaturas.

2.9. Dressagem

O processo de dressagem consiste na criação e a exposição de novas arestas de corte na superfície do rebolo, através de um processo no rebolo que reestabelece o corte da ferramenta (SRIVASTAVA; SRI RAM; LAL, 1988).

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

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

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

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

Durante o processo de retificação, em torno de 10% do rebolo é realmente gasto usinando a peça e cerca de 90% do rebolo é gasto no processo de dressagem. Porém, esse

processo de afiação do rebolo é de suma importância, uma vez que durante a usinagem, as arestas de corte dos grãos abrasivos ficam arredondadas, aumentando as forças de retificação, além de ocorrer o empastamento do rebolo, onde os poros do mesmo ficam entupidos com material da peça. Sem a dressagem, o rebolo perde seu poder de corte e qualidade superficial da peça fica prejudicada (JACKSON et al., 2007).

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

Algumas anomalias no rebolo como a rugosidade, ondulação, desgaste e perda do perfil, são definidas como defeitos macroscópicos, sendo que os mesmos provocam problemas no processo de retificação e falta de precisão dimensional nas peças usinadas. Já a falta de corte nos grãos abrasivos, que gera um aumento das forças na retificação, necessitando de uma maior potência requerida, é um defeito microscópico. Esses defeitos ainda aumentam o risco do surgimento de danos térmicos nas peças, e, portanto, a dressagem tem por objetivo criar as condições ideais para o rebolo ser eficiente (KLOCKE, 2009).

De acordo com 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. Oliveira et al. (2009) definem o conceito de ponto de dressagem, ou seja, o momento adequado de realizar essa operação, onde os grãos abrasivos perderam suas arestas de corte e não removem material de maneira eficiente. Deve-se salientar se a dressagem for realizada de forma tardia, aumenta-se o risco de queimas superficiais na peça, trincas, e peças fora da tolerância, enquanto que se feita de forma precoce, proporciona um desgaste prematuro da ferramenta e perda de tempo na linha de produção.

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

Marinescu et al (2007) definem que existem dois tipos básicos de dressadores: estacionários e os rotativos. Sobre os estacionários, Rowe (2014) diz que os mesmos são divididos em dressadores estáticos de ponta única e conglomerado.

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

Sobre os dressadores de ponta única de diamante, os mesmos são constituídos de um diamante de estrutura octaédrica, soldado em um suporte de aço (KLOCKE, 2009), sendo que um terço do diamante fica exposto após soldado (MARINESCU et al., 2007).

Rowe (2014) afirma que o dressador deve ser periodicamente rotacionado para apresentar uma diferente aresta para a operação de dressagem, do contrário, o diamante começará a ficar desgastado em apenas uma aresta, gerando uma perda de eficiência no processo, devido ao aumento das forças.

O processo de dressagem feito com dressadores de ponta única, gera o macro-efeito e o micro-efeito. O primeiro é causado pelo formato do dressador e as condições de dressagem, determinando o posicionamento das arestas cortantes na topografia do rebolo, ou seja, forma uma rosca na superfície da ferramenta que é gerada devido à combinação dos movimentos relativos entre o dressador e rebolo. Já o micro-efeito é definido por Malkin (1989), como um efeito gerado a partir do arrancamento dos grãos desgastados do ligante pela fratura dos mesmos, gerando novas arestas de corte.

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

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

Onde: b_d a largura útil do dressador, e s_d é o avanço por volta do dressador.

Rowe (2014) ainda ressalta que o aumento desse parâmetro, gera uma superfície mais lisa, aumentando as forças de retificação e a energia específica. Um valor baixo do grau de recobrimento resulta em uma superfície mais afiada com maior rugosidade. As três diferentes interpretações físicas para os valores do grau de recobrimento estão indicadas na Figura 8.

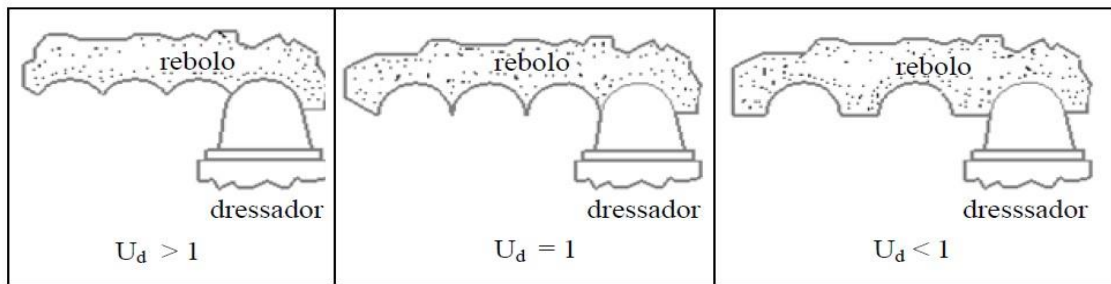


Figura 8 Influência do grau de recobrimento de dressagem na topografia do rebolo (OLIVEIRA, 1988).

Já no caso dos dressadores conglomerados, os mesmos possuem vários pontos de corte, o que resulta em uma vida maior. Além disso, é possível criar vários formatos de dressadores para lidar com os diferentes tipos de rebolos. Esse tipo de dressador possui um arranjo espacial de grãos que permite maiores avanços na dressagem e uma maior largura de dressagem, porém, nessas condições os resultados da dressagem podem ser imprevisíveis (ROWE, 2014).

Segundo o mesmo autor, se tratando dos dressadores rotativos, os mesmos apresentam maior vida devido à presença de maiores quantidades de diamantes comparando com um de ponta única, podendo haver dois tipos desses dressadores: um disco estreito com uma camada de diamante em sua periferia ou em um formato de copo com uma camada de diamantes em sua borda, sendo que este último substituí o dressador de ponta única e é usado de maneira semelhante, movimentando o dressador transversalmente na superfície do rebolo.

Uma vez que os dressadores rotacionais que são mais finos que os rebolos a serem dressados, Klocke (2009) afirma que os mesmos devem possuir uma movimentação lateral. Além disso, os dressadores em formato de copo são normalmente usados para dressar rebolos de produção seriada, porém estão restritos à sua aplicação em rebolos de perfis simples, uma vez que rebolos com perfis não lineares são dressados com dressadores de disco.

2.10. Fluido de corte

Durante o movimento relativo de corte entre a peça e a ferramenta, quase 99% da energia fornecida à máquina é convertida em calor. Ao se usar um material ferroso, a temperatura aumenta com a velocidade e a força da ferramenta diminui, o que ocasiona um desgaste mais rápido da ferramenta, como também pode ocasionar uma falha na mesma (BRUNI et al., 2006).

Barczak et al. (2010) ressaltam que a remoção de material em processos abrasivos é problemática devido a altas temperaturas. Por conseguinte, é de suma importância uma efetiva

lubrificação e refrigeração para assegurar que a temperatura não se torne excessiva. Oliveira et al. (2012) afirmam que o fluido de corte reduz temperatura e também atrito, minimizando as forças e estresse residual na peça.

Além disso, para Debnath et al. (2014) o fluido de corte também favorece a qualidade final da peça, produzindo um melhor controle dimensional e uma ótima qualidade superficial. A melhora da qualidade superficial não é apenas a respeito da aparência, uma baixa rugosidade favorece na resistência a corrosão da peça e na redução de tensões residuais. O fluido também tem a função de remover o cavaco produzido da área de corte.

Usinar em alta velocidade gera maior produtividade, porém a alta temperatura limita a velocidade de corte devido ao desgaste da ferramenta. O uso de uma ferramenta desgastada, aumenta o consumo de energia e reduz a qualidade do acabamento superficial da peça. Portanto, é necessário arrefecer a zona de corte, de modo a aumentar a vida da ferramenta e consequentemente manter a qualidade do acabamento da peça (SHARMA; TIWARI; DIXIT, 2016). Na mesma linha de pensamento, Sanchez et al. (2010) ressaltam é essencial que grandes quantidades de energia térmica sejam retiradas do processo, pois, do contrário, pode ocorrer queima da peça e deformações induzidas termicamente.

Analisando o aumento da temperatura na zona de corte, Malkin & Guo (2008) afirmam que podem surgir vários tipos de danos térmicos, como por exemplo: queima da peça, transformação de fase da estrutura, alteração da dureza superficial, tensão residual superficial desfavorável, trincas na peça e no rebolo e redução da resistência à fadiga.

Os fluidos de corte são utilizados para melhorar as características dos processos tribológicos que estão sempre presentes no contato entre peça e ferramenta. Logo, geralmente melhoram a eficiência do sistema de produção ao qual são inseridos (SOKOVIĆ; MIJANOVIĆ, 2001).

Segundo Irani et al. (2005), um dos maiores fatores limitantes no processo de retificação é o dano térmico, sendo que este pode ser reduzido pela aplicação de fluidos de corte, uma vez que os mesmos diminuem a temperatura da zona de corte por transferência de calor.

De maneira geral, os fluidos de corte são responsáveis por refrigerar a zona de corte, lubrificar o contato entre a peça e a ferramenta (o que reduz o atrito) e retirar o cavaco da zona de corte. Klocke (2009) ainda descreve as tarefas como proteger contra a corrosão tanto a retificadora quanto a peça, sendo, muitas vezes, fortemente voltados para esse fim, onde há a adição de aditivos anti-corrosivos em sua fórmula química.

O mesmo autor ainda afirma que a principal característica física de um fluido de corte é a viscosidade, uma vez que essa característica está ligada as duas principais funções do fluido de corte: lubrificação e refrigeração. Um fluido de corte com baixa viscosidade tende a aumentar o poder refrigerante, além de ser mais fácil de retirar da peça e de se filtrar. Entretanto, aumenta a produção de vapor, formando uma névoa que causa irritação na pele e doenças respiratórias.

Os fluidos de corte reduzem a temperatura retirando diretamente o calor do processo e mantendo a eficiência de corte do rebolo (devido a redução do atrito), o que diminui a energia específica (ROWE, 2014).

Como consequência dessas funções básicas, o fluido refrigerante reduz a potência necessária para o corte, reduz o consumo de energia, aumentam a vida da ferramenta e ajudam no melhor acabamento da superfície usinada. Porém, já foi demonstrado que os custos associados à utilização de fluidos de corte, representam uma parte significativa dos custos totais da peça fabricada (BRUNI et al., 2006).

Portanto, segundo Barczak et al. (2010), o controle da geração de calor se faz absolutamente necessário no processo de retificação para a qualidade e integridade térmica da peça final. Deve-se salientar que devido ao atrito, deformação elástica e remoção de cavaco, as temperaturas na zona de corte podem atingir 1800°C, porém essa temperatura dura poucos milissegundos, sendo proporcional à velocidade de corte. Eles concluem com a informação de que na indústria, o método mais usado é o convencional, no qual o fluido lubrificante ocorre com abundância na área de corte a uma velocidade baixa do fluido.

2.10.1. Problemas na utilização do fluido de corte

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

As várias substâncias presentes nos fluidos afetam os operadores de máquinas, seja pelo contato com a pele, pela ingestão da substância, como também pela respiração e pela irritação gerada por uma névoa de fluido que pode se formar devido à evaporação do mesmo. Os fluidos de corte podem ser eliminados após o uso dentro da empresa ou externamente, através de uma empresa de eliminação de resíduos. (SOKOVIĆ; MIJANOVIĆ, 2001)

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

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

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

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

2.10.2. Custos dos fluidos de corte

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

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

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

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

2.10.3. Manutenção e descarte

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

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

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

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

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

Em relação aos óleos integrais, os mesmos podem ser vendidos para uma nova refinação ou reciclados pelo fabricante do fluido, assim como por empresas especializadas.

Ainda assim, esse tipo de óleo refrigerante pode ser incinerado em caldeiras, desde que respeitando a legislação ambiental, ou seja, isento de impurezas, no estado seco, apresentando baixa concentração de enxofre e cloro.

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

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

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

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

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

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

2.10.4. Mínima quantidade de lubrificante – MQL

Bianchi et al. (2012) explica que a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) consiste basicamente na aplicação um jato de ar comprimido com uma quantidade

mínima de fluido de corte de forma direta na zona de corte. Porém, é de suma importância que a mínima quantidade de fluido de corte seja suficiente para a redução do atrito e para que a aderência de materiais seja evitada.

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

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

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

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

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

vantajoso no desgaste diametral do rebolo, tendo apresentado melhor desempenho que o método de lubrificação convencional em todas as velocidades de mergulho, o que os autores atribuíram à melhor capacidade de lubrificação desse sistema quando comparado com a lubrificação convencional. Outrossim, valores mais baixos de potência de retificação foram registrados após a usinagem com a técnica de 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) afirmam que as variáveis de saída podem ser divididas em três camadas. São elas: a transformação da peça em uma forma e acabamento desejado; o consumo de energia, gasto e impactos ambientais, e por fim os parâmetros que definem a performance da retificação.

Nesta seção, serão tratadas as principais variáveis de saídas envolvidas na realização deste trabalho.

2.11.1. Rugosidade

A rugosidade é caracterizada por micro irregularidades geométricas na superfície do material usinado. A rugosidade consiste em marcas ocasionadas pelo perfil da ferramenta, somado à outras irregularidades (CARPINETTI, 2000).

Porém, se tratando da retificação, segundo Winter (2004), a rugosidade apresenta elevado grau de complexidade em seu entendimento, uma vez que seu resultado final depende de vários parâmetros, como a composição da peça e do rebolo, a dressagem, o fluido de corte, a técnica de lubri-refrigeração, além de fatores como a rigidez do equipamento, a velocidade de remoção, a granulometria do rebolo, entre outros. Esses parâmetros são de grande valia, uma vez que influenciam a força de corte, o que gera mudanças na rugosidade superficial ao final do processo.

Segundo Carpinetti (2000), é possível quantificar a rugosidade a partir da amplitude (altura) e espaçamento (largura) das irregularidades na peça. Os parâmetros comumente usados são: Rugosidade média (R_a); Rugosidade média quadrática (R_q); Máxima distância entre pico e vale (R_t); Média das distâncias entre saliências (S_m); Fração de contato (t_p); Média da inclinação das irregularidades do perfil (Δa), entre outros.

A rugosidade normalmente é obtida através de aparelhos eletrônicos, como o rugosímetro. Tal instrumento obtém o valor da rugosidade através da movimentação de um

apalpador pela superfície da peça, que varia de acordo com as irregularidades da superfície usinada.

2.11.2. Relação G

Além da redução do diâmetro do rebolo, seu desgaste também pode ser observado pela sua redução volumétrica. As três formas de desgaste do rebolo durante a retificação, segundo Liao et al. (2000), são: atrito entre peça e grão abrasivo, fratura do ligante e fratura do grão. As formas de desgaste podem ocorrer devido às solicitações de trabalho ao qual o rebolo é submetido ou pela deterioração térmica do ligante.

O desgaste total pode ser expresso por uma relação chamada “G”, definida pela taxa volumétrica de material removido em relação ao volume desgastado do rebolo, por consequência, esta relação indica o desempenho do rebolo. A relação “G” pode ser determinada em termos matemáticos, segundo Lauer-Schmaltz e Konig (1980), pela equação a seguir:

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

Onde Z_w e Z_s correspondem ao volume do material removido e volume gasto do rebolo, respectivamente.

O desgaste do rebolo é comumente associado à qualidade da rugosidade superficial da peça e às suas tolerâncias. Ao se elevar a taxa de remoção de material na retificação, a relação G tende a reduzir, e isso ocasiona uma redução no acabamento da superfície. A utilização de fluidos de corte pode aumentar a relação G, pois reduzem a temperatura do processo de usinagem (MALKIN, 1989).

2.11.3. Circularidade

O desvio de circularidade pode ser definido como qualquer diferença ou desvio entre a peça usinada e a peça projetada, no que se refere as tolerâncias de forma especificadas em peças cilíndricas (J\KEDRZEJEWSKI; MODRZYCKI, 1997).

Segundo (HOLESOVSKY; HRALA, 2004), o que determina a precisão de uma peça em retificação são fatores como 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 gerado entre peça e ferramenta durante a retificação pode ser considerado um fator crucial no aparecimento de erros de circularidade. Com isso, a aplicação de um fluido de corte adequado tende a reduzir o atrito e, portanto, aumentar a qualidade geométrica final da peça (MINKE, 1999).

2.11.4. Microscopia confocal

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

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

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

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

Denkena et al. (2015) utilizou a microscopia confocal para medir a rugosidade superficial de uma peça, sendo possível comparar o acabamento visualmente e quantitativamente.

No trabalho de Tahvilian et al. (2015), a microscopia confocal foi utilizada para verificar a topografia de rebolos utilizados em restauração de turbinas, devido a capacidade desse microscópio em analisar a superfície em 3D. A partir do microscópio confocal, foi

possível quantificar a altura dos grãos do rebolo. Os autores ainda ressaltam que esse método de análise permite uma excelente distinção entre os grãos e o ligante do rebolo.

2.11.5. Potência de retificação

Malkin (2008) define que a potência de retificação (P) está relacionada com as componentes tangencial (Ft) e normal (Fn) da força de corte de acordo com a equação 12.

$$P = Ft (vS \pm vW) \quad (12)$$

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

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

$$P = Ft.vS \quad (13)$$

Segundo Rowe (2014), o ciclo da potência é dividido nos seguintes estágios como está exemplificado na Figura 9. A princípio, o rebolo gira sem carga, e assim, a potência dissipada (P_{NL}) é resultante do atrito do motor e dos mancais. Já em seguida, com o acionamento do fluido de corte há um aumento da potência dissipada (P_f) devido à resistência que o fluido causa ao giro do rebolo. A potência dissipada P é resultado do contato do rebolo com a peça e logo em seguida há o período de *spark-out*, onde a potência se estabiliza e vai diminuindo.

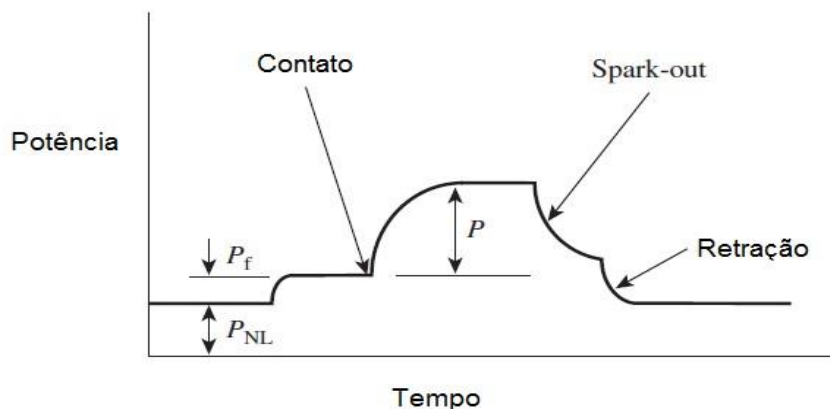


Figura 9 Ciclo de variação da potência (Rowe, 2014-modificado).

2.11.6. Análise de custos na retificação

Field *et al.* (1980) desenvolveram uma técnica para avaliar o custo e o tempo em três diferentes tipos de processos de retificação, incluindo a retificação cilíndrica externa de mergulho. Um dos principais atributos dessa técnica é a capacidade de analisar o custo de forma separada por fatores detalhado. No trabalho dos autores, os cálculos de custo foram feitos usando computadores e calculadoras programáveis.

Posteriormente, (SATO et al., 2022) utilizaram o trabalho de Field et al. (1980) como referência e fizeram algumas adaptações para a análise de custos. Complementarmente às análises das variáveis de saída, o trabalho dos autores apresenta o custo por peça para cada condição de usinagem. A equação 14 utilizada pelos autores está 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 pode ser dividida em três principais fatores: custo do rebolo, custo do fluido e custo da energia. A equação considera o custo do desgaste do rebolo durante a retificação e o desgaste devido à dressagem necessária. O Custo do fluido é o custo de compra e descarte do fluido. O custo da energia é o custo da energia utilizada no processo de retificação e nos equipamentos do método lubrificação-refrigeração. Assim, é possível obter um valor de custo de aplicação dos métodos analisados por US\$/peça.

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

2.12. Cerâmicas Avançadas

De acordo com Rodríguez et al. (2022), as cerâmicas avançadas são atualmente utilizadas em um grande número de aplicações estruturais e funcionais. A alta resistência é um requisito básico em aplicações estruturais, como ferramentas de usinagem, rotores ou válvulas, enquanto a cerâmica funcional apresenta uma variedade de propriedades: elétrica, magnética, biológica ou óptica, podendo ser aplicadas em diferentes soluções.

Shareef et al. (2022) complementam que as várias propriedades da cerâmica de engenharia incluem resistência ao calor, isolamento, resistência à abrasão, alta resistência, autolubrificação, estabilidade dimensional, isolamento elétrico, propriedades não magnéticas, dielétricos, condutividade iônica, emissão de elétrons, fluorescência, transparência, polarização, fotossensibilidade, absorvidade, compatibilidade biológica, atividade catalítica, resistência à corrosão, etc. A combinação dessas propriedades torna a cerâmica útil 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 de reator nuclear e reator de fusão, combustível nuclear, etc.

As principais cerâmicas avançadas são: zircônia, carboneto de silício, alumina e nitreto de silício. Embora as propriedades desses materiais sejam altamente desejáveis em ambientes extremos, a alta fragilidade inerente e a baixa resistência ao cisalhamento representam um desafio significativo para sua usinabilidade. A usinagem de cerâmica também é prejudicada por danos na superfície e desgaste excessivo da ferramenta (BHARATHI et al., 2021).

As cerâmicas são inerentemente frágeis com baixa tenacidade à fratura. Componentes cerâmicos falham em tensão devido a falhas que são introduzidas durante o processamento e/ou usinagem. Em materiais otimizados, tais falhas são tão pequenas que estão além da detecção pelas técnicas de avaliação não destrutivas atuais. Como o tamanho, a forma e a orientação das falhas são variáveis, a resistência pode variar consideravelmente e, portanto, abordagens estatísticas de projeto são obrigatórias. Existem dois tipos de defeitos presentes na cerâmica. Os defeitos intrínsecos, como contornos de grão, poros, aglomerados ou inclusões, os quais estão distribuídos pela massa dos componentes. Defeitos extrínsecos associados à moldagem ou usinagem estão localizados na superfície (RODRÍGUEZ et al., 2022).

Como a distribuição de defeitos é determinada pelo método de processamento, é crucial avaliar os processos de fabricação de cerâmicas, como é o caso da retificação.

Nesse sentido, segundo Shareef et al. (2022), o uso comercial de cerâmica avançada tem sido prejudicado pela falta de um processo de usinagem eficiente e de baixo custo. Segundo os mesmos autores, dois dos requisitos mais importantes para viabilizar economicamente a usinagem da cerâmica são: obter taxas de remoção de material suficientemente altas e desenvolver um processo de usinagem que não cause danos superficiais e subsuperficiais ao componente cerâmico. Isto posto, os autores explicam que é importante estudar, em profundidade, processos de usinagem que tenham potencial para usinar cerâmicas avançadas de forma eficiente e confiável.

Choudhary et al. (2018) estudaram a retificação de alumina utilizando rebolo de diamante, comparando a lubrificação convencional com o MQL. A principal conclusão dos autores foi que a alumina apresentou maiores deformações plásticas quando utilizou-se o MQL. Na lubrificação convencional, a alumina apresentou mais fraturas frágeis. Além disso, a rugosidade da peça foi inferior utilizando a lubrificação convencional. Os autores atribuem esse comportamento ao baixo atrito sob óleo MQL puro, o que aumentou a deformação plástica e ajudou a manter os picos e vales intactos na superfície da peça. Esse aumento de deformação plástica gerou um aumento nas tensões residuais da peça.

Portanto, estudar a retificação de cerâmicas avançadas se faz necessário para suprir a demanda por aplicações de cerâmicas em projetos, contudo, é necessário avaliar diversos aspectos pois se trata de um processo de usinagem complexo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados os equipamentos e técnicas que foram utilizados durante o trabalho experimental. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” FEB/UNESP, campus Bauru – SP. A metodologia deste trabalho, consistiu na experimentação e obtenção de resultados a partir da análise de parâmetros e variáveis de saída. Vários ensaios foram realizados a fim de se obter uma maior confiabilidade estatística.

Os ensaios experimentais foram realizados em uma retificadora cilíndrica, modelo RUAP515H da empresa Sulmecânica. Esta retificadora cilíndrica está equipada com um CNC Fagor. Para este trabalho, as peças foram fabricadas em forma de anel a partir de alumina comercial, composta por 96% de óxido de alumínio e 4% de óxidos fundidos como SiO_2 , CaO e MgO, com densidade aparente de 3,7 g/cm³ e dimensões de diâmetro externo de 54 mm, diâmetro interno de 30 mm e espessura de 4,5 mm. A geometria da peça de trabalho é mostrada na Figura 10.

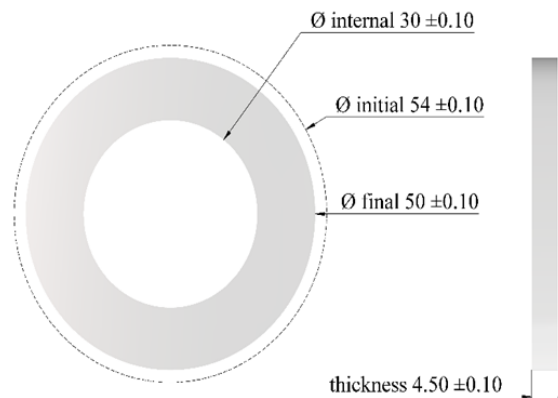


Figura 10 Dimensões da peça

Foi utilizado um rebolo diamantado composto por um ligante resinóide 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.

Vinte e quatro corpos de prova cerâmicos foram utilizados nos experimentos, os quais foram submetidos às seguintes condições de usinagem: velocidade de corte (V_s) de 30 m/s, rotação da peça (V_w) de 204 rpm, penetração do rebolo na peça (a) de 0,1 mm, tempo de *spark-out* (t_s) de 5 s, largura de retificação de 4 mm, profundidade de dressagem (ad) de 0,02 mm por passe. As quatro velocidades de avanço selecionadas foram: 0,25, 0,50, 0,75 e 1,00 mm/min. O fluido de corte utilizado na lubrificação convencional e MQL foi um óleo semissintético Rocol 4847 Ultracut 370. Em sua composição, há anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, tensoativos não iônicos e outros. Para o método de lubrificação-refrigeração convencional, foi utilizada uma emulsão de água a 5% do fluido de corte e uma vazão de 15 l/min.

Foi utilizado o aplicador MQL da marca AccuLube 79053D, fornecido pela ITW Chemical Products Ltda. Este sistema utiliza o princípio de pressão e vazão, no qual o fluido de corte é bombeado com ar comprimido até próximo ao rebolo. A partir daí, a mistura ocorre dentro do bocal e é direcionada para a interface rebolo-peça.

Este equipamento utiliza um sistema de alimentação de óleo pulsante e permite a regulação do fluxo de ar comprimido e lubrificante de forma separada. A vazão aplicada foi de 100 ml/h e a pressão do ar em MQL de 8 bar, gerando uma velocidade de saída de ar de 30 m/s no bocal MQL. A configuração das técnicas de lubrificação-refrigeração convencional e MQL é exemplificada na Figura 11.

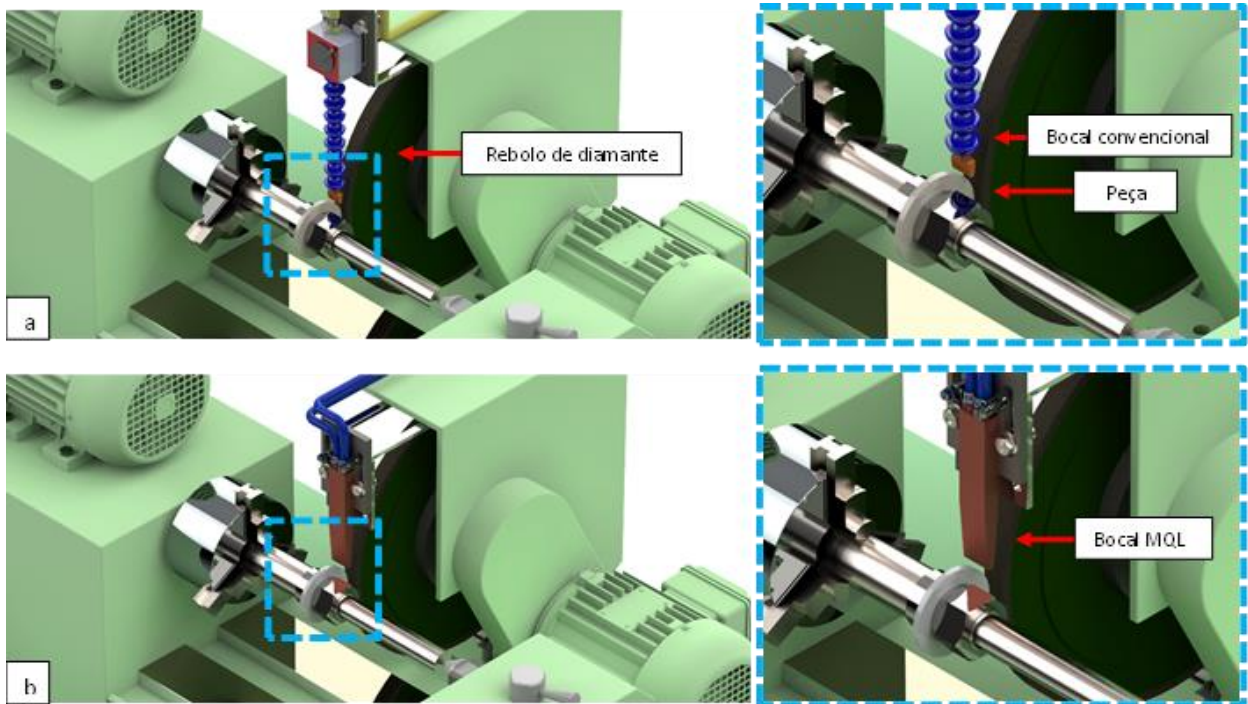


Figura 11 Montagem experimental com (a) lubrificação convencional e (b) MQL

Os parâmetros de entrada e saída foram definidos com base na variação da velocidade de avanço e métodos de lubrificação-refrigeração. Neste trabalho, o desempenho do processo foi avaliando 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 analisada em um microscópio confocal.

O parâmetro de rugosidade escolhido foi a média aritmética (R_a) medida por rugosímetro - modelo Surtronic 3+, da Taylor Hobson, com comprimento de *cut-off* de 0,8 mm e raio da ponta da ponta de 2 μm . As medidas de desvio de circularidade foram feitas em todos os experimentos com o equipamento Taylor Hobson Talyrond 131C. O desgaste diametral do rebolo foi medido para obter a relação 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 representado na Figura 12.

Em seguida, o desgaste diametral do rebolo foi medido por meio de projeção de perfil com TalyMap, um software de análise de superfície da Taylor Hobson Company.

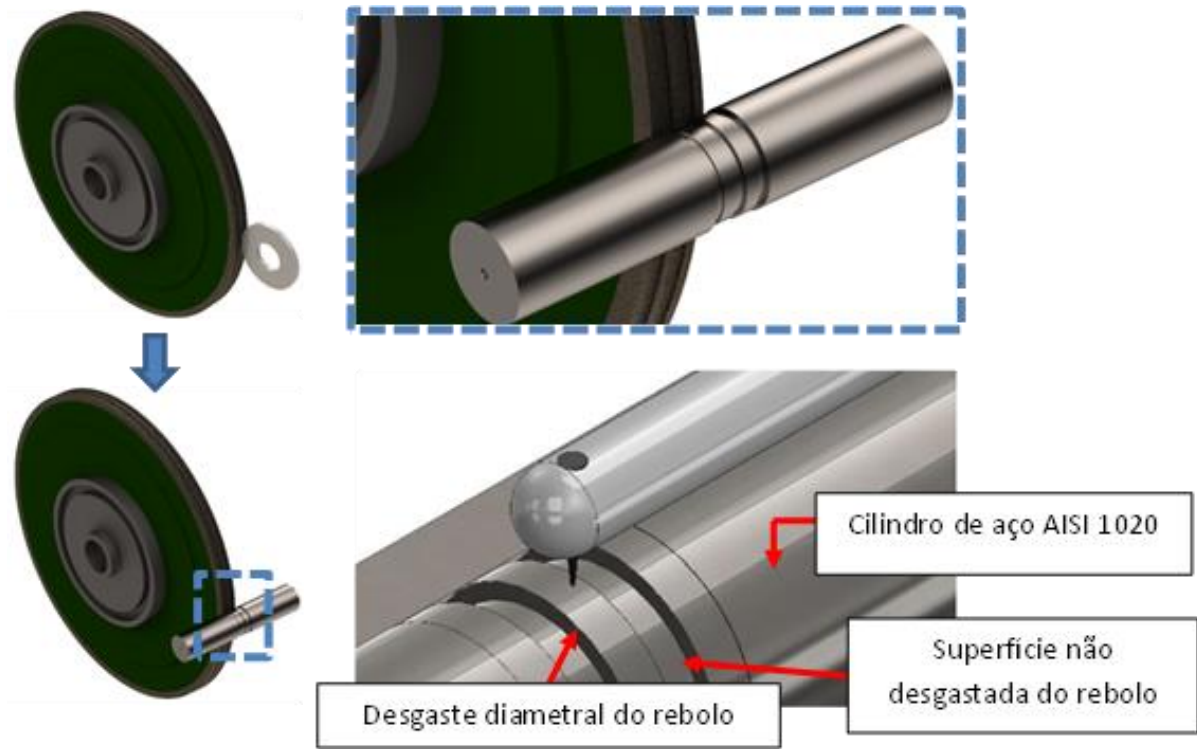


Figura 12 Metodologia para medição do desgaste diametral do rebolo

Além disso, a topografia da peça foi analisada após o processo de retificação com um microscópio confocal, modelo OLS 4000, da Olympus Company, em ampliação de 20 e 100x. A potência de retificação foi adquirida por sensores Hall, com 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 Curvpower 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 é essencial para analisar a viabilidade de novas técnicas. A equação 14 mostra as variáveis consideradas no cálculo do custo. Os parâmetros para compor o custo por peça foram selecionados a partir dos trabalhos de Field (1980) e Pusavez et al. (2010). Para este trabalho, os parâmetros aplicados na Equação 14 são apresentados na Tabela 1.

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

Tabela 1 Variáveis consideradas para análise de custo

Símbolo	Descrição	Unidade	Valor		
a_d	Profundidade de dressagem	[mm]	-	0,002	-
a_e	Profundidade de retificação	[mm]	-	2,5	-
b_s	Largura do rebolo	[mm]	-	15	-
C_e	Custo da energia	[US\$/kWh]	-	0,12	-
C_f	Custo do fluido de corte	[US\$/l]	Convencional	0,4125	-
			MQL	13,75	-
C_s	Custo do rebolo	[US\$/mm ³]	-	0,000192087	-
C_w	Custo de desgaste do fluido de corte	[US\$/l]	-	0,085	-
v_w	Velocidade de avanço	[mm/min]	0,25; 0,50; 0,75 e 1,00		
G	Razão G	[-]	Vel. Avanço	Convencional	MQL
			0,25	341,2	80,0
			0,50	264,6	63,6
			0,75	217,6	51,1
			1,00	185,9	49,6
N_c	Número de ciclos do fluido	[-]	Convencional	200	
			MQL	1	
P_c	Potência de retificação	[W]	Vel. Avanço	Convencional	MQL
			0,25	1041,1	1760,41
			0,50	1156,78	1956,01
			0,75	1388,13	2347,21
			1,00	1846,22	2497,43
R	Distância sem contato rebolo-peça	[mm]	-	300	-
r	Taxa de avanço sem contato	[mm/min]	-	5000	-
v_{jet}	Vazão de fluido de corte	[l/min]	Convencional	7,5	-
			MQL	0,0016	-
t_{so}	Tempo de spark-out	[min]	-	0,13333	-
V	Volume de material removido	[mm ³ /piece]	-	1469,52	-

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

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

4.1. Rugosidade

A rugosidade é o parâmetro que determina a precisão dimensional e a qualidade da superfície da peça retificada. A Figura 13 compara a rugosidade obtida com a técnica de lubrificação convencional e MQL para as velocidades de avanço de 0,25, 0,50, 0,75 e

1,00 mm/min. A técnica convencional obteve os melhores valores de rugosidade em todas as velocidades de avanço. Nesse sentido, a técnica convencional sempre apresentou valores de rugosidade abaixo de 1,02 μm , enquanto o MQL sempre obteve valores acima de 1,11 μm . Além disso, é possível perceber uma tendência de crescimento da rugosidade da superfície à medida que a velocidade de avanço aumenta, independentemente da técnica de lubrificação-refrigeração utilizada. Desta forma, o MQL obteve a menor rugosidade superficial e a mais próxima do convencional com o avanço de 0,25 mm/min.

Moretti et al. (2021) compararam as técnicas de lubrificação convencional e MQL na retificação de aço VP50. Este estudo mostrou uma tendência à redução da rugosidade da superfície ao utilizar a técnica convencional no sistema de lubrificação-refrigeração. Por outro lado, este método apresenta altos custos de retificação e altas emissões de CO₂. Assim, os autores concluíram que a aplicação da MQL deve ser avaliada, tendo em vista os aspectos econômicos e ambientais. Ou seja, mesmo que resultados inferiores, o MQL pode fazer sentido desde que o custo dele seja mais baixo.

No processo de retificação, a técnica de lubrificação convencional promove uma excelente limpeza dos poros do rebolo, resultado da grande quantidade de fluido injetado na interface peça-rebolo, evitando que o rebolo empaste e os cavacos fiquem aderido à superfície da peça (LOPES et al., 2022).

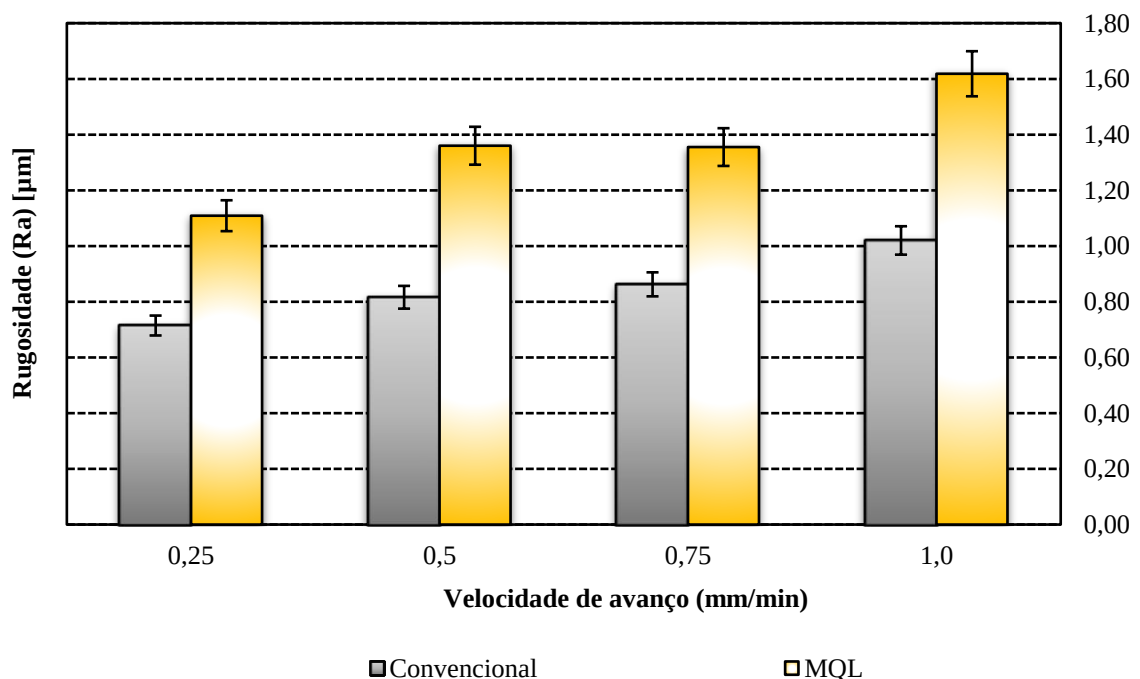


Figura 13 Rugosidade para cada condição de usinagem

Além disso, o método convencional promove a lubrificação-refrigeração ideal da zona de corte, reduzindo o atrito e as temperaturas entre a peça e o rebolo. Dessa forma, o corte do material é realizado com mais precisão e qualidade. Na técnica MQL, o processo de corte do material é menos eficiente, pois há um baixo volume de fluido de corte aplicado, dificultando a lubrificação, refrigeração e dificultando a limpeza da superfície de corte do rebolo. Nesse sentido, a rugosidade da superfície é diretamente afetada, uma vez que ocorrem arranhões e deformações na superfície da peça (DE MELLO BELENTANI et al., 2014). Assim, os valores de rugosidade obtidos pelo MQL tornam-se significativamente maiores do que pelo convencional. Entretanto, vale ressaltar que nesse experimento os resultados obtidos pelo MQL são positivos, pois todos os valores são inferiores a $1,60\text{ }\mu\text{m}$ (MALKIN; GUO, 2008a). Além disso, a rugosidade obtida pelo MQL foi próxima ao convencional, na qual houve um aumento de 55% na velocidade de avanço de $0,25\text{ mm/min}$. Nesse sentido, Lopes et al. (2019c) afirmam que o ganho em sustentabilidade e menor custo do fluido podem compensar a piora na qualidade da peça, aumentando a viabilidade desta técnica. Portanto, MQL pode vir a ser uma alternativa de lubrificação-refrigeração mesmo com piores resultados, desde que tais resultados ainda estejam em níveis aceitáveis e o custo seja reduzido.

A velocidade de avanço também é um fator determinante para o crescimento da rugosidade. Por exemplo, no método convencional, a rugosidade apresentou um aumento de 43%, quando variou-se a velocidade de avanço de $0,25$ a $1,00\text{ mm/min}$. Em contrapartida, no MQL esse aumento foi de 46%. Nessa perspectiva, Daniel et al. (2020) explicam que isso ocorre devido ao aumento da espessura do cavaco. Quanto maior a velocidade de avanço, mais severas se tornam as condições de corte. Assim, forças maiores são necessárias para cortar o material, o que prejudica a qualidade da superfície da peça.

A microscopia confocal é uma técnica de avaliação topográfica que analisa as irregularidades da superfície, conforme mostrado na Figura 14. Desta forma, é possível comparar as imagens obtidas com a rugosidade medida. Na Figura 14, observa-se a mesma tendência dos resultados para o parâmetro rugosidade. A técnica convencional apresentou alta eficiência, na qual a remoção do material foi feita predominantemente, pelo modo de fratura frágil, a partir de microfissuras e lascamento superficial. Por outro lado, a técnica MQL obteve a pior qualidade de acabamento devido ao aparecimento de bandas de deformação plástica (arranhões) na superfície da peça (JAVARONI et al., 2019).

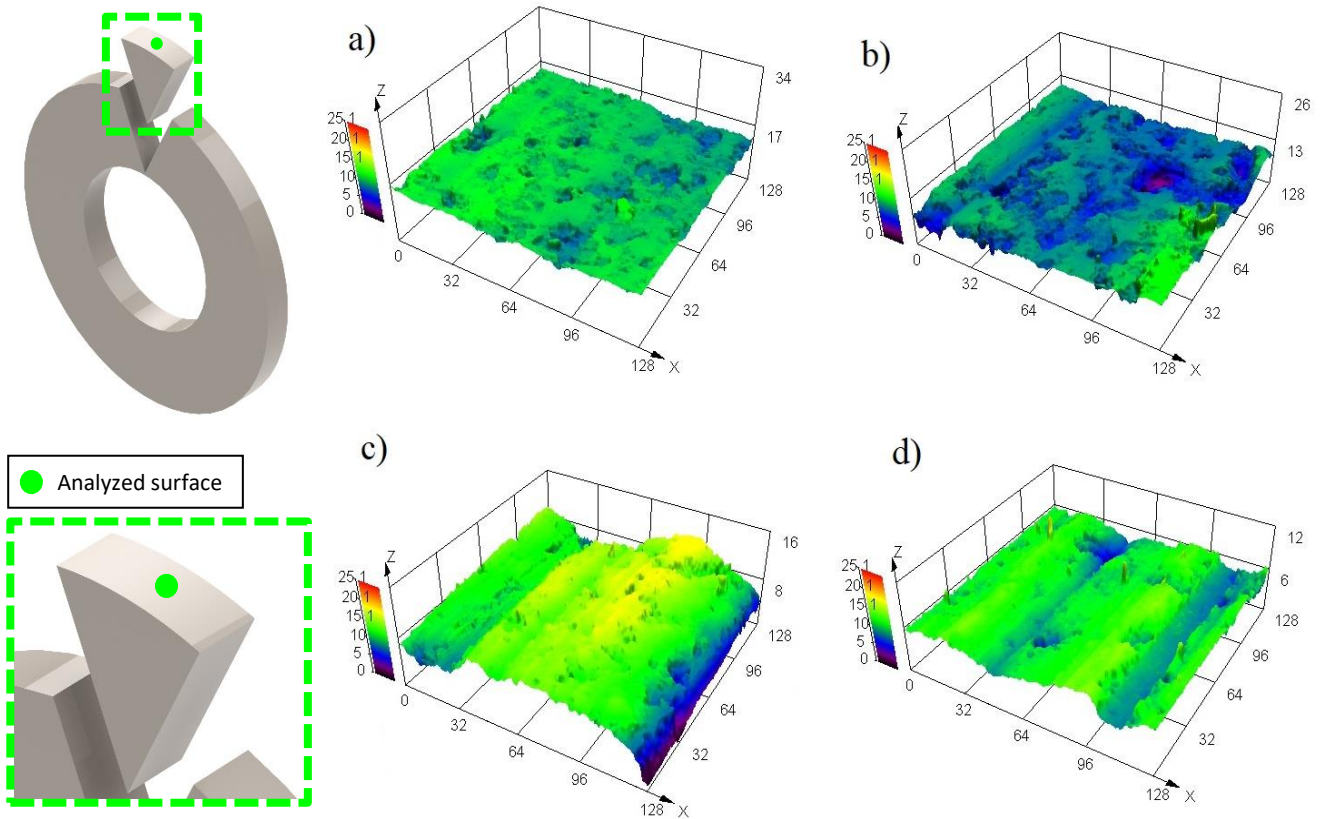


Figura 14 Microscopia confocal da superfície retificada para (a) convencional a 0,25 mm/min, (b) convencional a 1,00 mm/min, (c) MQL a 0,25 mm/min e (d) MQL a 1,00 mm/min.

Além disso, o aumento da velocidade de avanço aumentou as irregularidades da superfície à medida que a profundidade de penetração do rebole na peça aumentou. Portanto, o convencional apresenta os melhores resultados de rugosidade. Por outro lado, como comentado anteriormente, o MQL pode surgir como uma técnica promissora, dado seu grande potencial econômico e sustentável. Além disso, há uma tendência da rugosidade da superfície diminuir com a diminuição das velocidades de avanço. Assim, melhorando as características do MQL quando utilizado em baixas velocidades de avanço, pode aumentar sua aplicabilidade.

4.2. Desvios de circularidade

O desvio de circularidade corresponde à variação geométrica entre o perfil circular ideal e real da peça. Assim, este parâmetro está diretamente associado às distorções térmicas e tensões de compressão que ocorrem durante o processo de retificação (LOPES et al., 2021;

MORETTI et al., 2020). A Figura 15 apresenta os valores de desvio de circularidade obtidos para todas as condições testadas.

Durante a retificação, o calor deve ser removido adequadamente do contato peça-rebolo. As altas temperaturas durante o processo de corte podem causar danos térmicos e microestruturais na superfície da peça e a variação geométrica em seu perfil.

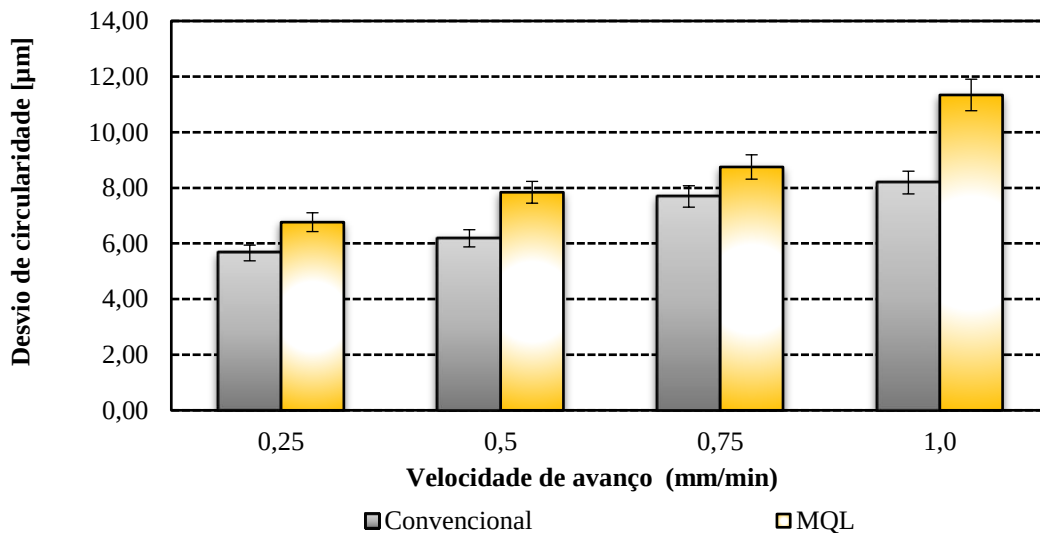


Figura 15 Desvio de circularidade para cada condição de usinagem

Assim, os fluidos de corte são utilizados para lubrificar-refrigerar essa região e evitar a perda de precisão e qualidade. Ainda, na Figura 15, é possível observar a mesma tendência de resultados apresentada pelo parâmetro rugosidade. Ou seja, a técnica convencional apresentou os menores desvios da circularidade (valores entre 5,66 μm e 8,19 μm), seguido de desvios da técnica MQL (valores entre 6,77 μm e 11,34 μm). Além disso, as velocidades de avanço de 0,25 e 0,75 mm/min apresentaram a menor diferença entre os valores do convencional e MQL. Finalmente, a condição de retificação mais severa teve uma velocidade de avanço de 1,00 mm/min. A técnica de lubrificação-refrigeração convencional obteve o melhor desempenho de retificação. Este método injeta um grande volume de fluido de corte entre a peça e o rebolo, garantindo alta eficiência de refrigeração, lubrificação e limpeza, principalmente diminuindo as temperaturas e deformações na superfície de corte (DA SILVA et al., 2020). No entanto, a técnica de lubrificação-refrigeração convencional representa uma parcela significativa do custo de retificação. Nessa perspectiva, a MQL pode surgir como uma técnica alternativa de lubrificação-refrigeração para retificação. No entanto, esta técnica apresenta baixa eficiência na refrigeração e limpeza do rebolo, contribuindo para o aumento das temperaturas e, consequentemente, dos desvios geométricos da peça (LOPES et al., 2019d).

Por outro lado, foi observada uma diferença percentual de apenas 13% entre o MQL e o convencional, na velocidade de avanço de 0,75 mm/min. Portanto, dependendo da análise de custos, o MQL pode vir a se tornar viável para garantir a tolerância geométrica da peça. Por fim, é possível observar a relação direta entre o aumento da velocidade de avanço e o desvio de circularidade. Ribeiro et al. (2020) afirmam que velocidades de avanço mais altas tornam as condições de usinagem mais severas devido ao aumento das forças necessárias para o corte. Consequentemente, o aumento da temperatura é responsável por expansões térmicas e baixa homogeneidade na peça. Por outro lado, o aumento do desvio de circularidade entre a velocidade de avanço de 0,25 a 0,75 mm/min foi significativamente pequeno (23% para convencional e 16% para MQL). Portanto, o MQL apresenta resultados comparáveis à convencional, principalmente nestas velocidades de avanço.

4.3. Desgaste diametral do rebolo

A Figura 16 apresenta os valores médios obtidos para o desgaste do rebolo para as duas técnicas de lubrificação-refrigeração testadas. Inicialmente, é possível verificar que o desgaste do rebolo foi maior ao aplicar o método MQL, com maior desgaste do que o método de lubrificação-refrigeração convencional registrado para todas as velocidades de avanço. No entanto, seu resultado se deve principalmente à temperatura da zona de corte, sendo que o MQL é menos eficaz que o convencional no resfriamento do conjunto rebolo-peça (BIANCHI et al., 2018).

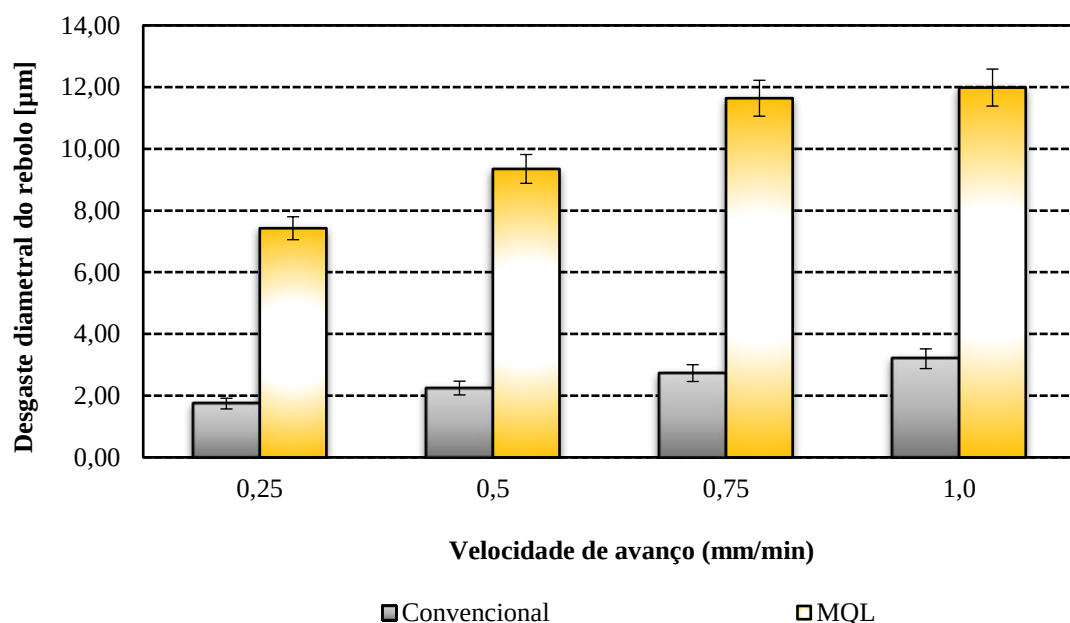


Figura 16 Desgaste diametral do rebolo para cada condição de usinagem

Nesse sentido, deve-se lembrar que a temperatura é um fator crítico para a montagem do rebolo, pois a resistência do ligante é severamente reduzida quando imposta em altas temperaturas. Também, nesse sentido, à medida que o ligante une os grãos abrasivos, a redução de sua resistência às forças mecânicas intensifica a perda de material abrasivo do rebolo, causando diretamente um desgaste mais significativo do rebolo. Quanto aos avanços, nota-se que seu aumento reflete diretamente um desgaste mais significativo, fato já esperado pelas maiores forças entre o rebolo e a peça. Além disso, o aumento da temperatura do processo contribui para outros possíveis danos dimensionais e geométricos na peça. Como referência, para as velocidades de avanço de 0,25 mm/min e 1 mm/min, são registradas taxas de desgaste de aproximadamente 7,5 μm e 12 μm , respectivamente, equivalente a um aumento de cerca de 60%. O método de lubrificação convencional registrou o menor desgaste, graças à melhor capacidade de resfriamento da peça. Além disso, houve apenas uma variação simples no desgaste do rebolo à medida que a velocidade de avanço aumentava.

4.4. Razão G

Na Figura 17 é possível observar os dados obtidos em relação a razão G. Nesse sentido, vale ressaltar que os valores do Razão G e a eficiência do método aplicado são diretamente proporcionais. Assim, percebe-se que os dados referentes à técnica de lubrificação convencional possuem considerável superioridade sobre a técnica MQL, principalmente devido à menor temperatura de operação e ao melhor resfriamento obtido pelo método tradicional (RODRIGUEZ et al., 2019b). Para a técnica MQL, os valores obtidos para todas as velocidades de avanço foram inferiores à técnica de lubrificação convencional. No entanto, seu resultado já era esperado devido à maior temperatura atingida na zona de corte, fator que piora consideravelmente a adesão dos grãos pelo ligante do rebolo, o qual é muito sensível a altas temperaturas, causando a perda precoce de material abrasivo e, conseqüentemente, desgastando excessivamente o rebolo (DA SILVA et al., 2020).

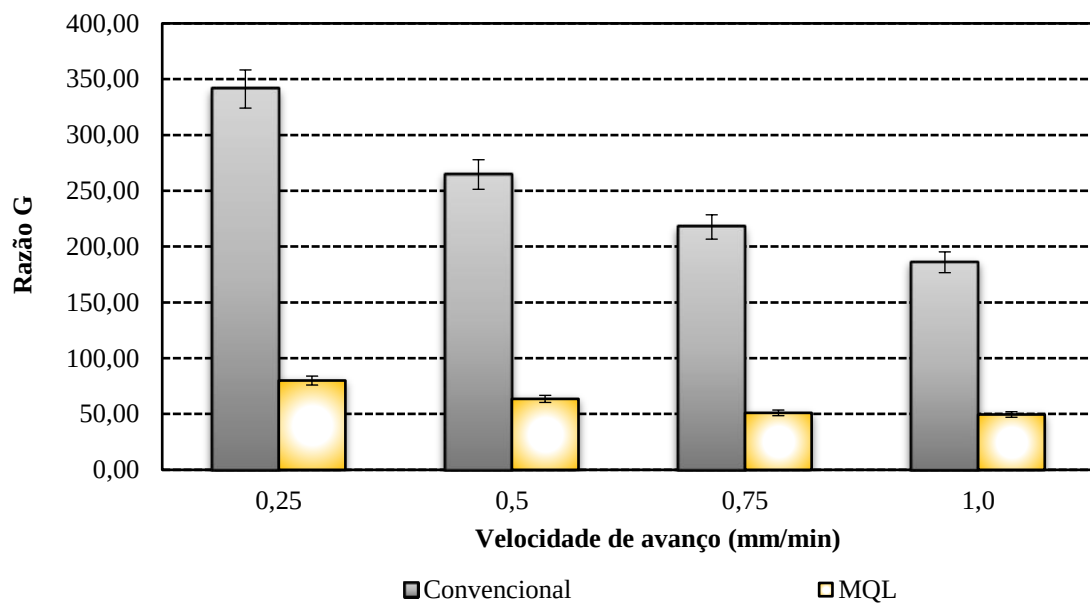


Figura 17 Razão G para cada condição de usinagem

Além da estabilidade dos resultados obtidos, a consistência observada nos valores do Razão G é notável quando se utiliza a técnica MQL, que mantém os valores quase constantes à medida que a velocidade de avanço aumenta. Quanto ao método convencional, conclui-se que a velocidade de avanço é um fator que influencia consideravelmente a relação entre o material removido e o desgaste do rebolo. Quanto maior a velocidade de avanço, pior a eficiência da usinagem. Os maiores e menores valores de razão G obtidos para o convencional foram de aproximadamente 341 e 185, sendo o primeiro para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min e o segundo para 1 mm/min, representando uma queda de aproximadamente 45% em relação ao valor da razão G.

4.5. Potência de retificação e análise de custos

Os valores médios da potência de retificação consumida são mostrados na Figura 18. Para todas as condições, a potência de corte aumenta quando aumenta-se a velocidade de avanço para a mesma técnica de lubrificação. Por exemplo, comparando a velocidade de avanço de 0,25 a 1,00 mm/min para a técnica de lubrificação convencional, obtém-se um aumento de potência de 77,3%, enquanto no MQL, a variação de potência nas mesmas condições é de 41,8%. A tendência geral de aumento da potência é causada pelo aumento da espessura do cavaco, que culmina no aumento da força de corte. Além disso, a potência de retificação está associada à capacidade de resfriamento, lubrificação e limpeza do rebolo.

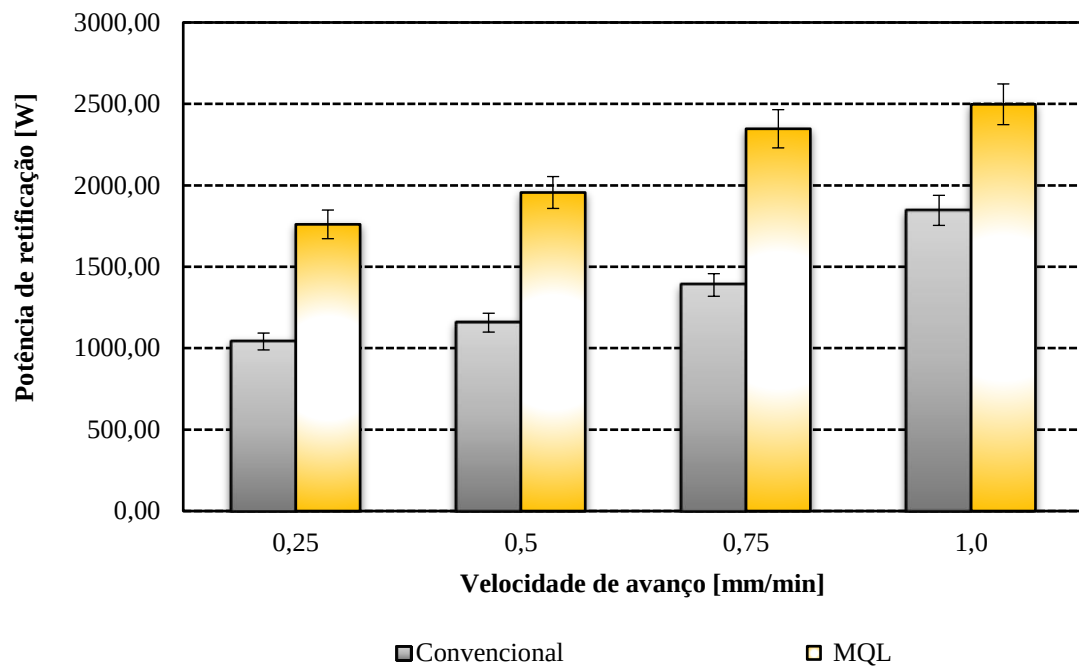


Figura 18 Potência de retificação para cada condição de usinagem

Assim, a técnica de lubrificação convencional apresentou menores valores de potência média devido à excelente capacidade de limpeza e refrigeração da interface de contato rebolo-peça. Observando todas as condições, a redução da potência de retificação para a condição de lubrificação convencional atingiu valores médios de 35 a 69%. No entanto, vale ressaltar que o volume reduzido de fluido de corte aplicado com MQL pode resultar na redução de custos de retificação do componente final.

O custo por peça é um parâmetro interessante de se analisar, pois seu cálculo abrange outros parâmetros. A Equação 14 e Tabela 1 apresentam os diferentes parâmetros que são considerados. A questão é saber como eles impactam os custos de fabricação.

O cálculo do custo considera o tempo de operação. Se o processo de retificação for mais rápido, o tempo por peça é menor, o que significa maior produtividade. Neste estudo, o avanço é o parâmetro que impacta no tempo, pois quanto maior o avanço, mais rápido será o processo de usinagem. No entanto, a qualidade, o desgaste do rebolo e o consumo de energia são afetados quando a velocidade de avanço aumenta. A Figura 19 apresenta o custo por peça de todas as condições testadas.

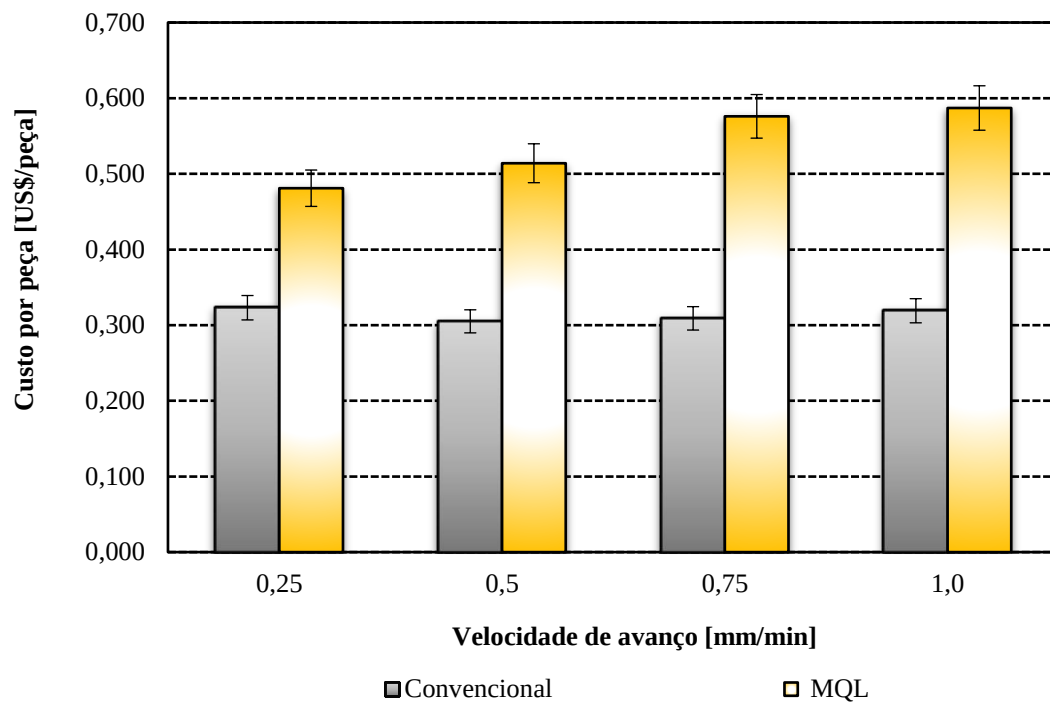


Figura 19 Custo do processo para cada condição de usinagem

Como observado na Figura 19 o custo de retificação utilizando o MQL se mostrou maior do que o custo com o convencional em todas as velocidades de avanço. O desgaste do rebolo é considerado no cálculo do custo pela razão G , conforme observado na Equação 14. O consumo do rebolo durante o processo é medido e o volume de desgaste é convertido em dinheiro. O rebolo diamantado tem um custo elevado e, durante os experimentos, notou-se que o desgaste do rebolo varia para cada condição. Assim, foi um parâmetro importante a ser considerado no custo calculado.

Outra variável no custo por peça é a potência de retificação, que considera os esforços de corte e o período no qual esse corte é aplicado. À medida que a velocidade de avanço aumenta, os esforços de corte são maiores e o processo ocorre mais rapidamente. No presente experimento, à medida que a velocidade de avanço aumentou, o custo da fração da potência de retificação diminuiu, reduzindo o tempo.

Como observado, o cálculo do custo engloba a maioria das variáveis do processo. A Figura 19 apresenta que a técnica MQL custa mais por peça do que a lubrificação convencional. Este fato está associado a menor razão G do MQL e maior consumo de energia do que a lubrificação convencional. Mesmo com a redução do custo do fluido (compra e descarte), os demais parâmetros aumentaram o custo da técnica MQL.

O aumento da velocidade de avanço na técnica MQL aumentou o custo por peça. Por outro lado, mesmo com o aumento da velocidade de avanço, o custo por peça ficou estável para a lubrificação-refrigeração convencional. Como o processo é mais rápido, há menos custos de energia, fluido de corte e mão de obra. No entanto, velocidades de avanço mais altas afetam os esforços de corte e o desgaste do rebolo. No caso da condição MQL, as desvantagens de aumentar a velocidade de avanço foram maiores que os benefícios.

5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, dados todos os testes realizados e os resultados encontrados, considerando ambas as técnicas de lubrificação-refrigeração (convencional e MQL) para velocidades de avanço de 0,25 mm/min, 0,50 mm/min, 0,75 mm/min e 1,00 mm/min, é possível obter as seguintes conclusões:

- A técnica de lubrificação-refrigeração convencional mostrou-se superior ao MQL em todos os testes, tendo como justificativa primária as condições de retificação menos severas.
- O aumento da velocidade de avanço causou uma deterioração em quase todos os resultados para ambas as técnicas de lubrificação-refrigeração. A única exceção vem do custo de usinagem, no qual a técnica convencional não apresentou alteração significativa.
- A rugosidade e o desvio de circularidade resultaram em desvios menores entre as técnicas de lubrificação-refrigeração.
- Com base na análise do desgaste diametral do rebolo, nota-se que a vida do rebolo é muito menor quando aplicada a técnica MQL em comparação com a técnica de lubrificação-refrigeração convencional.
- Para a velocidade de avanço de 1,00 mm/min, foi observada a maior diferença entre o desgaste diametral do rebolo entre as técnicas de lubrificação-refrigeração testadas.
- Nas avaliações da razão G, considerando o menor desempenho da técnica MQL, confirma-se que o convencional tem melhor eficiência na retificação de cerâmicas avançadas.
- A técnica de lubrificação-refrigeração convencional mostrou-se praticamente estável em termos de custo por peça fabricada, revelando-se relevante para ambientes

industriais uma vez que um aumento na velocidade de produção não gera um aumento imediato no custo da peça cerâmica.

- A técnica MQL mostrou uma tendência de aumento de custo quando a velocidade de avanço foi aumentada.
- No geral, o estudo indica que a utilização de MQL na retificação de cerâmicas avançadas com rebolo de diamante não é viável nas condições estudadas. O custo do processo não foi reduzido ao utilizar essa técnica em função do elevado desgaste do rebolo de diamante.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- Fazer uma espectroscopia Raman do rebolo de diamante antes e após a usinagem de alumina para verificar se houve grafitização do diamante durante a usinagem.
- Avaliar através de microscopia eletrônica de varredura a superfície de corte do rebolo, tendo como finalidade o entendimento dos mecanismos físicos de desgaste dos grãos abrasivos, bem como entender a influência do empastamento do rebolo na retificação de cerâmicas avançadas.
- Acrescentar a técnica de limpeza do rebolo aliada ao MQL, visando um melhor desempenho do MQL em relação ao obtido no presente estudo.
- Realizar estudos de avaliação superficial da peça utilizando microscopia eletrônica de varredura, de modo a propiciar um melhor entendimento dos mecanismos de desgaste que ocorrem na superfície da cerâmica.
- Utilizar no MQL fluidos de corte com inibidores voláteis de corrosão para verificar se esse tipo de molécula anticorrosiva pode beneficiar o processo de retificação de cerâmicas avançadas.
- Investigar o comportamento do processo ao utilizar diferentes diluições de fluidos de corte no MQL para averiguar se o aumento de água no processo auxilia na melhora da integridade superficial da peça retificada.
- Utilização de maiores velocidades de avanço a fim de verificar se o comportamento do MQL e as respectivas consequências da sua utilização nas demais variáveis estudadas.

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.
- 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.

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.

JAKEDRZEJEWSKI, 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.

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

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

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, 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. **Tribology of Abrasive Machining Processes**. [s.l.] Elsevier, 2013.

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

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.

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. 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, 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.

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.

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. 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. 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.