

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**PROGRAMA DE PÓS-DOUTORADO DA UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU - FEB**

GILSON EDUARDO TARRENTO

RELATÓRIO FINAL

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE DIFERENTES DILUIÇÕES DE FLUIDOS DE
CORTE LUBRIRREFRIGERANTES NA RETIFICAÇÃO DE CERÂMICAS
AVANÇADAS**

Supervisor: Prof. Dr. José Claudio Lopes

**BAURU
2025**

GILSON EDUARDO TARRENTO

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE DIFERENTES DILUIÇÕES DE FLUIDOS DE
CORTE LUBRIRREFRIGERANTES NA RETIFICAÇÃO DE CERÂMICAS
AVANÇADAS**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho (UNESP), Faculdade de
Engenharia de Bauru - FEB, Departamento
de Engenharia Mecânica.

Supervisor: Prof. Dr. José Claudio Lopes

RESUMO

Os fluidos de corte são fundamentais na usinagem por abrasão, resfriando e lubrificando a interface de corte, uma vez que, por conta da alta intensidade do calor gerado, existe grande incidência de danos térmicos causados à peça de trabalho. Além disso, o fluido de corte também auxilia na obtenção de um melhor acabamento superficial e na redução das imprecisões geométricas. Entretanto, seu uso é prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana. O método convencional de lubrificação é com fluido em abundância, porém, uma alternativa ecológica é a utilização da técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), a qual aplica uma quantidade reduzida de óleo pulverizado na superfície de corte com o uso de um jato de ar comprimido, obtendo resultados comparáveis com os obtidos pelo método convencional. Apesar disso, essa técnica possui menor capacidade de resfriamento e o empastamento do rebolo. Vários estudos mostraram que a utilização de sistemas auxiliares tem grande potencial de amenizar tais problemas, como a aplicação do MQL Diluído, substituindo o óleo puro por uma emulsão água e óleo, e do sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo (WCJ), retirando partículas presentes ali e minimizando o fenômeno do empastamento, sendo de grande relevância a aplicação conjunta de tais técnicas na usinagem das cerâmicas avançadas, em especial, da alumina (Al_2O_3). Visando a comparação das diferentes condições analisadas, foram avaliadas as variáveis de saída de rugosidade média aritmética (R_a), desvios de circularidade, desgaste diametral do rebolo, razão G, força tangencial de corte e potência de usinagem, além de uma análise de custo e poluição.

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

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão comumente utilizado nos dias atuais, aplicado direta ou indiretamente em todas as áreas da indústria, por conta de sua capacidade de produzir peças com ótimo acabamento superficial e precisão geométrica (MALKIN; GUO, 2008). A ferramenta utilizada nesse processo é o rebolo, composto por inúmeros grãos abrasivos, realizando a remoção de material através de quatro estágios: inicialmente, o grão abrasivo entra em contato com a superfície da peça; secundamente, o grão causa deformação elástica na peça; no terceiro estágio, ocorrem deformações plásticas para, ao final do processo, ocorrer a fratura do material e a formação do cavaco (LOPES et al., 2019; SATO et al., 2019). A retificação é a principal opção na manufatura das cerâmicas avançadas, material de grande interesse industrial por conta de características excepcionais comparadas a dos metais, como boa estabilidade térmica e química em elevadas temperaturas, alta resistência e dureza, baixa deformabilidade e baixo peso específico (SHASH et al., 2023). Apesar de serem benéficas a suas aplicações, essas características acabam gerando desafios significantes na usinagem de componentes cerâmicos, correspondendo a mais de 80% dos custos totais de sua manufatura (LOPES et al., 2018; MALKIN; HWANG, 1996). A elevada dureza encontrada nas cerâmicas avançadas impactam diretamente o mecanismo de formação dos cavacos, tornando-o diferente do processo que ocorre nos metais. Por conta da fragilidade do material, as deformações plásticas, as quais são induzidas pelo contato dos grãos abrasivos entram em contato com a superfície, são minimizadas, como consequência, fraturas longitudinais são formadas e se propagam abaixo da camada de deformação plástica (JAVARONI et al., 2019; YIN et al., 2005).

A usinagem das cerâmicas avançadas, entre elas a Alumina (Al_2O_3), requer a utilização de rebolos especiais, entre eles os de diamante sintético. Os grãos abrasivos são unidos através do ligante, o qual também tem a função de dissipar calor (MARINESCU et al., 2016). Além deles, os rebolos também contam com os poros, espaço vazio entre os grãos abrasivos, responsável por armazenar o material removido, prevenindo que os cavacos formados causem danos a peça (DE MORAES et al., 2021).

Durante a retificação, as diversas arestas de corte entram em contato com a peça, deformando e cisalhando sua superfície. Como resultado, grande parte da energia envolvida no processo é dissipada na forma de calor, causando um aumento significativo da temperatura na zona de corte (DA SILVA et al., 2021; DE MORAES et al., 2019). Esse calor gerado, se não minimizado, pode causar graves problemas na retificação, como o desgaste acelerado do rebolo

por conta do enfraquecimento do ligante, modificações microestruturais na peça e o empastamento dos poros do rebolo, o qual dificulta a remoção dos cavacos e, conseqüentemente, leva a danos superficiais na peça (SADEGHI et al., 2009). Assim, para que se tenha uma eficiência adequada de processo, é essencial o controle da temperatura do sistema.

Para minimizar os problemas criados pelo excesso de calor, os fluidos de corte são utilizados para lubrificar a interface de corte, reduzindo o calor gerado ao diminuir a energia dissipada por atrito (ROWE, 2014). Além da lubrificação, tais fluidos também auxiliam na dissipação do calor gerado, controlando as temperaturas do processo (BIANCHI et al., 2018a; MARINESCU et al., 2012). Entretanto, o alto volume de fluido consumido pelo método convencional de lubrificação por refrigeração aumenta o custo da usinagem, e os componentes presentes em sua composição, como formaldeídos, alcalonaminas e materiais orgânicos voláteis, são tóxicos aos operadores e ao meio ambiente (ALBERDI et al., 2011). Além dos riscos que envolve o uso deliberado de fluido de corte, 85 % da energia utilizada na usinagem é empregada no armazenamento e transporte de fluido (DUFLOU et al., 2012; SUN; LI, 2014). Assim, boa parte da energia utilizada na indústria foi empregada no método convencional de lubrificação por refrigeração, não resultando diretamente em usinagem de material, o que gera um desperdício energético significativo (FANG et al., 2011).

Para reduzir os impactos sociais e ambientais, é necessário realizar uma série de procedimentos antes do descarte do fluido já utilizado, aumentando ainda mais as despesas do processo (DEMIRBAS; KOBAYASHI, 2017). Conseqüentemente, novos métodos de lubrificação por refrigeração têm sido otimizados para a usinagem por abrasão, acompanhando a ciência geral que está direcionada aos princípios ambientais e de saúde humana (DEBNATH; REDDY; YI, 2014). Entre eles, um dos mais promissores é a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante, no qual uma pequena quantidade de fluido é atomizada e pulverizada diretamente na zona de corte utilizando um jato de ar comprimido de alta pressão (DA SILVA et al., 2020; JAVARONI et al., 2020a; MORETTI et al., 2020; RABBANI et al., 2017). Por conta do ar pressurizado, a barreira de ar gerado pela alta rotação do rebolo é quebrada, aumentando a eficiência de entrada do fluido. Isso faz com que o método proporcione uma lubrificação mais eficiente, reduzindo as perdas de energia por atrito e geração de calor (LOPES et al., 2022).

Além disso, comparando a vazão de fluido de corte do método convencional com o método MQL, o qual utiliza de 30 a 100ml/h de fluido, observa-se uma diminuição de cerca de 90% do volume, reduzindo drasticamente a energia requerida para armazenamento, bombeamento e sistemas circulatórios. Por conta do baixo volume de fluido utilizado, é possível também minimizar as emissões diretas e indiretas de dióxido de carbono (CO₂), reduzindo o

impacto ambiental da usinagem por abrasão no aquecimento global e contribuindo para o desenvolvimento sustentável (SATO et al., 2022).

Por outro lado, a técnica de MQL apresenta dificuldades no controle da temperatura durante a usinagem. Essa desvantagem está relacionada a baixa capacidade do ar comprimido em dissipar calor quando comparado ao grande volume de fluido empregado no método convencional e a ineficiente remoção de cavacos, resultando no empastamento do rebolo (JAVARONI et al., 2020b). Assim, tem-se um maior desgaste do rebolo e uma maior incidência de danos térmicos na peça (DE MARTINI FERNANDES et al., 2019; HADAD; SADEGHI, 2012).

A implementação prática do MQL na usinagem por abrasão necessita de meios que minimizem o empastamento do rebolo, a refrigeração inadequada do sistema e a remoção de cavaco. A utilização de sistemas auxiliares tem o potencial de mitigar os efeitos adversos do MQL quando utilizados em conjunto com misturas de fluido de corte com diferentes proporções de água (DOMINGUES et al., 2023; SATO et al., 2020). Em contato com a interface de corte, as gotículas de água são evaporadas e facilitam a dissipação de calor, reduzindo a temperatura de usinagem e a zona termicamente afetada (YOSHIMURA et al., 2005). Bianchi et al. (2018b) estudaram a implementação de água e óleo na retificação do aço AISI 4340. Foi observado uma melhora na atomização do fluido e uma redução na rugosidade superficial e no desvio de circularidade da peça, além de um menor desgaste diametral do rebolo. Todavia, é importante destacar que essa condição afeta negativamente a ductilidade do material, podendo intensificar o fenômeno do empastamento por conta da formação de cavacos, e a utilização de maiores proporções de água reduz a capacidade de lubrificação do sistema MQL, aumentando o atrito e, por consequência, entregando uma peça com acabamento de pior qualidade.

Além das aplicações do MQL diluído, é importante destacar a aplicação do sistema de limpeza do rebolo por ar comprimido (WCJ), o qual envolve a utilização de um jato de ar comprimido direcionado diretamente na superfície do rebolo para remover cavacos ali acumulados (LOPES et al., 2021). Oliveira et al. (2012) conduziram um estudo investigando a influência da aplicação de diferentes ângulos de incidência do jato de limpeza na usinagem do aço AISI 4340 utilizando MQL em comparação ao método convencional. O estudo concluiu que o jato direcionado a um ângulo de 30° com a vertical atinge os melhores resultados, e o fenômeno do empastamento foi minimizado com sucesso. Os estudos conduzidos por (GARCIA et al., 2020) se concentraram na aplicação de MQL diluído com limpeza WCJ na retificação do aço SAE 52100. Foi concluído que a aplicação desses sistemas em conjunto resultou numa redução de 70% na rugosidade superficial e diminuiu 80% do desgaste diametral

do rebolo quando comparado ao MQL convencional. Essas descobertas sustentam os excelentes resultados que podem ser atingidos com a combinação de MQL Diluído e limpeza WCJ na retificação da Alumina (Al_2O_3).

Nesse contexto, considerando os desafios da construção de uma indústria ecologicamente sustentável e a larga margem de aplicação das cerâmicas avançadas nos setores aeroespaciais, sendo utilizada na fabricação de sensores especiais, motores, e turbinas, aliado a escassez de literatura presente sobre o tema, a presente pesquisa visa investigar o comportamento das cerâmicas avançadas na usinagem por abrasão sob diferentes sistemas de lubrificação, comparando o método tradicional com o MQL puro e MQL Diluído, com e sem a utilização de sistema auxiliar de limpeza WCJ.

2. JUSTIFICATIVA

Atualmente, a produção global vem tentando buscar alternativas que priorizem a preservação do meio ambiente e o bem-estar dos trabalhadores. A comunidade internacional está ativamente engajada em esforços para regular e defender a adoção de práticas industriais alternativas (PUŠAVEC; STOIC; KOPAČ, 2010). Nos processos de manufatura, operações de usinagem são realizadas por ferramentas que requerem uma quantidade significativa de energia. O conhecimento apurado e o correto aprimoramento da eficiência dos métodos de usinagem são fundamentais para o uso correto das fontes energéticas e a redução substancial dos desperdícios (SAYYADI; AWASTHI, 2018).

No contexto da usinagem por abrasão, aumentar a eficiência ecológica consiste na obtenção de peças com a rugosidade superficial e precisões geométricas requeridas com o mínimo impacto ambiental e menores custos (WINTER et al., 2014). A retificação das cerâmicas avançadas em especial tem enorme relevância para o tema, tendo em vista sua larga margem de aplicação por conta de suas propriedades. Entretanto, essas mesmas propriedades exigem condições especiais de usinagem, como, por exemplo, o uso de rebolos de diamante. Por conta de suas propriedades térmicas, o processo de remoção de cavaco dos grãos de diamante faz com que o calor concentrado na zona de corte afete a durabilidade desse tipo de rebolo, tornando o processo economicamente oneroso por conta do alto custo de tais ferramentas.

Para minimizar a ocorrência desse desgaste, é essencial a utilização de sistemas de lubrificação e refrigeração. Entre eles, destaca-se o método com fluido em abundância, sendo o mais utilizado na indústria. Esse método utiliza vazões de fluido de corte entre 2 a 31 litros

por minuto. Porém, esses fluidos lubrificantes não são biodegradáveis e sua composição é baseada em derivados do petróleo e aditivos químicos, fazendo com que seu uso seja extremamente prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana. Tendo isso em vista, surge a necessidade da aplicação de métodos alternativos para minimizar os danos do uso exacerbado de fluido de corte, seguindo o direcionamento da produção ecologicamente correta. Assim, surge a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante para reduzir substancialmente o volume de fluido utilizado ao utilizá-lo de forma atomizada e pressurizado. Isso faz com que esse método atinja uma lubrificação mais eficiente e, mesmo tendo problemas de refrigeração, ganhe cada vez mais a atenção da indústria por conta de sua sustentabilidade ambiental e econômica.

Nesse sentido, esse projeto de pesquisa visa dar continuidade aos estudos do candidato dos últimos dois anos. Ao longo do último ano, o candidato foi bolsista CNPQ, desenvolvendo projetos sobre a retificação de cerâmica avançada com a aplicação de MQL Diluído, onde foi observado o enorme potencial que a aplicação de sistemas auxiliares tem na busca pela viabilização do MQL.

O tema abordado ganhou uma ótima aceitação da sociedade acadêmica, tendo em vista a publicação do artigo *Eco-friendly thinking toward mitigating the greenhouse effect applied to the alumina grinding process* (2022) em um dos principais periódicos da área de processos de fabricação da engenharia mecânica – *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (fator de impacto 3,4).

Desse modo, nota-se que estudos anteriores fundamentam o tema, uma vez que a retificação com rebolo de diamante das cerâmicas avançadas, o MQL, sua diluição e a limpeza da interface de corte do rebolo estão no campo de interesse da engenharia e da ciência de fabricação por conta de seus avanços tecnológicos. Entretanto, o assunto carece de bibliografia, o que pode ser constatado verificando as bases de publicações internacionais. Isso aponta para um futuro aumento do interesse de estudos sobre o tema, ainda mais com o uso das cerâmicas avançadas sendo intensificado pela indústria.

Assim, certifica-se que o tema em questão, abordado pelo candidato em pesquisas anteriores, trouxe enorme benefício para a retificação das cerâmicas avançadas, e o aprimoramento do processo, com a adição do sistema de limpeza WCJ, proporciona ao MQL resultados muito próximos dos obtidos com o método convencional, ampliando o conhecimento acadêmico e agregando informações relevantes para uma indústria que está em pleno desenvolvimento e expansão.

Portanto, a presente pesquisa vem com o objetivo de viabilizar usinagem por abrasão das cerâmicas avançadas de maneira sustentável, uma vez que os resultados obtidos em artigos

anteriores sobre o tema ainda não atingiram o mesmo patamar de resultados entregues pelo método convencional. Assim, o estudo foi direcionado numa análise comparativa entre o sistema MQL, com e sem diluição, com e sem sistema auxiliar de limpeza, e o método com fluido em abundância visando a obtenção de um processo com baixo impacto ambiental, mas que entregue a qualidade de peça desejada, sem alto desgaste de ferramenta e com baixo custo.

Pela exclusividade do tema, inovador e ainda não explorado, destaca-se a importância desse estudo e o seu grande potencial para publicações nos principais periódicos internacionais.

2.1 Objetivo

Analisar o desempenho da técnica de MQL Diluído na retificação de cerâmicas avançadas com rebolo de diamante, com e sem a limpeza da superfície de corte do rebolo utilizando jato de ar comprimido (WCJ). Assim foram abordados diferentes métodos de lubrificação, incluindo o Convencional, MQL Puro, MQL diluído, MQL Puro + WCJ, e MQL diluído + WCJ. Notavelmente, cada uma das três diluições de óleo-água (1:1, 1:3 e 1:5) também foi considerada como método distinto de lubrificação. Resultando assim, em um total de nove métodos comparados.

Nos testes foram avaliados: a rugosidade média aritmética, desvios de circularidade, desgaste diametral do rebolo, razão G, potência de usinagem e uma análise de custo e poluição. Os resultados obtidos foram comparados ao método convencional, sendo este a referência a ser atingida pelas diferentes configurações do MQL.

3. DESCRIÇÃO DO PLANO DE TRABALHO

Neste segmento, as etapas do projeto foram descritas na forma com que foram seguidas ao longo do projeto. Isso garantirá a execução metódica do projeto, evitando a omissão de qualquer etapa.

3.1 Revisão bibliográfica

Ao longo de todo o período da bolsa, foi conduzida uma abrangente análise da literatura acadêmica com o objetivo de investigar o que está atualmente sendo discutido na comunidade científica em relação a temática desta pesquisa. A revisão da literatura assume uma relevância crucial, uma vez que estabelece a base para a compreensão e aprofundamento do tópico, ao mesmo tempo em que assegura que a pesquisa se desenvolva de maneira congruente com o contexto atual de avanços científicos.

3.2 Banco de ensaios

Todos os equipamentos requeridos para a condução dos experimentos da presente pesquisa estão disponíveis no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), localizado nas dependências da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB/UNESP).

3.3 Realização de ensaios definitivos

Antes de conduzir os ensaios finais, foram realizados alguns testes preliminares para avaliar o desempenho do sistema WCJ quando aplicado no sistema de MQL com diluição em água. Após a conclusão dos testes iniciais e revisão bibliográfica, os ensaios definitivos foram iniciados, assegurando-se o rigor científico que garantirá a confiabilidade dos resultados obtidos.

3.4 Confeção dos relatórios científicos

Os primeiros seis meses de bolsa foram dedicados a revisão bibliográfica relacionadas aos temas abordados no projeto. Assim, primeiro relatório foi composto por uma revisão bibliográfica que engloba os tópicos relevantes à pesquisa em questão, além dos procedimentos adotados durante os ensaios preliminares.

O relatório final incluirá os dados obtidos nos ensaios definitivos da pesquisa, juntamente com as análises dos resultados correspondentes.

3.5 Metodologia de ensaios

Os ensaios definitivos seguirão o sistema apresentado na Tabela 1. Foram aplicadas nove distintas condições de lubrificação com parâmetros de usinagem constantes e apresentados pela tabela 3. Para reforçar a validade estatística, cada método de lubrificação foi experimentado 3 vezes individualmente, permitindo assim uma análise de variância (ANOVA) para que se considere as variações intrínsecas a cada método.

Tabela 1. Sistema de Ensaios
Retificação de cerâmica avançada com rebolo de diamante

Métodos de Lubrificação								
Convencional	MQL Puro		MQL 1:1		MQL 1:3		MQL 1:5	
Sem WCJ	S/ WCJ	WCJ	S/ WCJ	WCJ	S/ WCJ	WCJ	S/ WCJ	WCJ
E1	E4	E7	E10	E13	E16	E19	E22	E25
E2	E5	E8	E11	E14	E17	E20	E23	E26
E3	E6	E9	E12	E15	E18	E21	E24	E27

4. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES PROPOSTAS

Na Tabela 2, é apresentado o planejamento das atividades propostas para os 12 meses de duração da bolsa, incluindo a alocação de tempo para cada uma das atividades.

Tabela 2. Cronograma de atividades

Etapa/Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I												
II												
III												
IV												
V												
VI												
VII												

Onde:

- I Pesquisa bibliográfica;
- II Realização dos ensaios preliminares;
- III Análise dos ensaios preliminares;
- IV Realização dos ensaios definitivos;
- V Análise dos resultados obtidos;
- VI Confecção de relatórios;
- VII Submissão de artigos

Todas as atividades e seus respectivos prazos foram escolhidos com rigor, visando garantir a continuidade lógica da pesquisa ao longo do período, com a prevenção de atrasos em qualquer data estabelecida.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este segmento apresentará os instrumentos e procedimentos a serem empregados durante a fase experimental do projeto. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) do Departamento de Engenharia Mecânica, localizado na Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho (FEB/UNESP), campus Bauru, São Paulo. A abordagem metodológica adotada neste estudo envolve a realização de experimentos e a análise de parâmetros e variáveis de resultado. Um total de 27 ensaios foi conduzido para assegurar uma sólida base estatística aos resultados obtidos.

Os experimentos foram conduzidos em uma retificadora cilíndrica modelo RUAP515H, fabricada pela Sulmecânica. Esta retificadora cilíndrica está equipada com um sistema CNC da marca Fagor. Para este estudo, as peças a serem usinadas foram produzidas no formato de anéis, utilizando Alumina comercial composta por 96% de óxido de alumínio (Al_2O_3), e 4 % de óxidos fundidos como SiO_2 , CaO e MgO , com densidade aparente de $3,7 \text{ g/cm}^3$ e dimensões de 54 mm de diâmetro externo, 30 mm de diâmetro interno e 4,5 mm de espessura. A retificação foi realizada utilizando um rebolo diamantado com ligante resinoide, com dimensões de 350 mm de diâmetro externo, 15 mm de largura e 5 mm de cada abrasiva, e um diâmetro interno de 127 mm. O ligante possui uma dureza classificada como N, uma concentração de 50 e um tamanho de grão de 126 mm (D107N115C50). A ferramenta utilizada pertence à empresa Nikkon Ctting Tools Ltda. – Grupo Saint Gobain. A Figura 1 apresenta as configurações experimentais para os processos de MQL e Convencional.

A Figura 2 apresenta as dimensões das peças a serem utilizadas nos ensaios:

Por último, a Tabela 3 reúne uma variedade de parâmetros de usinagem que foram empregados ao longo dos experimentos. É importante destacar que determinados parâmetros podem passar por ajustes durante a execução dos experimentos preliminares.

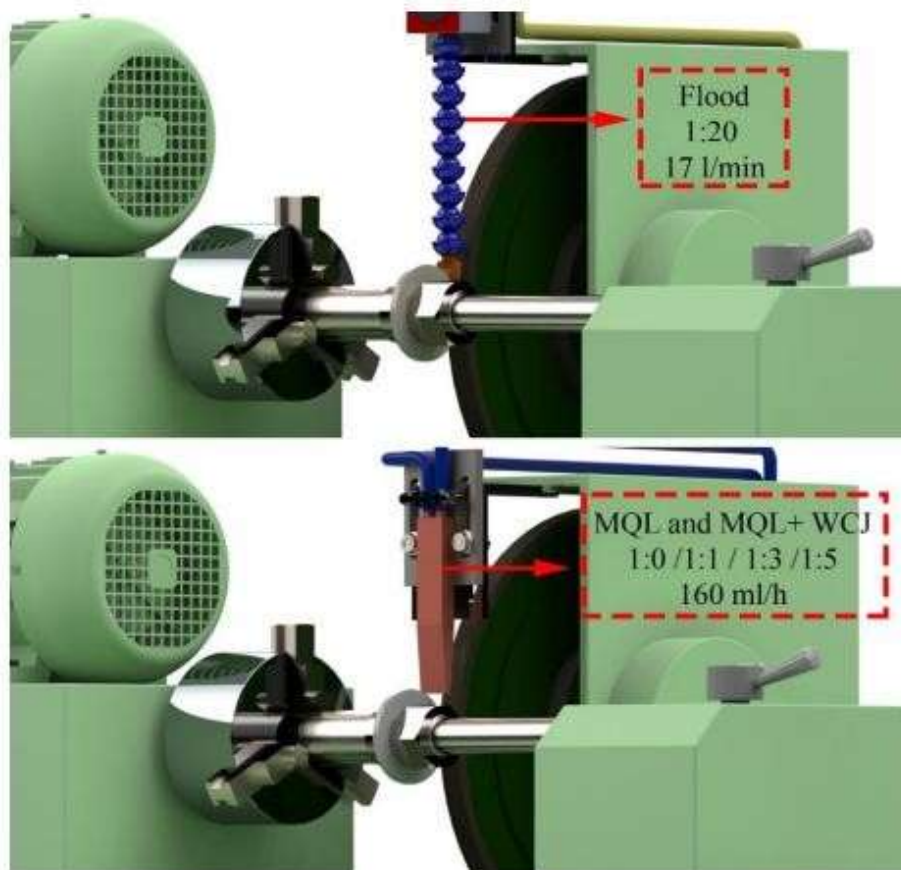


Figura 1: Montagem experimental com (a) lubrificação convencional e (b) MQL

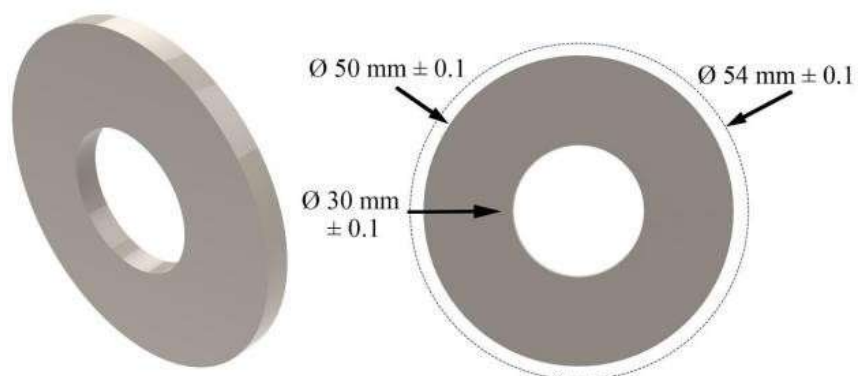


Figura 2: Geometria definida da peça de Alumina aplicada para todos os testes

Tabela 3. Parâmetros de usinagem

Retificação	Cilíndrica externa de mergulho
	Diamante
Rebolo	D107N115C50 (Ø 350 mm×15 mm×5 mm)
Diâmetro da peça	54mm
Material da peça	Alumina comercial
Velocidade de corte (V_s – m/s)	$V_s = 30$ m/s
Velocidade de avanço (V_f – mm/min)	0,5 mm/min
Rotação da peça (V_w)	$V_w = 204$ rpm
Profundidade de corte (a)	$a = 0.1$ mm
Spark-out (ts)	$t_s = 5$ s
Largura de retificação (e)	$e = 4$ mm
Profundidade de dressagem (ad)	$ad = 0.040$ mm (10 ciclos - 0.004 mm por ciclo)
Condições de lubrificação	Convencional
	MQL Puro
	MQL Puro + Limpeza do rebolo
	MQL Diluído
	MQL Diluição + Limpeza do rebolo
Fluido de corte	Convencional - Óleo semissintético Rocol 4847
	Ultracut 370
	MQL - Óleo de base vegetal, biodegradável, associado a aditivos antioxidantes, modelo Biocut 9000, produzido por ITW Chemical Products
Vazão de fluido de corte	17 L/min - convencional
	160 ml/h - MQL
Equipamento de MQL	AccuLube 79053D, fornecido pela ITW Chemical Products Ltda.
Equipamento de limpeza	Compressor MSV40, da Schulz Compressores, com vazão teórica: 1132 l/min

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial é fundamental para o processo de retificação, pois as peças selecionadas para esse processo geralmente possuem tolerâncias de forma muito estreitas (SATO et al., 2019). A Figura 3 apresenta os resultados de rugosidade superficial para cada condição de lubri-refrigeração estudada.

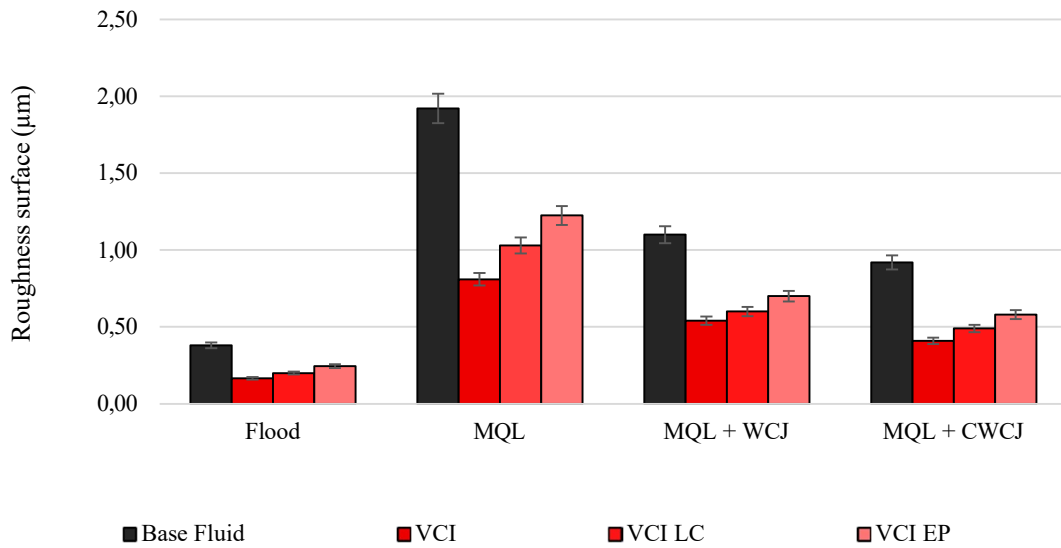


Figura 3: Geometria definida da peça de Alumina aplicada para todos os testes

Inicialmente, observa-se uma tendência de aumento da rugosidade superficial quando se compara o método convencional por inundação com o método MQL. No caso do fluido base, a comparação dos resultados obtidos com inundação e MQL revela que o MQL resultou em um aumento de 405% nos valores de rugosidade. Nota-se também que as técnicas WCJ e CWCJ contribuíram significativamente para a melhoria no MQL. Para o fluido base, o MQL+WCJ reduziu os valores de rugosidade superficial em 42,7% em comparação à técnica MQL. De forma semelhante, o MQL+CWCJ gerou uma redução de 52,1%. Esse comportamento é decorrente do fenômeno de empastamento que ocorre durante a retificação com MQL. O MQL não apresenta capacidade de refrigeração tão significativa quanto a inundação, devido ao menor volume de água empregado no processo. Consequentemente, o MQL gera aumento de temperatura na interface de corte, causando o preenchimento dos poros do rebolo com cavacos. Esse fenômeno é chamado de empastamento. Uma vez empastados, os poros fazem com que o rebolo perca capacidade de corte e entre em um ciclo de baixa eficiência e aumento de temperatura.

De acordo com (TALON et al., 2022) e (ÁVILA et al., 2023), esse comportamento foi observado em diferentes materiais e com diferentes tipos de rebolos. Em ambos os estudos, os autores observaram deterioração nos resultados de rugosidade superficial após o uso de MQL, tanto para aço quanto para cerâmicas. Nesses estudos, o empastamento foi observado em rebolos de diamante, óxido de alumínio, carbetto de silício verde e carbetto de silício preto. No entanto, parte desse empastamento pode ser removido utilizando jato de ar comprimido no rebolo. Por esse motivo, a técnica WCJ beneficiou o processo. Além disso, com o uso de ar

comprimido para resfriamento, houve melhoria na refrigeração do processo, evitando parte do empastamento. Isso resulta em melhores resultados para CWCJ em comparação ao WCJ.

Nos estudos de Lopes et al. (LOPES et al., 2023a) e Ribeiro et al. (RIBEIRO et al., 2023), os autores verificaram que a técnica WCJ permitiu uma melhoria significativa nos resultados de rugosidade superficial para a técnica MQL.

No entanto, quando analisado sob a perspectiva dos fluidos de corte, nota-se que a incorporação de VCI nos fluidos de corte melhorou os resultados de rugosidade superficial em comparação ao fluido base. Talon et al. (TALON et al., 2019b, 2020b) atribuíram esse comportamento à presença de um agente de lubricidade presente nos compostos VCI. Esse agente possui capacidade de polimerização com o aumento da pressão e da temperatura, favorecendo a lubrificação do processo.

Entretanto, VCI LC e VCI EP afetaram negativamente os resultados de rugosidade superficial quando comparados apenas ao fluido VCI. (TALON et al., 2020b) explica que o aditivo de pressão extrema tende a garantir a formação de um filme entre o grão abrasivo e a peça. Nesse sentido, o contato entre o grão e a peça é reduzido. Assim, o rebolo perde capacidade de corte e o processo gera uma maior rugosidade.

Portanto, a partir da discussão, nota-se que o empastamento gera aumento nos valores de rugosidade superficial devido ao acúmulo de material nos poros do rebolo (LOPES et al., 2023b; MORETTI et al., 2023).

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

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

6.2 Desvio de circularidade

A indústria atual trabalha incansavelmente em busca da padronização e intercambiabilidade de seus componentes, visando facilitar setups e reduzir o tempo de produção. Segundo (ZENG et al., 2023), o parâmetro de erro de circularidade está intimamente

ligado ao nível de intercambiabilidade de um componente. Segundo o autor, erros significativos de forma dificultam utilização do mesmo componente em diferentes produtos, devido à impossibilidade de montagem. Ainda de acordo com (ZENG et al., 2023), a retificação é o principal processo de usinagem para alcançar baixos erros de circularidade, em razão da rigidez estrutural inerente à máquina.

Por outro lado, (SHAW, 1996) afirma que a geração de calor e altas temperaturas na zona de corte, intrínsecas ao processo de retificação, causam expansões térmicas tanto na ferramenta quanto na peça, comprometendo a qualidade geométrica resultante. No entanto, o autor destaca que a lubrificação e refrigeração eficientes podem mitigar esses efeitos. Levando esses fatores em conta, a Figura 4 apresenta os resultados de erro de circularidade obtidos para cada condição de usinagem testada.

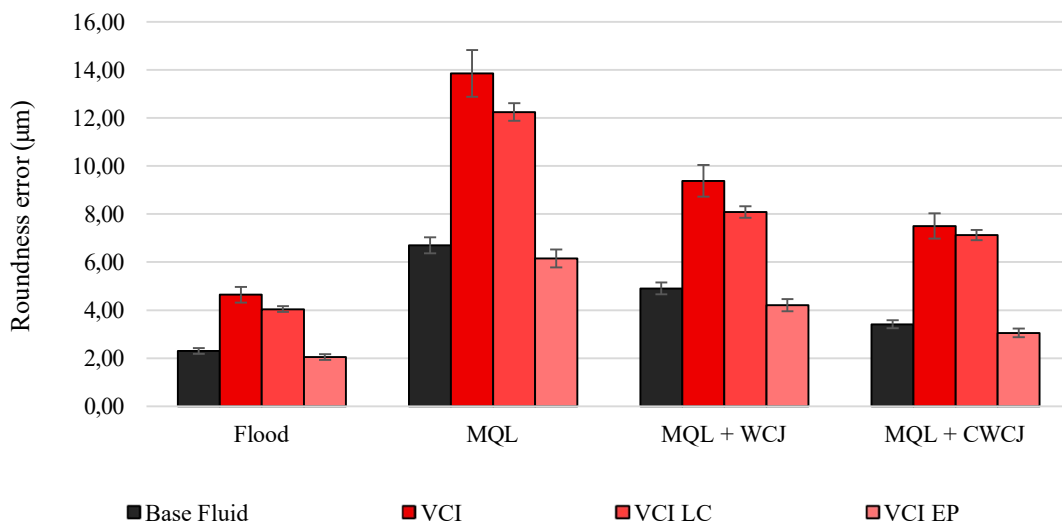


Figura 4: Geometria definida da peça de Alumina aplicada para todos os testes

De modo geral, observa-se que o uso do método de Lubrificação em Quantidade Mínima (MQL) apresenta efeito negativo nos erros de circularidade. (HADAD; SADEGHI, 2012) explicam, por meio de modelagem analítica, que embora a técnica MQL proporcione excelente lubrificação na zona de corte, ela não atinge níveis adequados de resfriamento. (LOPES et al., 2019c) compararam a aplicação de MQL com o método convencional de inundação, concluindo que a eficiência de refrigeração de métodos tradicionais deriva do volume de água utilizado e de sua facilidade de troca térmica. Essa análise está alinhada com (SHAW, 1996), pois a ineficiência no controle térmico na interface de corte permite o aumento da temperatura e expansões térmicas na peça e na ferramenta.

Além disso, de forma semelhante à rugosidade, os sistemas de limpeza WCJ e CWCJ reduzem 31% e 47% do erro de circularidade apresentado pelo MQL convencional. De acordo com (MARINESCU et al., 2016b), um rebolo com especificações adequadas deve conduzir porções de refrigerante à interface de contato através dos poros. O método MQL favorece o preenchimento acelerado dos poros, diminuindo a eficácia das trocas térmicas na região e aumentando temperatura e expansões térmicas. Assim, os sistemas WCJ e CWCJ atuam removendo os cavacos já aderidos à superfície do rebolo e aumentando o tempo durante o qual o fluido é transportado pelos poros, melhorando consequentemente a qualidade geométrica resultante do processo.

Isoladamente, o uso de VCI e VCI LC é prejudicial ao erro de circularidade. Diferentemente da rugosidade, a capacidade de polimerização, ao permitir aumento de pressão e temperatura, é diretamente proporcional ao erro de circularidade devido ao aumento das expansões térmicas.

Curiosamente, o uso de VCI EP com aditivo de pressão extrema contraria os dois casos anteriores. Segundo (PAPAY, 1998), aditivos de extrema pressão protegem equipamentos contra desgaste. O autor destaca que aditivos EP permitem a formação de um filme lubrificante que envolve os corpos em contato, reduzindo o atrito. Com base nesse princípio, reduções médias de 11% nos erros de circularidade com a adição de VCI EP podem ser atribuídas à capacidade de envolver os grãos pelo filme protetor, reduzindo a geração de calor por atrito e, consequentemente, as expansões térmicas, além de melhor distribuição de tensões normais no processo.

CONCLUSÃO

Incentivar a formação de recursos humanos para amplo desenvolvimento profissional e social condiz com as métricas de expansão das habilidades adquiridas na graduação, incitando o avanço de tecnologias e inovações, a fim de contribuir com a expansão da ciência desenvolvida no país. Além disso, o contato com a área acadêmica cria a possibilidade de especialização em áreas estratégicas do conhecimento, podendo a partir desta experiência expandir suas carreiras para áreas de atuação que deem continuidade aos conhecimentos adquiridos na universidade.

As transformações que ocorrem dia a dia contribuem para a constante implementação do desenvolvimento de inovação, no qual profissionais críticos que estejam engajados em causas de necessidade na sociedade, bem como envolvido na solução de problemas que visem suprimir as lacunas existentes na ciência e no mercado de trabalho. Logo, para sanar tais

demandas, tem-se a necessidade de formação de discentes com amplo raciocínio lógico e crítico que transcendam os limites impostos pelas suas pesquisas, ou seja, que pensem em alternativas para futuro, contribuindo com conhecimentos que contribuam com o mundo.

Portanto, o foco deste projeto de pesquisa é contribuir com as principais necessidades da indústria em respeito às lacunas existentes e comprovadas pela inexistência de pesquisas relacionadas ao tema proposto e, mais além, através do projeto a ser desenvolvido, contribuir para a formação de recursos humanos através do desenvolvimento da ciência. Assim, a proposta do proponente é evidenciar a sua contribuição positiva para o desenvolvimento de pesquisas acerca de tribologia e aplicação de técnicas sustentáveis de lubrificação e refrigeração na retificação, no qual contribuiu com toda a sociedade, em caso de aprovação nesse processo e ingresso no Pós-doutorado, para ajudar nas mais diferentes e necessárias demandas da universidade.

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.
- 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. 2018a.
- BIANCHI, E. C. et al. Evaluating the effect of the compressed air wheel cleaning in grinding the AISI 4340 steel with CBN and MQL with water. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 2855–2864, 30 mar. 2018b.
- 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, A. E. et al. Grinding behavior of VP50IM steel using green and black silicon carbide compared to aluminum oxide wheel under different feed rates. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 117, n. 9–10, p. 2639–2653, 2021.
- DE MARTINI FERNANDES, L. et al. Thermal model for surface grinding application. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 5–8, p. 2783–2793, 24 out. 2019.
- DE MORAES, 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 MORAES, D. L. et al. Advances in precision manufacturing towards eco-friendly grinding process by applying MQL with cold air compared with cooled wheel cleaning jet. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 113, n. 11–12, p. 3329–3342, 2 abr. 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.
- DEMIRBAS, E.; KOBAYASHI, M. Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 105, p. 79–90, 1 jan. 2017.
- DOMINGUES, B. B. et al. Eco-friendly thinking toward mitigating the greenhouse effect applied to the alumina grinding process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 124, n. 7–8, p. 2171–2183, 2023.
- DUFLOU, J. R. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 2, p. 587–609, 1 jan. 2012.
- FANG, K. et al. **A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction**. Journal of Manufacturing Systems. **Anais...Elsevier**, 1 out. 2011.
- 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.
- HADAD, M.; SADEGHI, B. Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 63, p. 1–15, 2012.
- 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. Grinding hardened steel using MQL associated with cleaning system and cBN wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 5–6, p. 2065–2080, 13 mar. 2020a.

- JAVARONI, R. L. et al. Evaluation of a cooled wheel cleaning jet in minimum quantity lubrication grinding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 111, n. 5–6, p. 1303–1317, 10 nov. 2020b.
- 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. 2018.
- 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. 2019.
- 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.; GUO, C. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**. 2^aed ed. New York: Industrial Press Inc, 2008.
- MALKIN, S.; HWANG, T. W. Grinding Mechanisms for Ceramics. **CIRP Annals**, v. 45, n. 2, p. 569–580, 1 jan. 1996.
- MARINESCU, I. D. et al. **Tribology of Abrasive Machining Processes**. 2^a ed. United States: William Andrew, 2012.
- MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. [s.l.] CRC Press, 2016.
- 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.
- OLIVEIRA, D. DE J. et al. Improving minimum quantity lubrication1. Oliveira D de J, Guermendi LG, Bianchi EC, et al (2012) Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning. *J Mater Process Technol* 212:2559–2568. <https://doi.org/https://doi>. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 12, p. 2559–2568, 2012.
- PUŠAVEC, F.; STOJČIĆ, A.; KOPAČ, J. Sustainable machining process - Myth or reality. **Strojarsstvo**, v. 52, n. 2, p. 197 – 204, 2010.
- RABBANI, M. et al. Risk and revenue of a lessor's dynamic joint pricing and inventory planning with adjustment costs under differential inflation. **International Journal of Procurement Management**, v. 11, n. 1, p. 1–35, 14 dez. 2017.
- ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**. [s.l.] Elsevier, 2014.
- SADEGHI, M. H. et al. Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–6Al–4V titanium alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 44, n. 5–6, p. 487–500, 13 set. 2009.
- SATO, B. K. et al. Grinding performance of AISI D6 steel using CBN wheel vitrified and resinoid bonded. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 5–6, p. 2167–2182, 21 dez. 2019.
- SATO, B. K. et al. Toward sustainable grinding using minimum quantity lubrication technique with diluted oil and simultaneous wheel cleaning. **Tribology International**, v. 147, p. 106276, 1 jul. 2020.
- 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.
- SAYYADI, R.; AWASTHI, A. A simulation-based optimisation approach for identifying key determinants for sustainable transportation planning. **International Journal of Systems Science: Operations and Logistics**, v. 5, n. 2, p. 161–174, 2018.
- SHASH, Y. H. et al. Evaluation of stress and strain on mandible caused by changing the bar material in hybrid prosthesis utilizing “All-on-Four” technique. **Alexandria Engineering Journal**, v. 62, p. 129 –

143, 2023.

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

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

YIN, L. et al. High speed versus conventional grinding in high removal rate machining of alumina and alumina–titania. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 7–8, p. 897–907, 1 jun. 2005.

YOSHIMURA, H. et al. Development of Nozzle System for Oil-on-Water Droplet Metalworking Fluid and Its Application to Practical Production Line. **JSME International Journal Series C**, v. 48, n. 4, p. 723–729, 2005.