

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

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

RAFAEL LEMES RODRIGUEZ

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA HÍBRIDA DE MQL COM LIMPEZA DA
SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO PARA UMA PRODUÇÃO MAIS
LIMPA E VERDE**

BAURU

2023

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA HÍBRIDA DE MQL COM LIMPEZA DA
SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO PARA UMA PRODUÇÃO MAIS
LIMPA E VERDE**

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

Área de concentração: Processos de fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Claudio Lopes

Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

BAURU

2023

R696a Rodriguez, Rafael Lemes
Aplicação da técnica híbrida de MQL com limpeza da superfície de
corte do rebolo para uma produção mais limpa e verde / Rafael Lemes
Rodriguez. -- Bauru, 2023
43 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: José Claudio Lopes
Coorientador: Eduardo Carlos Bianchi

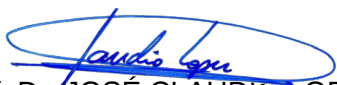
1. Retificação. 2. Fluido de corte. 3. MQL. 4. Jato de limpeza da
superfície de corte. 5. Produção verde. I. Título.

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 TESE DE DOUTORADO DE RAFAEL LEMES RODRIGUEZ, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 18 dias do mês de abril do ano de 2023, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de RAFAEL LEMES RODRIGUEZ, intitulada **APLICAÇÃO DE TÉCNICA DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO HÍBRIDA SUSTENTÁVEL NA RETIFICAÇÃO DE AÇO ENDURECIDO**. 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. THIAGO VALLE FRANÇA (Participação Virtual) do(a) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp), Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo / USP - São Carlos, Prof. Dr. CARLOS EIJI HIRATA VENTURA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de São Carlos. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES

A todos aqueles que contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal, profissional e acadêmico.

Aos meus pais, Fernando e Rosana, pela educação, esforço e empenho em proporcionar as condições para a elaboração deste trabalho.

À Raffaella pelo amor, apoio e paciência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Fernando Scharanck Rodriguez e Rosana Lemes da Silva Rodriguez por toda educação, esforço e empenho para minha formação acadêmica, pessoal e profissional.

Agradeço à minha esposa Raffaella pelo amor, apoio e cumplicidade.

Agradeço ao programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UNESP Bauru por proporcionar as condições necessárias para realização desse trabalho. Também agradeço a todos os docentes que participaram da minha formação acadêmica.

Ao Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi e Prof. Dr. José Claudio Lopes agradeço enormemente por todo o suporte não somente no período de realização do doutorado, como também durante toda a graduação. Apresento minha admiração e agradecimentos por todos os ensinamentos e orientação.

De forma salutar, apresento meus agradecimentos a toda equipe do Laboratório de Usinagem por Abrasão, em especial, ao Hélio Aparecido de Souza pelo apoio durante os a realização dos experimentos e ao Dr. Hamilton José de Mello por todo o conhecimento e ensinamentos compartilhados.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

RESUMO

Soluções com maior ecoeficiência têm sido cada vez mais propostas por pesquisadores e pelo setor industrial em todo o mundo nos últimos anos, a fim de tornar os sistemas de fabricação mais verdes e limpos. Essa ação está relacionada ao alerta global sobre a geração de gases de efeito estufa, como o CO₂, conforme informado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change). Uma das questões de maior risco ambiental no processo de usinagem é a aplicação de fluidos de corte, especialmente no processo de retificação em que os fluidos de corte são fundamentais para controlar a alta geração de calor e evitar queimas superficiais da peça e alterações microestruturais. A técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL) foi amplamente relatada na literatura como uma técnica de lubrificação potencialmente alternativa à técnica convencional abundante. No entanto, o principal limitante da técnica de MQL na retificação está relacionado à geração do fenômeno de empastamento produzido por cavacos que se alojam na superfície do rebolo devido ao baixo volume de óleo aplicado por essa técnica e consequentemente à sua menor ação lubrificante. A fim de propor melhorias à técnica MQL, aumentar sua eficiência, viabilizar e desenvolver uma técnica de lubrificação potencialmente mais verde, este trabalho propõe e avalia a aplicação da técnica híbrida de MQL com limpeza da superfície de corte do rebolo (HMQL + WCJ, “Wheel Cleaning Jet”) que combina a aplicação de óleo e água na proporção 1:5 no processo de retificação com rebolo de Al₂O₃ do aço AISI 4340. Esta técnica foi comparada com as técnicas convencional abundante e com a técnica de MQL com óleo puro e limpeza da superfície de corte do rebolo (PMQL + WCJ). Ambas as técnicas de MQL (híbrida e pura) foram testadas às vazões de 30, 60 e 120 mL/h. A técnica PMQL + WCJ produziu os piores resultados independente da vazão. A técnica HMQL + WCJ a 120 mL/h a maior vazão (120 mL/h) apresentou desempenho próximo à técnica convencional em termos de rugosidade superficial, microdureza, comportamento do empastamento na superfície do rebolo, desvio de forma da peça, potência consumida, geração de CO₂ durante o processo e emissão acústica e desempenho superior em termos de relação G. Isso indica o potencial ecoeficiente desta técnica para ser amplamente empregada na indústria de manufatura e mitigar o impacto ambiental e a pegada de carbono.

Palavras-chave: Retificação, fluido de corte, MQL, jato de limpeza da superfície de corte, produção verde, emissão de CO₂

ABSTRACT

Eco-efficiency solutions have been more and more proposed by researcher and industry round the world in latest years in order to become the manufacturing systems cleaner and greener. This action is related to the global warning about the generation of greenhouse gases (GHGs), like CO₂, as reported by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). One of the most hazardous issue related to environmental risk in machining process is the application of metalworking fluids (MWFs), especially in grinding process in which MWFs are pivotal to control high generation of heat and avoid workpiece surface burns and microstructural changes. The minimum quantity lubrication (MQL) was broadly reported in the literature as a potential alternative lubri-cooling technique to the conventional technique (flood - F). However, the main drawback of MQL grinding is related to high generation of clogging phenomenon produced by the chips lodged on the grinding wheel active surface (GWAS) due to the low oil volume and consequently the low lubricating and cooling action. In order to propose improvements on MQL technique, increase its efficiency and viability and develop a potential greener lubri-cooling technique, this work aims to propose and evaluate the application of hybrid HMQL + WCJ technique combined oil and water at 1:5 oil-water in the Al₂O₃ grinding process of AISI 4340 steel. This technique was compared to flood F and the pure PMQL + WCJ (pure oil) techniques. Both MQL techniques (hybrid and pure) employed at 30, 60 and 120 mL/h. The PMQL + WCJ technique produced the worst results irrespective of the flow rate. The HMQL + WCJ at 120 mL/h (highest flow rate) presented similar performance to the F technique in terms of surface roughness, microhardness, clogging behavior on GWAS, workpiece form deviation, grinding power, generation of CO₂ during the process and acoustic emission (AE) and outperformance in terms of G ratio. This indicates the eco-efficient potential to be widely employed in manufacturing industry and mitigate the environmental impact and carbon footprint of hybrid MQL + WCJ technique.

Keywords: grinding, cutting fluid, MQL, wheel cleaning jet, green production, CO₂ emission

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivos	18
1.3	Objetivos Específicos.....	18
2	RELATO	18
3	ESTRUTURA DO ARTIGO	18
3.1	Resumo.....	19
3.2	Introdução.....	19
3.3	Materiais e Métodos.....	19
3.4	Resultados e Discussão	19
3.4.1	Integridade da superfície da peça e condição da superfície de corte do rebolo	19
3.4.2	Desvio de Circularidade	23
3.4.3	Relação G	25
3.4.4	Potência consumida, energia consumida e CO ₂ gerado durante o processo de retificação	26
3.4.5	Emissão acústica	28
3.5	Conclusão	30
4	CITAÇÕES DE ARTIGOS	31
5	CONCLUSÃO.....	33
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	35
7	REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) relatou que a temperatura média global aumentará 2°C neste século, o que causará danos profundos a todo o ecossistema e à sociedade. Nesse sentido, o relatório reporta que os gases causadores do efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂), são os principais agentes que produzirão essa mudança climática. Para Bui et al. (2018) é latente a necessidade de controle da emissão de gases de efeito estufa para frear as drásticas consequências futuras. A métrica que referencia a medição da emissão de CO₂ é chamada de pegada de carbono, conforme relatado por Wiedmann et al. (2006).

A Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA) mostrou que a indústria emitiu 20% do total mundial de CO₂ em 2017 (equivalente à 6228 Mt de CO₂ lançados à atmosfera), mostrando a grande participação que a produção industrial possui atualmente na emissão de poluentes. Aliado a isso, essa agência também relata que o setor de produção de eletricidade foi responsável por cerca de 40% das emissões de CO₂ em 2017, representando aproximadamente 13603 Mt de CO₂. De acordo com Fang et al. (2011), a emissão de poluentes pelo setor energético torna-se importante, pois a indústria consumiu cerca de 32,2 bilhões de MJ em 2017 e estima-se que ela utilizará 25,95 trilhões de MJ em 2030 (cerca de 800 vezes o consumo atual). Benhelal et al. (2013) complementam que a emissão indireta de gases causadores de efeito estufa através do consumo de energia pela indústria é enorme e tende a aumentar significativamente, mostrando-se um grande foco para o desenvolvimento de novas tecnologias.

Ao se investigar a indústria, nota-se que a manufatura é responsável por 84% das emissões de CO₂ e de 90% do consumo de energia elétrica no setor industrial, como relatam Duflou et al. (2012) e Sun and Li (2014). De acordo com o Fórum Econômico Mundial (*World Economic Forum*), o setor de produção e manufatura foi responsável por um quinto da emissão de CO₂ e 54% do consumo de energia global em 2022. Fang et al. (2011) destacam que apenas 15% da energia utilizada durante a usinagem é gasta para efetivamente a remoção do material da peça. O protagonismo da fabricação na emissão direta e indireta de poluentes justifica o grande esforço de pesquisadores acerca desse tema a fim de encontrar métodos mais sustentáveis ou amigáveis ao meio ambiente.

De acordo com Li et al. (2012), o uso em larga escala de emulsão à base de óleo com água que predomina nos fluidos de corte aplicados na fabricação também causa poluição, dado que para produzir 1 kg de fluido de corte é emitido 0,168 kg de CO₂. Em 2016, foram

consumidos 13726 Mt de fluido de corte, sendo necessária uma emissão de, aproximadamente, 2300 Mt de CO₂ (combustível fóssil) para produzir esse montante de fluido de corte, segundo relato de Said et al. (2019).

Além disso, Hadad (2015) infere que os compostos tóxicos também causam danos à natureza, tornando os fluidos de corte potenciais poluidores se descartados de maneira incorreta. Dessa forma, a indústria é obrigada pela regulamentação ambiental a pagar pelo descarte ecologicamente seguro dos fluidos, o que pode chegar a quatro vezes o valor de compra da mesma quantidade de fluido de corte, encarecendo a produção segundo Shokrani et al. (2012). Os fluidos de corte necessitam de sistema de recirculação, armazenagem e manutenção, os quais demandam de mais energia e de mais recursos financeiros para serem utilizados. Walker (2013) apresenta que os fluidos de corte podem representar de 8 a 16% do custo total de fabricação que está relacionado ao complexo armazenamento, filtragem, processo de descarte de resíduos, sistemas de circulação, energia consumida, riscos à saúde do operador e alta potência de bombeamento. Sen et al. (2019) apresentam que energia, meio ambiente e custo são temas que devem ser melhor estudados em futuros trabalhos de pesquisa. Nesse sentido, Krolczyk et al. (2019) descrevem que os conceitos de processo de fabricação verde, limpo e sustentável têm ganhado cada vez mais importância no atual cenário.

Por outro lado, a excelente capacidade lubrificante e refrigerante do fluido de corte torna a sua substituição em larga escala muito difícil, dada a necessidade de métodos alternativos que minimizem as problemáticas desses fluidos e mantenham a sua produtividade. Com esse intuito, pesquisadores como Brinksmeier et al. (2015), Jawahir et al. (2016) e Wang et al. (2017) implementaram e aperfeiçoaram a usinagem a seco, criogênica, com óleo vegetal e com nanopartículas. Porém, o método alternativo de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) é o mais promissor atualmente (JAVARONI et al., 2020a). O método de MQL consiste em uma mistura gasosa entre gotículas de óleo e ar comprimido, aplicando 150 mL/h de óleo, isto é, esse método utiliza apenas 0,25% da quantidade de fluido de corte aplicada convencionalmente (60 L/h) como descreve Silva et al. (2013). Javaroni et al. (2019) comentam que o resíduo da técnica de MQL é quase inexistente, não possui sistemas recirculante e sua armazenagem é extremamente menor comparado ao uso convencional de fluido de corte. Esse método consome também menos energia com procedimentos inerentes ao corte do material. De acordo com Sanchez et al. (2010), o método de MQL é considerado amigável ao meio ambiente ou verde pela ISO 14000 devido ao seu baixo impacto. Portanto, esse método pode causar mudanças

significativas se aplicado em processos altamente dependentes de fluido de corte, entre eles a retificação.

De acordo com Thakur et al. (2010), a técnica de aplicação MQL não somente reduz o custo operacional, podendo chegar à redução de até 20% do custo total do processo, mas também mitiga problemas inerentes ao uso de fluidos de corte de modo convencional. Os autores relatam que problemas respiratórios e dermatológicos são erradicados, assim como a contaminação de solos e águas, em razão do descarte inadequado. A figura 2 mostra a redução nos custos de produção promovida pela utilização do MQL.

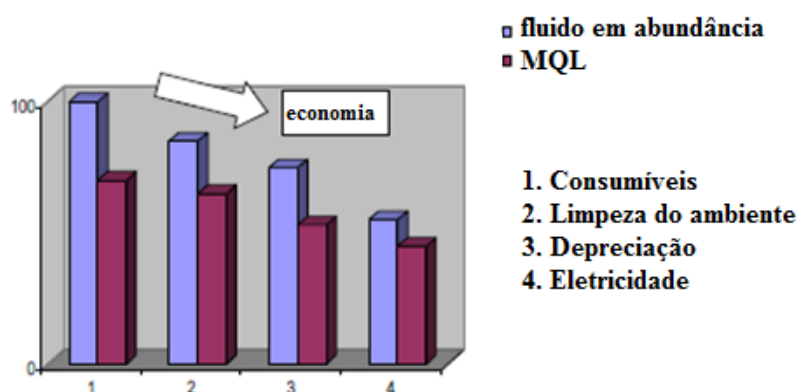


Figura 1. Redução de custos do MQL em comparação aos fluidos de corte em abundância (THAKUR et al., 2010 - modificado).

Maruda et al. (2020) analisaram os aspectos metrológicos e tribológicos de superfícies usinadas obtidas por vários métodos de lubrificação no processo de torneamento do aço AISI 1045. Os autores realizaram testes em diferentes métodos de lubrificação: usinagem a seco, mínima quantidade de lubrificação (MQCL - *Minimum Quantity Cooling Lubrication*); mínima quantidade de lubrificação com adição de aditivos de EP – *Extreme Pressure* (pressão extrema) e AW – *Anti-Wear* (antidesgaste) (MQCL+EP/AW) e mínima quantidade de lubrificante (MQL). Em relação à topografia da superfície, os menores valores do fator de rugosidade Sq (raiz quadrada média da altura) foram registrados após o processo de torneamento com a aplicação da técnica MQCL + EP/AW. O tribofilme na superfície usinada foi observado com os maiores valores obtidos (responsável pela retenção de óleo) após o processo de torneamento com os métodos de MQL e MQCL+EP/AW. Além disso, os ensaios tribológicos mostraram que os menores valores de temperatura e coeficientes de atrito instantâneo foram registrados para MQCL + EP/AW. Uma fina camada de um tribofilme distribuído uniformemente prevaleceu na superfície. A assimetria da superfície confirma que a

usinagem com MQCL + EP/AW gerou superfícies com predominância de vales sobre picos, quando comparadas às superfícies produzidas sob outros métodos de lubrificação. Além disso, Maruda et al. (2015) testaram a aplicação dos aditivos ativos EP/AW na usinagem MQCL do aço inoxidável X10CrNi18-8 e obtiveram um tribofilme a base de fósforo e cálcio na superfície usinada o que levou a redução da rugosidade superficial pela redução do atrito na zona de corte, o que foi confirmado por pesquisas adicionais sobre o desgaste da ferramenta, como na pesquisa de Maruda et al. (2016). Krolczyk et al. (2018) relataram a aplicação de concentrado de emulsão e água (MQCL) no processo de usinagem de aço inoxidável duplex e compararam com a condição a seco. Os autores concluíram que o MQCL contribuiu para melhorar o acabamento superficial. Maruda et al. (2018) empregaram a quantidade mínima de lubrificação com agentes de extrema pressão e antidesgaste (MQCL + EP/AW) na usinagem do aço AISI 1045. Os autores concluíram que a mistura de óleo e água enriquecida com 5% de partículas de EP/AW na técnica MQCL + EP/AW reduziu em 8% o desgaste de flanco em comparação ao MQCL e até 23% em comparação à usinagem a seco.

Mia et al. (2019) estudaram a força de corte, energia específica, temperatura, rugosidade superficial e taxa de remoção de material no processo de usinagem da liga Ti-6Al-4V (grau 5) sob aplicação de refrigeração a seco e nitrogênio líquido criogênico (LN2) com jato único e jato duplo. Os autores relataram que o torneamento com jato de resfriamento criogênico superou o corte a seco em relação à sustentabilidade, ambiente de fabricação limpo, economia de energia e ao desempenho. Além disso, o jato criogênico duplo de nitrogênio nas superfícies de saída e flanco apresentou melhor o desempenho do que a técnica com jato único devido à maior eficácia na redução do consumo específico de energia e temperatura e melhorando a qualidade da superfície. Isso pode ser explicado pela remoção de calor mais eficiente pelo LN2 das interfaces críticas.

Garcia et al. (2020) inferem que na retificação múltiplas arestas cortantes do rebolo retiram material da superfície da peça simultaneamente, gerando uma enorme quantidade de calor nessa região de contato. Debnath et al. (2014) e Rabiei et al. (2015) relatam que a peça pode atingir temperaturas que causam danos térmicos, mudanças microestruturais, desvios geométricos e perda de qualidade superficial, comprometendo a funcionalidade de peças de precisão produzidas pelo processo de retificação. Contra esse quadro, a indústria utiliza em larga escala a aplicação convencional abundante de fluido de corte, o qual ameniza de maneira satisfatória essas problemáticas. Porém, os danos à saúde, ao meio ambiente e o aumento dos custos de produção causados pelo alto consumo de fluido de corte impulsionam novas pesquisas

com o objetivo de otimizar técnicas alternativas que o substitua na retificação sob aplicação convencional de fluido de corte, como é o exemplo da técnica de MQL segundo Pervaiz et al. (2018).

De acordo com Rodriguez et al. (2019), a pressão do fluxo de ar da MQL proporciona uma excelente penetração do óleo através da barreira de ar, a qual é formada principalmente pelo movimento do rebolo. Esse fato é relevante, pois isso reduz drasticamente o desperdício de fluido. Além disso, Lopes et al. (2019) descrevem que a penetração eficaz de óleo com MQL proporciona uma ótima lubrificação da zona de corte, reduzindo o riscamento e deformação plástica da superfície da peça. No método convencional de aplicação de fluido de corte, por outro lado, há perda de fluido quando o jorro colide com a barreira de ar, diminuindo a eficiência do processo. Porém, o jato de ar do MQL não possui capacidade refrigerante equivalente ao método convencional, o que resulta em maior aquecimento tanto da peça, quanto do rebolo durante a retificação, possibilitando danos térmicos quando submetido às mesmas condições de usinagem, como relatado por Garcia et al. (2020) e Silva et al. (2013). Além disso, a elevada temperatura provoca aumento da fratura dos grãos abrasivos e do ligante, o que intensifica o desgaste da ferramenta, piorando a qualidade da peça e aumentando os custos do processo. Outro ponto que o MQL é inferior à aplicação convencional de fluido de corte é quanto à capacidade de remoção dos cavacos das zona de corte e, consequentemente, incidência de maior empastamento do rebolo.

Os cavacos formados na retificação tendem a se alojar na porosidade presente na ligação, formando o empastamento. Esse fenômeno recobre a superfície de corte, reduzindo a afiação do rebolo e deformando a peça ao invés de realizar o corte (Rodriguez et al., 2019). Desta forma, Jawahir et al. (2011) afirmaram que o fenômeno mais indesejável que ocorre durante o processo de retificação é o entupimento dos espaços intergranulares que ocupam a área da superfície efetiva de corte. Segundo os autores, a ocorrência de entupimento reduz a capacidade de corte do rebolo, o que diminui a eficiência e aumenta a força de retificação, o atrito e, consequentemente, a temperatura, levando ao desgaste prematuro da ferramenta. De acordo com Marinescu et al. (2013), a temperatura excessiva resulta em defeitos de retificação, como queima na superfície da peça. Além disso, o contato do empastamento com a superfície da peça sob alta temperatura e pressão produz a adesão dos materiais, o que dissipa mais energia durante a retificação e piora a qualidade da peça. Nesse sentido, a aplicação convencional de fluido de corte consegue remover os cavacos gerados, o que a mistura ar-óleo da técnica de MQL não consegue fazer de maneira eficaz. Além disso, a técnica de MQL tende a produzir

maior temperatura de corte, intensificando o empastamento como relatam Lopes et al. (2018) e Zhang et al. (2016). Segundo Javaroni et al. (2020b), a ineficiência da técnica de MQL na remoção dos cavacos da zona de corte aumenta substancialmente as temperaturas de corte, tornando os cavacos mais dúcteis e intensificando o empastamento do rebolo. Apesar da técnica de MQL apresentar claros avanços em direção à manufatura verde, sua baixa capacidade de resfriamento combinada à incidência de empastamento acentuado são as principais barreiras para a implementação de maneira mais ampla desta técnica.

A adição de água à técnica de MQL tem se mostrado um meio de aumentar a capacidade refrigerante dessa técnica. Nesse sentido, gotículas de água com óleo são inseridas ao fluxo de ar ao invés de apenas óleo puro. Belentani et al. (2014) afirmam, em seu trabalho sobre retificação do aço AISI 4340, que a água absorve calor mais rápido que o óleo puro, devido ao seu calor específico maior. Dessa forma, a água presente nas gotículas do MQL com adição de água retiram calor da zona de corte mudando de fase principalmente, o que não ocorre na técnica de MQL tradicional (com óleo puro). Segundo Bianchi et al. (2018b), a diluição do óleo na técnica de MQL beneficia a sua atomização e, conseqüentemente, a sua penetração na zona de corte na retificação. Sadeghi et al. (2010) e Davim (2008) destacam que o efeito de perda de resistência (“*rebinder*”) é maior quando se utiliza a técnica de MQL com água, i.e., as gotículas conseguem entrar nas microtrincas da superfície da peça, evitando que elas se fechem durante a formação do cavaco. Assim, a maior quantidade de microtrincas que não se fecharam tornam-se pontos concentradores de tensão e fragilizando a superfície afetada. Por um lado, isso diminui a energia de cisalhamento necessária para o corte do material, como relatado por De Moraes et al. (2019) na retificação do aço AISI 52100 com aplicação da técnica de MQL com água. Além disso, os autores mostraram que o uso de água no MQL pode reduzir a rugosidade (em até 40%), o desvio de circularidade e o desgaste do rebolo através da sua maior capacidade refrigerante, aproximando aos resultados da aplicação convencional de fluido de corte. Por outro lado, o menor uso de óleo pelo técnica de MQL diluído diminui a lubrificação no contato peça-ferramenta, aumentando a potência de corte. Em conclusão, a adição de água à técnica de MQL mostra-se uma forma promissora de ampliar a aplicabilidade dessa técnica verde no processo de retificação.

Em vista da ineficiência na retirada de cavaco da zona de corte pela técnica de MQL, o jato de limpeza da superfície de corte (wheel cleaning jet - WCJ) tem grande aplicabilidade na remoção do empastamento do rebolo. Garcia et al. (2020) descrevem que essa técnica aplica um jato de ar comprimido sobre a superfície de corte do rebolo fora da zona de contato peça-

ferramenta. Oliveira et al. (2012) estudaram a influência do ângulo de aplicação do WCJ na retificação do aço AISI 4340 sob MQL, comparando ao método convencional de aplicação de fluido de corte. Fruto dessa pesquisa, os autores concluíram que a aplicação do WCJ na angulação de 30° em relação à vertical produziu os melhores resultados, retirando grande parte do empastamento da superfície do rebolo. Lopes et al. (2019) compararam os métodos convencional de aplicação de fluido de corte, MQL, MQL+nanopartículas e MQL+WCJ na retificação do aço AISI 4340. Os autores observaram entre as técnicas analisadas que a MQL+WCJ foi a que produziu resultados mais próximos ao método convencional de aplicação de fluido de corte em todos os parâmetros analisados. Segundo Bianchi et al. (2018a), a implementação de WCJ na técnica de MQL com diferentes vazões (30 mL/h, 60 mL/h e 120 mL/h) reduziu significativamente o desgaste da ferramenta e a potência necessária para o corte do AISI 4340 durante a retificação desse material, produzindo resultados muito próximos ao método convencional de aplicação de fluido de corte. Com base nas pesquisas citadas, a aplicação de WCJ diminui o empastamento e suas problemáticas causados pelo MQL, amplificando sua aplicabilidade como opção verde ao uso abundante de fluido de corte na indústria.

A fim de promover maiores descobertas e avanços sobre a técnica MQL e alcançar uma maior ecoeficiência e viabilidade desta técnica de lubrificação, este trabalho avalia a aplicação da técnica híbrida (HMQL+WCJ) que combina óleo e água na proporção 1:5 óleo-água com a aplicação do jato de limpeza da superfície de corte do rebolo por meio da avaliação da integridade superficial, desvio de forma, comportamento do fenômeno de empastamento, potência de retificação e emissão acústica. De forma precursora, este estudo apresenta a energia consumida durante o processo de retificação e seus efeitos ambientais e pegada de carbono em termos de emissão de CO₂. Além disso, este estudo está relacionado a uma intenção de ampliar a aplicação da técnica de MQL na indústria, propondo a melhoria da técnica de MQL no processo de retificação do aço AISI 4340, que é um dos materiais mais retificados na indústria metalúrgica. Além disso, o rebolo aplicado neste estudo foi o rebolo de Al₂O₃, que é o rebolo mais comum nas operações atuais de retificação, o que mostra ainda mais a relevância deste estudo na indústria de transformação. Assim, esses aspectos suportam o fato de que este estudo apresenta uma nova aplicação da técnica híbrida de MQL, fundamentada pelo material de base e ferramenta empregada. Este estudo apresentou resultados importantes, uma vez que evidencia a ecoeficiência da técnica de lubrificação híbrida de MQL e mostra uma aplicação de fluido de corte mais sustentável, a fim de obter um processo de retificação mais ecológico e

limpo, mitigando a geração de CO₂ e, conseqüentemente, gases de efeito estufa e aquecimento global. Isso mostra o grande potencial para aplicação desta técnica na indústria metalúrgica como uma técnica de lubrificação alternativa para a aplicação convencional abundante de fluido de corte (F, “flood”) mantendo o desempenho do processo e a integridade da superfície da peça. Por fim, essa técnica reduz a pegada de carbono gerada e os custos de fabricação o que beneficia toda a sociedade e contribui para um sistema de produção global mais limpo e verde, já que esta técnica emprega apenas 0,2% do volume de óleo em relação à técnica abundante.

1.1 Motivação

O processo de retificação envolve grande quantidade de calor entre a ferramenta abrasiva e a peça, assim a aplicação de fluidos de corte são de fundamental importância para que parte do calor gerado seja removida com a refrigeração e lubrificação da área de contato entre a peça e a ferramenta, garantindo-se uma melhor qualidade e acabamento às peças produzidas.

Nesse sentido, existe também a preocupação do ponto de vista ocupacional e ambiental com o uso dos fluidos de corte, uma vez que estes são tóxicos aos operadores das máquinas e perigosos ao meio ambiente. Ademais, o uso dos fluidos de corte de forma abundante/convencional também eleva o custo de manufatura na medida em que a sua aplicação em grande quantidade nos processos de usinagem envolve complicados e custosos processos de armazenagem e descarte ecológico.

Com essa preocupação, o presente trabalho apresenta uma contribuição inovadora ao aprimoramento e desenvolvimento tecnológico da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 com rebolo convencional por meio da aplicação da técnica híbrida HMQL. Com isso, objetiva-se proporcionar a redução dos insumos de retificação, prejudiciais ao meio ambiente e ao operador da máquina, possibilitando também a redução de custos ao processo de fabricação e, conseqüentemente, tornando a manufatura mais competitiva no mercado.

Apesar dos avanços propostos por autores como Rodriguez et al. (2019) e Bianchi et al. (2018a) acerca da avaliação de desempenho da técnica de MQL com limpeza da superfície de corte do rebolo convencional de óxido de alumínio, este e outros trabalhos apresentam a aplicação da técnica de MQL com óleo puro. Assim, esse trabalho explora ainda mais o potencial em nível de desempenho e de sustentabilidade da técnica de MQL com adição de água. É importante destacar também que não há trabalhos publicados acerca da utilização de

MQL com água na retificação externa de mergulho com rebolo convencional de óxido de alumínio. Mais além, o destaque desse trabalho está no fato da proposta de diminuição da vazão de fluido de corte aplicada que é convencionalmente utilizada de 120 a 140 mL/h na aplicação da técnica de MQL com diluição em água.

1.2 Objetivos

Avaliar a integridade superficial e desvio de forma, comportamento do fenômeno de empastamento, potência de retificação e emissão acústica na retificação do aço ABNT 4340 sob a aplicação de MQL com adição de água e limpeza da superfície de corte do rebolo convencional de óxido de alumínio. De forma inovadora e única, este estudo apresenta a energia consumida durante o processo de retificação e seus efeitos ambientais e pegada de carbono em termos de emissão de CO₂.

1.3 Objetivos Específicos

Avaliar a microscopia confocal 3D e microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície retificada da peça.

Analisar as imagens da superfície efetiva de corte do rebolo.

Estudar a eficiência do processo para as variáveis de saída: rugosidade superficial, erros geométricos (desvio de circularidade) da peça, razão G, microdureza, energia consumida e emissão de CO₂ e emissão acústica.

2 RELATO

O artigo intitulado “Application of hybrid eco-friendly MQL+W CJ technique in AISI 4340 steel grinding for cleaner and greener production”, foi publicado na revista Journal of Cleaner Production (ISSN: 0959-6526), cujo fator de impacto é 11,072 (em 01/2023) e classificação Qualis A1. Publicado em fevereiro de 2021 o artigo divulga os resultados da obtidos pelo projeto de pesquisa “Aplicação da técnica híbrida de MQL com limpeza da superfície de corte do rebolo para uma produção mais limpa e verde”.

3 ESTRUTURA DO ARTIGO

A publicação intitulada “Application of hybrid eco-friendly MQL+W CJ technique in AISI 4340 steel grinding for cleaner and greener production” é composta por cinco seções.

3.1 Resumo

Apresenta o tema principal do projeto, sua justificativa e quais foram os principais resultados obtidos.

3.2 Introdução

Nessa seção são apresentados os principais tópicos envolvidos na pesquisa:

- Cenário ambiental e impacto dos processos de fabricação na geração de CO₂ e no consumo energético global
- Importância da aplicação de fluidos de corte na retificação
- Riscos à saúde e ao meio ambiente causados pela aplicação dos fluidos de corte
- Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) e estudos inovadores relacionados à sua aplicação
- Obstáculos da aplicação de MQL na retificação
- Objetivos da pesquisa.

3.3 Materiais e Métodos

Apresenta os equipamentos e metodologia utilizados no desenvolvimento da pesquisa experimental.

- Dados do equipamento utilizado nos testes;
- Geometria e especificação do material dos corpos de prova;
- Parâmetros de corte aplicados;
- Esquema experimental utilizado;
- Técnicas de lubrificação aplicada;
- Método e equipamentos do sistema de limpeza por ar comprimido;
- Metodologia e equipamentos utilizados para obtenção dos parâmetros de saída.

3.4 Resultados e Discussão

Apresenta os resultados obtidos na pesquisa, bem como as discussões acerca dos mesmos.

3.4.1 Integridade da superfície da peça e condição da superfície de corte do rebolo

Os ensaios foram realizados para sete condições de lubrificação (F, PMQL+WCI e HMQL+WCI para três vazões diferentes) a fim de avaliar o impacto do jato de limpeza da

superfície de corte (WCJ) e da adição de água na integridade da superfície das peças e qualidade superficial.

Para a avaliação da rugosidade média aritmética (R_a), o maior valor ($0,381 \mu\text{m}$) foi obtido para a técnica de PMQL à vazão de 30 mL/h . Para a aplicação da técnica de PMQL às vazões de 60 e 120 mL/h , os valores de rugosidade superficial medidos foram, respectivamente, $0,361$ e $0,307 \mu\text{m}$. Por outro lado, para a aplicação da técnica de HMQL às vazões de 30 , 60 e 120 mL/h , os valores de rugosidade superficial foram respectivamente $0,289$; $0,251$ e $0,195 \mu\text{m}$. Isso representou uma diminuição relativa à técnica de PMQL de respectivamente $24,147\%$, $30,471\%$ e $36,482\%$. A condição abundante F levou a uma rugosidade superficial de $0,206 \mu\text{m}$, ou seja, a técnica de HMQL à vazão de 120 mL/h apresentou um desempenho matematicamente semelhante (comprovado pelo desvio padrão) quando comparado à técnica abundante F. Mia et al. (2017) analisaram o processo de torneamento com MQL com variação da vazão do fluido de corte em função do tempo e apresentaram efeitos importantes na rugosidade da superfície. Os autores inferiram que uma maior vazão resultou em menor rugosidade superficial devido à maior quantidade de fluido para lubrificar a zona de corte, como pode ser observado no comportamento da condição abundante F do presente estudo. Além disso, quando as condições para a aplicação da emulsão óleo-água são adequadamente definidas (incluindo a vazão nominal e o ângulo de inclinação do bocal em relação à superfície de corte do rebolo), o método abundante aumenta a eficácia de remoção de cavacos da zona de corte, diminuindo substancialmente a ocorrência de empastamento na superfície de corte do rebolo (CZAPIEWSKI, 2017; LI et al., 2015; STACHURSKI et al., 2019).

Segundo Garcia et al. (2020), a adição da mistura óleo-água (proporção 1:5) à técnica de MQL com limpeza da superfície de corte do rebolo no processo de retificação do aço rolamento 52100 superou as demais proporções de diluição (1:0, 1:1 e 1:3) e produziu resultados de rugosidade superficial próximos ao método convencional (22% maior do que o resultado obtido para o método convencional). Os autores inferiram que isso mostra o potencial positivo da adição de água e limpeza da superfície de corte do rebolo ao processo de retificação.

Além disso, Sato et al. (2020) relataram que a adição de água na retificação com MQL do AISI 4340 reduziu a ocorrência de empastamento da superfície de corte do rebolo em 40%, o que resultou em uma redução de 51% na rugosidade superficial.

Em termos de integridade superficial da peça para as diferentes condições de lubrificação, grandes picos e vales causados por alta deformação plástica foram observados principalmente para as condições mais severas de retificação, isto é, sob a aplicação

da técnica de PMQL+WCJ em vazões mais baixas (30 e 60 mL/h). Durante a aplicação da técnica de HMQL+WCJ, a deformação plástica foi significativamente reduzida em comparação com PMQL+WCJ. A maior vazão (120 mL/h) na retificação com MQL produziu melhor condição lubrificante, reduzindo a rugosidade superficial e evitando a elevada deformação plástica na superfície da peça (MARUDA et al., 2017). Nesta vazão, a técnica de HMQL+WCJ gerou menor deformação plástica em comparação à técnica de PMQL+WCJ devido à maior capacidade de refrigeração oriunda da adição de água. A adição de água aumenta a dissipação de calor da zona de corte por transformação de fase da água líquida em vapor (YOSHIMURA et al., 2005), o que reduz a ocorrência de empastamento da superfície de corte do rebolo e mantém os grãos do rebolo mais afiados (SATO et al., 2020). Este fato contribui para a menor ocorrência de deformação plástica do material que ainda não foi removido da peça – *ploughing* – e do atrito dos grãos abrasivos com a peça e pequenas espessuras de cavaco deformado plasticamente – *rubbing* e produz melhor acabamento superficial (OLIVEIRA et al., 2012).

Os menores valores de rugosidade quadrática média (RMS) e altura quadrática média (Sq) foram obtidos pela aplicação das técnicas HMQL+WCJ a 120 mL/h e abundante F. A técnica HMQL+WCJ a 120 mL/h produziu valor de rugosidade RMS 6,3% menor e valor de Sq 2,3% maior que a técnica abundante F, o que ratifica a similaridade dos valores obtidos por essas técnicas. Estes resultados mostram o melhor desempenho da técnica de HMQL+WCJ à vazão de 120 mL/h em comparação com outras condições MQL e resultados semelhantes em comparação com a técnica abundante F, resultando na distribuição mais uniforme de picos e vales e nos menores valores de rugosidade superficial (MARUDA et al., 2020). Como esperado, os maiores valores de altura máxima pico-vale (PV) foram registrados para a retificação com a técnica PMQL+WCJ, que apresentou a deformação plástica mais expressiva e maior altura entre sulcos e picos.

Conforme discutido anteriormente, a retificação sob a técnica de PMQL+WCJ gerou maior rugosidade superficial. Embora a aplicação do WCJ minimize o fenômeno de empastamento, reduzindo a quantidade de cavacos alojados nos poros do rebolo e, conseqüentemente, diminuindo o atrito entre peça e ferramenta (Walker, 2013) e apesar de diminuir a rugosidade superficial em 45% conforme relatado por Rodriguez et al. (2019), o óleo puro não foi capaz de produzir melhor condição de corte em comparação ao HMQL+WCJ que pode ser explicado pela maior viscosidade do fluido dessa condição em comparação com a técnica de HMQL. Bianchi et al. (2018a) relatam que o fenômeno de empastamento é intensificado pela aplicação de óleo puro devido ao fato de fluidos de alta viscosidade estarem

relacionados à suspensão sólida que forma a mistura (óleo e cavacos) que se aloja nos poros do rebolo. Segundo de Moraes et al. (2019), os fluidos de corte com alta viscosidade dificultam a remoção do cavaco, aumentando a suscetibilidade da ocorrência do fenômeno de empastamento. Por outro lado, como a viscosidade da água é menor do que a viscosidade do óleo, quando água é adicionada, a viscosidade da emulsão é reduzida e sua eficácia na remoção de cavacos da zona de corte aumenta. A qualidade de acabamento da peça é prejudicada por esses cavacos alojados que riscam a superfície de trabalho sem efetivamente remover o material e promover o corte do material. Morgan et al. (2008) relatam que os poros abertos são importantes para garantir a impregnação pelo fluido de corte e evitar queima, trincas e alteração microestrutural na superfície e subsuperfície da peça. Segundo Walker (2013), embora os fluidos de alta viscosidade possam apresentar excelentes propriedades lubrificantes, eles apresentam problemas para serem pulverizados na zona de corte devido à sua baixa capacidade de penetração, resultando na perda da ação lubrificante. Segundo Sato et al. (2020), quando o efeito de lubrificação do fluido diminui, a qualidade do acabamento superficial também diminui, ou seja, a lubricidade afeta substancialmente a rugosidade superficial. Os autores inferem que a superfície de corte empastada do rebolo impede a entrada do fluido de corte, logo a ação do lubrificante é ineficiente e afeta a rugosidade superficial da peça. Os grãos abrasivos deformam a superfície da peça em vez de efetivamente remover o material como é claramente visto pela aplicação da técnica de PMQL. A aplicação de HMQL implica em menor viscosidade do fluido pela adição de água, o que diminui a viscosidade do fluido em relação à técnica de PMQL e, conseqüentemente, facilita a penetração do fluido na zona de corte para proporcionar o efeito de lubrificação necessário. Em outras palavras, quando o óleo é diluído em água, a ação lubrificante do fluido em si diminui. Porém, por outro lado, o efeito global de lubrificação da técnica de HMQL é aumentado. De fato, a adição de água também está relacionada a uma maior capacidade refrigerante que proporciona uma maior remoção de calor da zona de corte e conseqüentemente temperaturas mais baixas na zona de corte. Rodriguez et al. (2019) descrevem que temperaturas excessivas na zona de corte reduzem o limite de escoamento do material da peça e aumentam a deformação dos cavacos, aumentando o seu alojamento e aderência nos poros do rebolo. De acordo com Yoshimura et al. (2005), o MQL com adição de água contribui para reduzir o empastamento da superfície de corte do rebolo devido ao seu maior efeito de resfriamento e diminuição da temperatura de corte e, conseqüentemente, a ductilidade da peça não é tão afetada e a adesão do material é diminuída.

Os efeitos da aplicação do WCJ juntamente com a maior capacidade de lubrificarrefrigerante de HMQL pela adição de água contribuem positivamente para o desempenho do processo. O desempenho da técnica de HMQL+WCJ à vazão de 120 mL/h foi semelhante ao da técnica abundante F. A técnica de HMQL+WCJ à vazão 120 mL/h resultou em rugosidade superficial similar à técnica abundante F empregando volume substancialmente menor de fluido de corte (0,2% da técnica abundante F). As melhorias apresentadas pela aplicação da técnica de HMQL+WCJ à vazão de 120 mL/h produziram maior exposição dos grãos abrasivos e poros livres, tendo minimizado os efeitos de empastamento da superfície de corte do rebolo semelhante à técnica convencional abundante e resultando em maior densidade ativa de grão e afiação, que refletiu em valores de rugosidade superficial mais baixos. A adição de água, bem como a aplicação do WCJ e o aumento do volume de fluido aplicado na técnica MQL contribuíram de forma evidente para melhorar o desempenho e eficiência da retificação sob a aplicação de MQL, levando a um acabamento superficial e integridade da peça semelhante à retificação abundante F para as condições investigadas neste trabalho.

Com o objetivo de analisar alterações microestruturais, a microdureza inicial e final da peça foram medidas. O valor medido da microdureza antes dos ensaios de retificação (valor de referência) variou de 717,2 (a 60 μm da superfície) a 710,8 (a 300 μm da superfície). Para todas as técnicas de lubrificarrefrigeração investigadas neste trabalho, as peças tiveram uma leve queda na dureza abaixo da superfície retificada. A maior queda na microdureza subsuperficial observada após a retificação representou cerca de 4,823% de desvio do valor medido de referência antes da retificação. Este desvio pela medição da microdureza abaixo da superfície retificada não pode ser considerado significativo para resultar em danos térmicos à microestrutura (como queima de retificação) devido às temperaturas de retificação, independentemente da técnica de lubrificarrefrigeração empregada. De acordo com Marinescu et al. (2004), as temperaturas durante a retificação podem não ser altas o suficiente para causar queimas superficiais visíveis; porém, em determinadas condições, as temperaturas de retificação podem ultrapassar a temperatura de têmpera do material, causando uma redução na dureza superficial da peça retificada (amolecimento).

3.4.2 Desvio de Circularidade

Semelhante ao comportamento apresentado para a rugosidade superficial, o menor desvio de circularidade foi obtido para as técnicas HMQL+MQL à vazão de 120 mL/h (2,25 μm) seguido pelas técnicas abundante F (2,35 μm), HMQL+WCJ às vazões de 60 mL/h (2,51

μm) e 30 mL/h (3,64 μm) e PMQL+WCJ às vazões de 120 mL/h (2,64 μm), 60 mL/h (2,79 μm) e 30 mL/h (3,95 μm). A técnica de HMQL+WCJ superou a técnica de PMQL+MQL em 16,36; 7,38 e 7,85% às vazões respectivamente de 120, 60 e 30 mL/h. Quando comparada à técnica abundante F, a técnica HMQL+WCJ à vazão de 120 mL/h apresentou um desvio de circularidade matematicamente igual (comprovado pelo desvio padrão).

Kwak (2005) descreve que o desvio de circularidade é causado principalmente por: fixação do corpo de prova, desbalanceamento do rebolo, rigidez da máquina-ferramenta e deformação elástica do corpo de prova. A deformação elástica da peça está diretamente relacionada à força de corte e às expansões térmicas, aumentando sua intensidade com a perda da afiação da ferramenta e parâmetros de corte inadequados, como a técnica de lubrificação. Deste modo, além da técnica de lubrificação, todos os parâmetros de corte aplicados para cada teste experimental no presente estudo foram iguais.

Neste sentido, a maior eficiência na remoção de material ocorreu nas técnicas HMQL+WCJ e abundante F que estão relacionados a maior afiação do rebolo e menor empastamento da superfície de corte do rebolo e consequentemente menor força de corte e desvio de circularidade. Além disso, a expansão térmica excessiva da peça dificulta a precisão do processo de retificação (Silva et al., 2013). Maior capacidade de resfriamento do método é fundamental para evitar expansões térmicas excessivas e diminuir o desvio de forma (circularidade). Com base nisso, a adição de água empregada no processo de retificação com a técnica de HMQL+WCJ promove a evaporação da água por conta das altas temperaturas na zona de corte, o que leva a uma grande dissipação de calor e melhora a capacidade refrigerante da técnica de HMQL+WCJ em comparação com a técnica de PMQL+WCJ. Neste sentido, a água melhora a capacidade de refrigeração da técnica de lubrificação e consequentemente o desvio de circularidade. Segundo Sato et al. (2020), este fato está relacionado à maior capacidade de resfriamento que é proporcionada pela adição de água e mantém a temperatura controlada. Essa capacidade de resfriamento é responsável por controlar e minimizar a distorção da ferramenta (Debnath et al., 2014) causada pela quantidade excessiva de energia gerada no processo de retificação e mantém a precisão dimensional da peça (Guo et al., 2007).

De acordo com a literatura (BIANCHI et al., 2018b; GARCIA et al., 2020; YOSHIMURA et al., 2005) e pelos resultados apresentados neste trabalho, a aplicação da técnica de MQL com adição de água e WCJ pode ser relatada como um método de lubrificação alternativo viável e com potencial ecoeficiente para substituir a técnica de convencional abundante amplamente utilizada na indústria de manufatura. Essa técnica não só

tem potencial para tornar a produção mais limpa e ecológica, mas também para manter os parâmetros de qualidade e precisão da demanda global de projeto (HOSEINI et al., 2019; GHARAEI et al., 2019).

3.4.3 Relação G

Segundo Rodriguez et al. (2019), a relação G é um parâmetro usual para avaliar a eficiência da ferramenta de corte e o desempenho do desgaste da ferramenta.

Conforme esperado, o comportamento da relação G seguiu a tendência apresentada nos resultados obtidos para rugosidade superficial e desvio de circularidade. A técnica HMQL+WCJ à vazão de 120 mL/h superou a técnica abundante F, seguida pelas técnicas de HMQL+WCJ às vazões de 60 e 30 mL/h e a técnica PMQL+WCJ às vazões de 120, 60 e 30 mL/h. O desempenho da relação G da técnica HMQL+WCJ foi 28,24, 42,84 e 31,44% maior respectivamente em comparação com técnica de PMQL+WCJ às vazões de 120, 60 e 30 mL/h. Além disso, a relação G da técnica de HMQL+WCJ a 120 mL/h foi 10,79% maior em comparação com o resultado obtido com a aplicação da técnica abundante F.

Rodriguez et al. (2019) relatam que o desgaste do rebolo ocorre principalmente pelo desprendimento do grão do ligante, fratura do grão e desgaste do grão. Altas temperaturas causam a redução da resistência dos grãos abrasivos e do ligante, aumentando o desgaste do rebolo por desprendimento do grão (DE MARTINI FERNANDES et al., 2018). Um rebolo afiado (com alta protrusão de grão e grande densidade ativa de grão na superfície de corte) pode atingir maior taxa de remoção de material e menor força de corte distribuída em um maior número ativo de grãos, o que minimiza a ocorrência de desprendimento de grão por aderência e fratura (RODRIGUEZ et al., 2020). As técnicas de HMQL+WCJ e abundante F produziram menor empastamento na superfície de corte do rebolo, que produziu menor força de retificação, maior taxa ativa de remoção de material e afiação do rebolo e, portanto, maior relação G. O desempenho da técnica de PMQL+WCJ foi evidentemente inferior ao da técnica de HMQL+WCJ.

De acordo com Oliveira et al. (2009), a aplicação de WCJ é empregada para diminuir a ocorrência de empastamento da superfície de corte do rebolo que é caracterizado como um dos principais gargalos para uma maior aplicação da técnica MQL na indústria metal mecânica. Ademais, pode ser visto que esta técnica junto com a adição de água pode aumentar substancialmente a razão G e no caso da técnica HMQL+WCJ à vazão de 120 mL/h supera a técnica abundante F. Esses resultados estão em convergência com trabalhos anteriores que

estudaram ambas as técnicas para diversas aplicações, mostrando a eficácia do WCJ na redução do fenômeno de empastamento e a adição de água no aumento da capacidade de lubrificarrefrigeração (OLIVEIRA et al., 2012 ; RODRIGUEZ et al., 2019; GARCIA et al., 2020) a fim de aumentar a eficiência e sustentabilidade do processo.

De fato, a relação G e a potência consumida estão intimamente relacionadas com a eficiência do processo de retificação, ou seja, a técnica de HMQL+WCJ retifica peças com desempenho pelo menos 28,24% maior em comparação com a técnica de PMQL+WCJ e 10,79% maior em relação à técnica abundante F, ou seja, reduzindo drasticamente o tempo de dressagem e o volume de ferramenta consumido no processo de retificação. Isso contribui expressivamente para a redução dos custos de fabricação e aumento da eficiência do processo.

A relação G aumentou com a adição de água na retificação com o MQL para todos os métodos de lubrificarrefrigeração investigados neste trabalho, uma vez que para todas as vazões de fluido testadas, os testes sob à aplicação de HMQL teve melhor desempenho do que sob à aplicação de da técnica de PMQL. A técnica HMQL+WCJ superou o método abundante F, comprovando a eficiência dessa técnica em alternativa às convencionais e, assim, justificando seu emprego na indústria de transformação mecânica (GIRI & MASANTA, 2018; LOPES et al., 2019e). Além disso, os danos ambientais, os riscos à saúde dos operadores e os custos com ferramentas podem ser substancialmente mitigados.

3.4.4 Potência consumida, energia consumida e CO₂ gerado durante o processo de retificação

O comportamento da potência consumida foi semelhante à relação G, rugosidade superficial e desvio de forma (circularidade). O melhor desempenho foi obtido para a técnica de HMQL+WCJ à vazão de 120 mL/h (294,74 W) seguido pela técnica abundante F (298,84 W), técnica HMQL+WCJ às vazões de 60 mL/h (310,60 W) e 30 mL/h (325,64 W) e técnica de PMQL+WCJ às vazões de 120 mL/h (305,05 W), 60 mL/h (321,30 W) e 30 mL/h (333,85 W). A técnica de HMQL+WCJ superou a técnica de PMQL+MQL em 3,50, 3,44 e 2,52% às vazões de respectivamente 30, 60 e 120 mL/h. Quando comparada à técnica abundante F, a técnica de HMQL+WCJ à vazão de 120 mL/h apresentou consumo de potência matematicamente semelhante (comprovado pelo desvio padrão).

Segundo Bianchi et al. (2018c), a menor capacidade de lubrificação da técnica lubrificarrefrigerante resulta em forças de retificação mais altas e, conseqüentemente, é necessária mais potência para remover o material da peça. Outro parâmetro importante que aumenta com forças mais altas é a temperatura. Temperaturas mais altas levam à diminuição do limite de

tensão de escoamento do material na região de corte e então a ductilidade do material nesta região aumenta. A maior ductilidade dos cavacos aumenta o fenômeno de adesão na superfície ativa de corte do rebolo e, portanto, o fenômeno de empastamento é maior. É evidente que a técnica de HMQL+WCJ superou o PMQL+WCJ devido à capacidade refrigerante superior que a adição de água promoveu com a sua evaporação durante o processo de retificação o que resulta em remoção de grande quantidade de calor da zona de corte. Com base nisso, a técnica de lubrificação está diretamente relacionada com a potência de retificação consumida nos ensaios devido ao fato de que a maior potência de retificação é decorrente do maior atrito na zona de contato peça-ferramenta. Oliveira et al. (2012) descrevem que o fenômeno de empastamento na superfície ativa de corte do rebolo aumenta o fenômeno de *ploughing* e *rubbing* entre os cavacos alojados nos poros e a superfície retificada, resultando em não remoção de material, maior atrito e consequentemente maior potência consumida na retificação.

Na retificação com MQL, as gotas de fluido de corte que são pulverizadas na superfície ativa de corte do rebolo geram uma camada de filme lubrificante cuja espessura aumenta com o aumento da vazão de 30 para 120 mL/h. A maior quantidade de óleo melhora a capacidade de lubrificação e reduz o atrito na interface rebolo-peça. Isso explica a menor potência consumida nos ensaios com maior volume de óleo para técnicas de MQL. Segundo Barczak et al. (2010), para ensaios de retificação de vários tipos de aço com rebolo convencional de óxido de alumínio, a retificação com MQL produziu menor força de corte em comparação com a retificação a seco e abundante. Os autores correlacionaram esses resultados ao efeito hidrodinâmico da técnica MQL que melhora a capacidade lubrificante dessa técnica, devido ao fato de que o fluido em alta pressão é capaz de romper a barreira rotativa de ar formada ao redor do rebolo (Bianchi et al., 2018a). Segundo Hafenbraedl & Malkin (2000), a técnica de MQL melhora a eficiência da lubrificação, o que reduz potência consumida, a energia específica a um nível de desempenho semelhante ou superior ao obtido pela aplicação convencional de fluido de corte com óleo solúvel (concentração de 5 % e vazão de 5,3 L/min), além de minimizar substancialmente o desgaste da ferramenta.

Sinot et al. (2006) relataram que o uso de WCJ com aplicação convencional de fluido de corte resultou em maior potência consumida em 30 a 50% devido ao choque entre o fluxo de ar e a superfície do rebolo, funcionando como uma quebra hidráulica para o rebolo. Por outro lado, Javaroni et al. (2020b) afirmam que o WCJ diminuiu a potência de retificação, demonstrando que o efeito de quebra hidráulica não foi significativo, bem como mostrado para o presente trabalho.

Segundo Oliveira et al. (2009), o consumo de energia nas operações de usinagem não tem chamado a atenção na indústria de transformação porque os custos com eletricidade são muito inferiores aos custos com material, mão de obra, ferramentas de corte e fluidos. No entanto, os autores afirmam que esse tema se tornou relevante devido ao aumento da demanda mundial por eletricidade e ao aquecimento global.

De acordo com a Agência Europeia do Ambiente (2018), a intensidade de emissão de CO₂ relacionada com a geração de eletricidade é de 295,8 g CO₂/kWh. A pegada de carbono em termos de energia consumida durante o processo de retificação gerada pela técnica HMQL+W CJ à vazão de 120 mL/h é ligeiramente inferior à gerada pela técnica abundante F. Quando se considera o impacto global, a técnica de HMQL+W CJ à vazão de 120 mL/h é amplamente mais ecológica, pois emprega apenas 0,2% do volume de fluido da técnica abundante F e apresentou desempenho semelhante em termos de acabamento superficial, desvio de forma e potência consumida e maior desempenho em termos de eficiência da ferramenta em comparação com a técnica abundante F. Isso confirma a ecoeficiência da técnica de HMQL+W CJ na vazão de 120 mL/h e suas vantagens em relação à menor geração de gases de efeito estufa durante o processo de retificação. Essa técnica é mais ecologicamente correta, mitigando também os efeitos na saúde do operador e nos custos de fabricação. Neste aspecto, a técnica de HMQL+W CJ é um potencial método alternativo ecologicamente correto para substituir a técnica abundante F e assim mitigar a geração de CO₂ e consequentemente o aquecimento global. Além disso, este é um passo importante para a ampliação da aplicação do MQL na indústria, pois quando comparado aos resultados apresentados por Garcia et al. (2020) para consumo de energia, para as condições estudadas no presente trabalho a técnica de HMQL+W CJ à vazão de 120 mL/h apresentou consumo de energia semelhante à técnica abundante F e os autores citados mostraram um aumento de 32% na potência de corte para MQL com adição de água em comparação ao método convencional.

3.4.5 Emissão acústica

De acordo com Wang et al. (2001), este parâmetro está relacionado com os parâmetros de corte e a integridade da superfície da peça e da superfície de corte do rebolo. A emissão acústica é basicamente resultado de atrito, deformação (plástica e elástica) e remoção de cavacos. O melhor desempenho foi obtido para a técnica de HMQL+MQL à vazão de 120 mL/h (0,391 V) que foi matematicamente semelhante ao obtido para a técnica abundante F (0,392 V) seguido pela técnica de HMQL+W CJ às vazões de 60 mL/h (0,486 V) e 30 mL/h (0,512 V) e

técnica de PMQL+W CJ a 120 mL/h (0,435 V), 60 mL/h (0,542 V) e 30 mL/h (0,567 V). A técnica de HMQL+W CJ superou a técnica de PMQL+MQL em 10,11, 10,33 e 9,70% respectivamente às vazões de 120, 60 e 30 mL/h. Quando comparada à técnica abundante F, a técnica de HMQL+W CJ à vazão de 120 mL/h apresentou valores de emissão acústica 0,26% menor.

Os resultados de emissão acústica mostraram a mesma tendência para os demais resultados obtidos nos ensaios e uma convergência relacionada à qualidade e integridade da superfície, eficiência da ferramenta e consumo de energia. A técnica de HMQL+W CJ à maior vazão testada (120 mL/h) mostrou desempenho semelhante à técnica abundante F. Os maiores valores de emissão acústica foram registrados durante a retificação sob a aplicação da técnica de PMQL+W CJ. Oliveira et al. (2012) relatam que quando a ocorrência de empastamento na superfície de corte do rebolo é reduzida, valores de emissão acústica menores são gerados. Por outro lado, a técnica de PMQL+W CJ implicou em maior empastamento da superfície de corte do rebolo o que aumenta os valores de emissão acústica.

Nesta condição, a deformação plástica e atrito são causados pelos cavacos aderidos na superfície de corte do rebolo o que aumenta os valores emissão acústica gerados. Sadeghi et al. (2010) inferem que a lubrificação insuficiente na zona de corte aumenta a deformação plástica e o atrito. Não só os valores de emissão acústica são aumentados pelo riscamento gerado pelos cavacos aderidos na superfície de corte do rebolo em contato com a superfície da peça, mas também a rugosidade superficial, o desvio de circularidade e o desgaste da ferramenta. Além disso, o fato da técnica de HMQL+W CJ à vazão de 120 mL/h apresentar valores de emissão acústica semelhantes aos valores obtidos pela técnica abundante F mostra que os sinais foram adequadamente amostrados para evitar todo o ruído que poderia ocorrer pela injeção de ar (OLIVEIRA et al ., 2012).

Segundo Bianchi et al. (2018a), vários trabalhos têm mostrado que a técnica MQL pode superar a técnica convencional de lubrificarrefrigeração em determinadas condições de usinagem. De acordo com Lindeke et al. (1991) e Sadeghi et al. (2010), esse desempenho superior está relacionado às características de lubrificação do óleo aplicado na técnica de MQL que pode reduzir o coeficiente de atrito na interface ferramenta-peça. Segundo Garcia et al. (2020) e em contraste a esses autores, a técnica de PMQL leva a um maior empastamento na superfície ativa de corte do rebolo e conseqüentemente valor de emissão acústica superior ao da técnica convencional abundante. Os autores explicam que a melhor lubrificação não é suficiente para minimizar as deformações plásticas e atrito superiores na interface de corte, decorrentes do

maior empastamento na superfície de corte do rebolo. Como apresentado, a técnica de PMQL gerou resultados piores em comparação à técnica abundante F.

Garcia et al. (2020) também relatam que os valores mais altos de emissão acústica foram obtidos na técnica de MQL com água na retificação do aço SAE 52100 com rebolo de CBN. Eles explicaram isso pela diminuição da capacidade lubrificante da técnica de MQL com adição de água que promoveu um efeito mais pronunciado para a emissão acústica do que o fenômeno de *ploughing* e *rubbing* pela ocorrência do fenômeno de empastamento na superfície de corte do rebolo. A ação lubrificante superou o efeito de lavagem da superfície do rebolo para minimizar o empastamento e, conseqüentemente, a geração de emissão acústica. Esse efeito contrasta com os resultados reportados por Oliveira et al. (2012). Estes autores relataram que conforme ocorre o maior empastamento da superfície de corte do rebolo, maior são os valores de emissão acústica medidos que converge com os resultados obtidos neste trabalho e denotando que para as condições estudadas os efeitos do empastamento apresentam maior influência na geração de emissão acústica, apesar de maior lubrificação provida pelo óleo puro.

3.5 Conclusão

Apresenta os principais resultados obtidos acerca do processo de retificação do aço ABNT 4340 temperado e revenido com rebolo convencional de óxido de alumínio, utilizando lubrificação convencional e a técnica de MQL com óleo puro e híbrida com diluição a diferentes vazões com limpeza da superfície de corte do rebolo.

4 CITAÇÕES DE ARTIGOS

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

RODRIGUEZ, R.L., LOPES, J.C., GARCIA, M.V., RIBEIRO, F.S., DINIZ, A.E., DE ANGELO SANCHEZ, L.E., DE MELLO, H.J., DE AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. Application of hybrid eco-friendly MQL+ WCJ technique in AISI 4340 steel grinding for cleaner and greener production. **J Clean Prod** 283:124670 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124670>

SATO, B.K., LOPES, J.C., RODRIGUEZ, R.L. 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. **Int J Adv Manuf Technol** 113, 1163–1172 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06650-1>

RIBEIRO, F.S.F., LOPES, J.C., RODRIGUEZ, R.L. et al. Novel performance assessment of interrupted grinding process using aluminum oxide wheel with resinoid bond. **Int J Adv Manuf Technol** 117, 2701–2713 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07757-1>

SATO, B.K., LOPES, J.C., RODRIGUEZ, R.L. et al. Novel comparison concept between CBN and Al₂O₃ grinding process for eco-friendly production. **J Clean Prod** 330:129673 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129673>

NETO, L.M.G., RODRIGUEZ, R.L., LOPES, J.C. et al. Application of optimized lubrication technique in through-feed centerless grinding process of bearing steel SAE 52100. **Int J Adv Manuf Technol** 120, 515–526 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08686-3>

DE SOUZA, H.A., LUIZETE, C.E., SATO, B.K. et al. Advances in the interrupted surface manufacturing by applying different lubrication techniques in the grinding process. **Int J Adv Manuf Technol** 121, 5387–5399 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09578-2>

SATO, B.K., LOPES, J.C., RIBEIRO, F.S.F. et al. Evaluating the effect of MQL technique in grinding VP50IM steel with green carbide wheel. **Int J Adv Manuf Technol** 121, 7287–7294 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09813-w>

DOMINGUES, B.B., RODRIGUEZ, R.L., SOUZA, G.G. et al. Eco-friendly thinking toward mitigating the greenhouse effect applied to the alumina grinding process. **Int J Adv Manuf Technol** (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10598-1>

DANIEL, D.M., MORAES, D.L.D., GARCIA, M.V. et al. Application of MQL with cooled air and wheel cleaning jet for greener grinding process. **Int J Adv Manuf Technol** (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10712-3>

NETO, L.M.G., RODRIGUEZ, R.L., LOPES, J.C. et al. Evaluating the optimized lubricating technique for various cutting conditions in through-feed centerless grinding process. **Int J Adv Manuf Technol** 125, 3465–3473 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10933-0>

5 CONCLUSÃO

Por meio dos resultados obtidos da retificação do aço AISI 4340 sob a aplicação das sete diferentes condições de lubrificação com a utilização de rebolo convencional de óxido de alumínio branco, pode-se concluir que:

- Independentemente da vazão, a técnica de HMQL+WCJ superou o PMQL+WCJ e resultou em menor rugosidade superficial e forma desvio (circularidade). Além disso, a técnica HMQL+WCJ a 120 mL/h mostrou resultados semelhantes à técnica convencional F em termos de acabamento superficial, consumo de energia e geração de CO₂ durante o processo e superou a técnica convencional em termos de eficácia da ferramenta, eficiência denotada pela razão G. Esses resultados e a maior eficiência da técnica HMQL+WCJ suportam a viabilidade desta técnica de lubrificação ecoeficiente. A microdureza dos corpos de prova testados não apresentou variação significativa na superfície que indicasse dano térmico à microestrutura (queima de retificação), independente da técnica aplicada.
- A aplicação da técnica de HMQL implica em menor viscosidade do fluido pela adição de água, o que diminui a viscosidade do fluido em relação à técnica de PMQL e, conseqüentemente, facilita a penetração de fluido na zona de corte que proporciona o efeito de lubrificação. Em outras palavras, quando o óleo é diluído em água, o efeito de lubrificação da técnica HMQL é aumentado. De fato, a adição de água está relacionada a uma maior capacidade de resfriamento que está diretamente relacionada a uma maior remoção de calor da zona de corte e conseqüentemente temperaturas mais baixas.
- Pode-se observar que as técnicas F e HMQL+WCJ geraram menor empastamento na superfície do rebolo devido a maior capacidade de resfriamento desta técnica, o que mantém a afiação do rebolo, densidade de grão ativo e, conseqüentemente, melhor integridade superficial e acabamento superficial. A técnica HMQL+WCJ resultou na diminuição dos valores de rugosidade Ra em 24,1%, 30,5%, 36,5% em relação a PMQL+WCJ a respectivamente 30, 60 e 120 mL/h. O desvio de circularidade está intimamente relacionado com a afiação do rebolo, influencia diretamente nas forças de corte e, conseqüentemente, na potência de retificação. Forças de retificação mais baixas indicam menor deformação plástica da peça, conforme evidenciado por

imagens MEV das superfícies retificadas da peça e, portanto, menor desvio de forma.

- A relação G e a potência de corte estão relacionadas com a eficiência da retificação, ou seja, a técnica HMQL+WCJ proporciona a retificação de peças com desempenho pelo menos 28,2% maior em comparação com PMQL+WCJ e 10,8% maior em relação à técnica F. Isto reduz drasticamente o tempo de dressagem e o volume consumido de ferramenta no processo de retificação, expressando a ecoeficiência da técnica HMQL+WCJ em seu papel de reduzir custos de fabricação e aumentar a eficiência do processo.
- A geração de carbono e energia consumida durante o processo de retificação gerada pela técnica HMQL+WCJ a 120 mL/h foi semelhante à técnica convencional F. Quando se considera o impacto global, a técnica HMQL+WCJ a 120 mL/h é substancialmente mais ecologicamente correta, pois emprega apenas 0,2% do volume de óleo da técnica convencional e apresentou desempenho semelhante em termos de qualidade de acabamento, desvio de forma e potência consumida na retificação e maior desempenho em termos de eficiência da ferramenta. Isso confirma a ecoeficiência da técnica HMQL+WCJ à vazão de 120 mL/h e suas vantagens em relação à menor geração de gases de efeito estufa durante o processo de retificação.
- Os resultados da aplicação da técnica HMQL+WCJ mostram a grande viabilidade industrial desta técnica. As limitações causadas pelo fenômeno de empastamento no MQL tradicional foram substancialmente reduzidas pela aplicação de água no HMQL+WCJ, que apresentou desempenho semelhante à técnica convencional. No entanto, melhorias na eficiência da técnica HMQL+WCJ ainda são necessárias para que esse método de lubrificarrefrigeração supere a técnica de convencional abundante, principalmente na qualidade da superfície, consumindo menos energia e, consequentemente, reduzindo a pegada de carbono do processo.

Levando em consideração todos esses aspectos apresentados no trabalho, pode-se concluir que a técnica HMQL+WCJ apresenta uma aplicação mais ecologicamente correta e sustentável dos fluidos de corte de forma a gerar um processo de retificação mais verde e limpo, mitigar a geração de CO_2 e, consequentemente, dos gases de efeito estufa e aquecimento global.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o conhecimento adquirido durante o desenvolvimento da pesquisa segue algumas sugestões de trabalhos futuros para expansão do conhecimento acerca da aplicação da técnica de MQL na retificação com rebolo convencional de óxido de alumínio.

- Avaliar a criogenia na técnica de MQL para retificação com rebolo de óxido de alumínio e compará-la com a aplicação de MQL à temperatura ambiente.
- Realizar um estudo acerca das temperaturas no processo de retificação para diferentes condições de aplicação da técnica de MQL.
- Aplicar fluidos na técnica de MQL com maior potencial sustentável, como óleos vegetais e nano fluidos.
- Testar e desenvolver uma ferramenta de corte mais eficiência do ponto de vista de aplicação de fluido lubrificador com canal para aplicação de fluido de corte integrado à estrutura do rebolo.

7 REFERÊNCIAS

- Barczak, L.M., Batako, A.D.L., Morgan, M.N., 2010. A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 50, 977e985. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.07.005>.
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., Bahadori, A., 2013. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. **J. Clean. Prod.** <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>
- Bianchi, E.C., Rodriguez, R.L., Hildebrandt, R.A., Lopes, J.C., de Mello, H.J., da Silva, R.B., de Aguiar, P.R., 2018a. Plunge cylindrical grinding with the minimum quantity lubrication coolant technique assisted with wheel cleaning system. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 95, 2907–2916. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1396-5>
- Bianchi, E.C., Sato, B.K., Sales, A.R., Lopes, J.C., de Mello, H.J., de Angelo Sanchez, L.E., Diniz, A.E., Aguiar, P.R., 2018b. Evaluating the effect of the compressed air wheel cleaning in grinding the AISI 4340 steel with CBN and MQL with water. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 95, 2855–2864. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1433-4>
- Brinksmeier, E., Meyer, D., Huesmann-Cordes, A.G., Herrmann, C., 2015. Metalworking fluids - Mechanisms and performance. **CIRP Ann. - Manuf. Technol.** 64, 605–628. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.003>
- Bui, M., Adjiman, C.S., Bardow, A., Anthony, E.J., Boston, A., Brown, S., Fennell, P.S., Fuss, S., Galindo, A., Hackett, L.A., Hallett, J.P., Herzog, H.J., Jackson, G., Kemper, J., Krevor, S., Maitland, G.C., Matuszewski, M., Metcalfe, I.S., Petit, C., Puxty, G., Reimer, J., Reiner, D.M., Rubin, E.S., Scott, S.A., Shah, N., Smit, B., Trusler, J.P.M., Webley, P., Wilcox, J., Mac Dowell, N., 2018. Carbon capture and storage (CCS): The way forward. **Energy Environ. Sci.** <https://doi.org/10.1039/c7ee02342a>
- Czapiewski, W., 2017. Methods of minimalization of coolant flow rate in the grinding processes: the Review. **J Mech Energy Eng** 1 (41), 117e122.
- Davim, J.P. (ed) (2008) Machining: fundamentals and recent advances. **Springer Science & Business Media**, Berlin.
- de Martini Fernandes, L., Lopes, J.C., Volpato, R.S., Diniz, A.E., de Oliveira, R.F.M., de Aguiar, P.R., et al., 2018. Comparative analysis of two CBN grinding wheels performance in nodular cast iron plunge grinding. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 98, 237e249. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2133-4>.

- De Mello Belentani, R., Júnior, H.F., Canarim, R.C., Diniz, A.E., Hassui, A., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., Belentani, R. de M., Funes Júnior, H., Canarim, R.C., Diniz, A.E., Hassui, A., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2014. Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel. **Mater. Res.** 17, 88–96. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000165>
- de Moraes, D.L., Garcia, M.V., Lopes, J.C., Ribeiro, F.S.F., de Angelo Sanchez, L.E., Foschini, C.R., de Mello, H.J., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2019. Performance of SAE 52100 steel grinding using MQL technique with pure and diluted oil. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 105, 4211–4223. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04582-5>
- Debnath, S., Reddy, M.M., Yi, Q.S., 2014. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **J. Clean. Prod.** 83, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.071>
- Debnath, S., Reddy, M.M., Yi, Q.S., 2014. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **J. Clean. Prod.** 83, 33e47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.071>.
- Duflou, J.R., Sutherland, J.W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Hauschild, M., Kellens, K., 2012. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. **CIRP Ann. - Manuf. Technol.** 61, 587–609. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.002>
- Fang, K., Uhan, N., Zhao, F., Sutherland, J.W., 2011. A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction, in: **Journal of Manufacturing Systems**. Elsevier, pp. 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.08.004>
- Garcia, M.V., Lopes, J.C., Diniz, A.E., Rodrigues, A.R., Volpato, R.S., Sanchez, L.E. de A., de Mello, H.J., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2020. Grinding performance of bearing steel using MQL under different dilutions and wheel cleaning for green manufacture. **J. Clean. Prod.** 257, 120376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120376>
- Giri, B.C., Masanta, M., 2018. Developing a closed-loop supply chain model with price and quality dependent demand and learning in production in a stochastic environment. **Int. J. Syst. Sci.: Operations & Logistics** 1e17.
- Hadad, M., 2015. An experimental investigation of the effects of machining parameters on environmentally friendly grinding process. **J. Clean. Prod.** 108, 217–231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.092>

- Hafenbraedl, D., Malkin, S., 2000. Environmentally-conscious minimum quantity lubrication (MQL) for internal cylindrical grinding. **Transactions of NAMRI/SME** 28, 149e154.
- International Energy Agency (IEA), 2019. World Energy Outlook. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>. (Acessado em 20 de Abril de 2020).
- International Panel IPCC Special Report, 2019. Global Warming of 1.5°C. <https://www.ipcc.ch/sr15/>. (Acessado em 20 de Abril de 2020).
- Javaroni, R.L., Lopes, J.C., Garcia, M.V. et al. 2020a. Grinding hardened steel using MQL associated with cleaning system and cBN wheel. **Int J Adv Manuf Technol.** 107, 2065–2080. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05169-1>
- Javaroni, R.L., Lopes, J.C., Diniz, A.E., Garcia, M.V., Ribeiro, F.S.F., Tavares, A.B., Talon, A.G., Sanchez, L.E.A., Mello, H.J., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2020b. Improvement in the grinding process using the MQL technique with cooled wheel cleaning jet. **Tribol. Int.** 152, 106512. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106512>.
- Javaroni, R.L., Lopes, J.C., Sato, B.K., Sanchez, L.E.A.A., Mello, H.J., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2019. Minimum quantity of lubrication (MQL) as an eco-friendly alternative to the cutting fluids in advanced ceramics grinding. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 103, 2809–2819. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03697-z>
- Jawahir, I.S., Attia, H., Biermann, D., Duflou, J., Klocke, F., Meyer, D., Newman, S.T., Pusavec, F., Putz, M., Rech, J., Schulze, V., Umbrello, D., 2016. Cryogenic manufacturing processes. **CIRP Ann. - Manuf. Technol.** 65, 713–736. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.007>
- Jawahir, I.S., Brinksmeier, E., M'Saoubi, R., Aspinwall, D.K., Outeiro, J.C., Meyer, D., Umbrello, D., Jayal, A.D., 2011. Surface integrity in material removal processes: recent advances. **CIRP Ann. - Manuf. Technol.** 60 (2), 603e626.
- Krolczyk, G.M., Maruda, R.W., Krolczyk, J.B., Nieslony, P., Wojciechowski, S., Legutko, S., 2018. Parametric and nonparametric description of the surface topography in the dry and MQCL cutting conditions. **Measurement** 121, 225e239. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.052>.
- Krolczyk, G.M., Maruda, R.W., Krolczyk, J.B., Wojciechowski, S., Mia, M., Nieslony, P., Budzik, G., 2019. Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production a review. **J. Clean. Prod.** 218, 601e615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.017>.

- Kwak, J., 2005. Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. **Int. J. Mach. Tool Manufact.** 45 (3), 327e334. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.08.007>.
- Li, C., Zhang, Q., Wang, S., Jia, D., Zhang, D., Zhang, Y., Zhang, X., 2015. Useful fluid flow and flow rate in grinding: an experimental verification. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 81, 785e794.
- Li, W., Winter, M., Kara, S., Herrmann, C., 2012. Eco-efficiency of manufacturing processes: A grinding case. **CIRP Ann. - Manuf. Technol.** 61, 59–62. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.029>
- Lindeke, R., Schoeing, J.R.F., Khan, A., et al., 1991. Cool your jets. **Cut. Tool. Eng.** 31e37.
- Lopes, J.C., Garcia, M.V., Volpato, R.S., de Mello, H.J., Ribeiro, F.S.F., de Angelo Sanchez, L.E., de Oliveira Rocha, K., Neto, L.D., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2019. Application of MQL technique using TiO₂ nanoparticles compared to MQL simultaneous to the grinding wheel cleaning jet. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04760-5>
- Lopes, J.C., Ventura, C.E.H., Rodriguez, R.L., Talon, A.G., Volpato, R.S., Sato, B.K., de Mello, H.J., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2018. Application of minimum quantity lubrication with addition of water in the grinding of alumina. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 97, 1951e1959. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2085-8>.
- Marinescu, I.D., Rowe, W.B., Dimitrov, B., Inasaki, I. Tribology of Abrasive Machining Processes. **Norwich: William Andrew Inc.**, 2004.
- Marinescu, I.D., Rowe, W.B., Dimitrov, B., Ohmori, H., 2013. Tribology of Abrasive Machining Processes. **Elsevier**. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-67070-2>.
- Maruda, R.W., Krolczyk, G.M., Nieslony, P., Wojciechowski, S., Michalski, M., Legutko, S., 2016. The influence of the cooling conditions on the cutting tool wear and the chip formation mechanism. **J. Manuf. Process.** 24, 107e115. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.006>.
- Maruda, R.W., Krolczyk, G.M., Wojciechowski, S., Powalka, B., Klos, S., Szczotkarz, N., Matuszak, M., Khanna, N., 2020. Evaluation of turning with different cooling-lubricating techniques in terms of surface integrity and tribologic properties. **Tribol. Int.** 106334, 106334. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106334>.
- Maruda, R.W., Krolczyk, G.M., Wojciechowski, S., Zak, K., Habrat, W., Nieslony, P., 2018. Effects of extreme pressure and anti-wear additives on surface topography and tool wear during MQCL turning of AISI 1045 steel. **J. Mech. Sci. Technol.** 32 (4), 1585e1591. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0313-7>.

- Maruda, R.W., Legutko, S., Krolczyk, G.M., Hloch, S., Michalski, M., 2015. An influence of active additives on the formation of selected indicators of the condition of the X10CrNi18-8 stainless steel surface layer in MQCL conditions. **Int. J. Surf. Sci. Eng.** 9, 452e465. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2015.072069>.
- Mia, M., Gupta, M.K., Lozano, J.A., Carou, D., Pimenov, D.Y., Krolczyk, G., Khan, A.M., Dhar, N.R., 2019. Multi-objective optimization and life cycle assessment of ecofriendly cryogenic N₂ assisted turning of Ti-6Al-4V. **J. Clean. Prod.** 210, 121e133.
- Mia, M., Razi, M.H., Ahmad, I., Mostafa, R., Rahman, S.M.S., Ahmed, D.H., et al., 2017. Effect of time-controlled MQL pulsing on surface roughness in hard turning by statistical analysis and artificial neural network. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 91 (9), 3211e3223. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9978-1>.
- Morgan, M.N., Jackson, A.R., Wu, H., Baines-Jones, V., Batako, A., Rowe, W.B., 2008. Optimisation of fluid application in grinding. **CIRP annals** 57 (1), 363e366.
- Oliveira, D. de J., Guermendi, L.G., Bianchi, E.C., Diniz, A.E., De Aguiar, P.R., Canarim, R.C., 2012. Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning. **J. Mater. Process. Technol.** 212, 2559–2568. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.019>
- Oliveira, J.F.G., Silva, E.J., Guo, C., Hashimoto, F., 2009. Industrial challenges in grinding. **CIRP Ann. - Manuf. Technol.** 58, 663e680. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.006>.
- Pervaiz, S., Kannan, S., Kishawy, H.A., 2018. An extensive review of the water consumption and cutting fluid based sustainability concerns in the metal cutting sector. **J. Clean. Prod.** <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.190>
- Rabiei, F., Rahimi, A.R., Hadad, M.J., Ashrafiyou, M., 2015. Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization. **J. Clean. Prod.** 86, 447–460. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.045>
- Rodriguez, R.L., Lopes, J.C., Hildebrandt, R.A., Perez, R.R.V., Diniz, A.E., de Ângelo Sanchez, L.E., Rodrigues, A.R., de Mello, H.J., de Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2019. Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface. **J. Mater. Process. Technol.** 271, 357–367. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.019>

- Sadeghi, M.H., Hadad, M.J., Tawakoli, T., Vesali, A., Emami, M., 2010. An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique. **Int. J. Material Form.** 3, 241e251. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0678-3>.
- Said, Z., Gupta, M., Hegab, H., Arora, N., Khan, A.M., Jamil, M., Bellos, E., 2019. A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 105, 2057–2086. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04382-x>
- Sanchez, J.A., Pombo, I., Alberdi, R., Izquierdo, B., Ortega, N., Plaza, S., Martinez-Toledano, J., 2010. Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology. **J. Clean. Prod.** 18, 1840–1849. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2010.07.002>
- Sato, B.K., Lopes, J.C., Diniz, A.E., Rodrigues, A.R., de Mello, H.J., Sanchez, L.E.A., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2020. Toward sustainable grinding using minimum quantity lubrication technique with diluted oil and simultaneous wheel cleaning. **Tribol. Int.** 147, 106276. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106276>.
- Sen, B., Mia, M., Krolczyk, G.M., Mandal, U.K., Mondal, S.P., 2019. Eco-friendly cutting fluids in minimum quantity lubrication assisted machining: a review on the perception of sustainable manufacturing. **Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech** 1e32. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00158-6>.
- Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T., 2012. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 57, 83–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.02.002>
- Silva, L.R., Correa, E.C.S.S., Brandao, J.R., de Avila, R.F., 2013. Environmentally friendly manufacturing: behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **J. Clean. Prod.** 256, 103287 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.033>.
- Silva, L.R., Corrêa, E.C.S.S., Brandão, J.R., de Ávila, R.F., 2013. Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **J. Clean. Prod.** <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.033>
- Sinot, O., Chevrier, P., Padilla, P., 2006. Experimental simulation of the efficiency of high speed grinding wheel cleaning. **Int. J. Mach. Tool Manufact.** 46 (2), 170e175. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.04.016>.
- Stachurski, W., Sawicki, J., Krupanek, K., Naldony, K., 2019. Numerical analysis of coolant flow in the grinding zone. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 104, 1999e2012.

- Sun, Z., Li, L., 2014. Potential capability estimation for real time electricity demand response of sustainable manufacturing systems using Markov Decision Process. **J. Clean. Prod.** 65, 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.033>
- Thakur, D.G., Ramamoorthy, B., Vijayaraghavan, L., 2010. Investigation and optimization of lubrication parameters in high speed turning of superalloy Inconel 718. **Int J Adv Manuf Technol.** 50, 471–478. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2538-1>
- Walker, T., 2013. **The MQL Handbook – A Guide to Machining With Minimum Quantity Lubrication.**[s.l.]. UnistInc.
- Wang, Y., Li, C., Zhang, Y., Yang, M., Zhang, X., Zhang, N., Dai, J., 2017. Experimental evaluation on tribological performance of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication grinding with different concentrations of Al₂O₃ nanofluids. **J. Clean. Prod.** 142, 3571–3583. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.110>
- Wang, Z., Willet, P., De Aguiar, P.R., et al., 2001. Neural network detection of grinding burn from acoustic emission. **Int JMach Tool Manuf** 41, 283e309.
- Wiedmann, T., Minx, J., Barrett, J., Wackernagel, M., 2006. Allocating ecological footprints to final consumption categories with inpuoutput analysis. **Ecol. Econ.** 56, 28e48.
- World Economic Forum, 2022. Reducing the carbon footprint of the manufacturing industry through data sharing. <https://www.weforum.org/impact/carbon-footprint-manufacturing-industry/>. (Acessado em 20 de Abril de 2023).
- Yoshimura, H., Itogawa, F., Nakamura, T., Niwa, K., 2005. Development of nozzle system for oil-on-water droplet metalworking fluid and its application to practical production line. **JSME Int J** 48 (4), 723e729. <https://doi.org/10.1299/jsmec.48.723>.
- Zhang, Y., Li, C., Yang, M., Jia, D., Wang, Y., Li, B., Hou, Y., Zhang, N., Wu, Q., 2016. Experimental evaluation of cooling performance by friction coefficient and specific friction energy in nanofluid minimum quantity lubrication grinding with different types of vegetable oil. **J. Clean. Prod.** 139, 685–705. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.073>