



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

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

JOSÉ CLAUDIO LOPES

**DESEMPENHO DA LUBRIRREFRIGERAÇÃO POR MQL E LIMPEZA DA
SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DE FERRO FUNDIDO
NODULAR**

BAURU

2022

JOSÉ CLAUDIO LOPES

**DESEMPENHO DA LUBRIRREFRIGERAÇÃO POR MQL E LIMPEZA DA
SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DE FERRO FUNDIDO
NODULAR**

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

Área de concentração: Processos de fabricação

Orientador:

Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Coorientador:

Prof. Dr. Luiz Eduardo De Angelo Sanchez

BAURU

2022

Lopes, José Claudio.

Desempenho da lubrificação por MQL e limpeza da superfície de corte do rebolo na retificação de ferro fundido nodular / José Claudio Lopes, 2022
36 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Coorientador: Luiz Eduardo De Angelo Sanchez

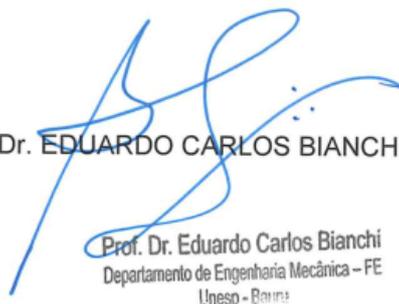
Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2022

1. Retificação. 2. Friabilidade. 3. Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI). 4. Sustentabilidade. 5. Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE JOSÉ CLAUDIO LOPES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 18 dias do mês de maio do ano de 2022, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de JOSÉ CLAUDIO LOPES, intitulada **DESEMPENHO DA LUBRIRREFRIGERAÇÃO POR MQL E LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Dr. HAMILTON JOSÉ DE MELLO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / FEB/UNESP/Bauru, Professor Associado JOAO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. GILSON EDUARDO TARRENTO (Participação Virtual) do(a) Tecnologia / Faculdade de Tecnologia de Botucatu, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: _____
_ APROVADO ____ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI



Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi
Departamento de Engenharia Mecânica - FE
Unesp - Bauru

Aos meus pais, José Antonio e Sonia, a minha irmã Amanda e a minha noiva Débora, por sempre me apoiarem nesta jornada. Outrossim, agradeço a todos do Departamento de Engenharia Mecânica – da Faculdade de Engenharia da UNESP, câmpus de Bauru, em especial meus orientadores, que sempre contribuíram com minha formação, pessoal e intelectual, e especialmente a todos envolvidos direta e indiretamente com o Laboratório de Usinagem por Abrasão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao que é eterno, pela força superior que nos rege. Muito obrigado Senhor meu Deus por sempre ouvir minhas orações, me guiar e iluminar a minha vida.

Agradeço profundamente ao meu pai José Antonio Lopes e a minha mãe Sonia Regina Batista Lopes por sempre incentivarem meus estudos, me ensinando a seguir em frente de cabeça erguida, superando as adversidades e criando estratégias para alcançar o objetivo sonhado. Eu sou muito grato por tudo que fizeram e pela educação que me proporcionaram.

Agradeço a minha irmã Amanda Regina Lopes por sempre estar ao meu lado.

Agradeço a minha amada noiva Débora Carolina Rodrigues Barbosa pelo apoio, companheirismo, paciência, carinho e incentivo que tem me dedicado a tantos anos. Certamente, foi através de toda essa parceria que eu pude me desenvolver e ter coragem nos momentos mais difíceis, no quais você sempre me incentivou e demonstrou grande confiança em todos os feitos da minha vida.

Expresso profunda gratidão ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi e ao meu coorientador Prof. Dr. Luiz Eduardo De Angelo Sanchez, pela confiança e oportunidades que sempre me propuseram. Além disso, sou muito grato pela fraterna amizade que levarei por toda vida, em especial por todo carinho, ensinamentos e conselhos que sempre me proporcionaram. Os senhores certamente mudaram a minha vida e com certeza me tornaram uma pessoa melhor. Muito obrigado.

A Prof. Me. Flávia Queiroz Costa, Prof. Dr. Luciano Monteiro Da Silva, Prof. Dr. Fábio Bossoi Vicente e Prof. Dr. Rubens Chinali Canarim por acreditarem em meu potencial e me apresentarem ao mundo da pesquisa científica, concedendo-me excelentes oportunidades de desenvolvimento pessoal e intelectual no começo dos meus estudos.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, câmpus Bauru, na pessoa do Coordenador Prof. Dr. Paulo José Paupitz Gonçalves.

Agradeço aos demais docentes da Faculdade de Engenharia de Bauru, notoriamente ao Prof. Dr. Cesar Renato Foschini, Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves, Prof. Dr. João Eduardo Guarnetti dos Santos, Prof. Dr. Luiz Daré Neto, Prof. Dr. Santiago Del Rio Oliveira e Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon, pelo apoio, amizade e confiança, bem como pelas conversas sempre esclarecedoras sobre os mais diversos assuntos.

Agradeço aos amigos e servidores técnico-administrativos da Faculdade de Engenharia de Bauru, de maneira muito especial os senhores Hamilton José de Mello, Hélio Aparecido de

Souza, José Marcelo Felix da Silva e Osmar Luis Martinelli, por todos os momentos de união, apoio, amizade e dedicação, não somente a esta pesquisa, mas por estarem presentes em toda minha trajetória na UNESP. Evidencio que sem o apoio dos senhores, não seria possível desenvolver minha pesquisa e tampouco realizar todas as produções intelectuais dos últimos anos. Expresso meus mais sinceros votos de estima a nossa amizade e companheirismo, pelos ensinamentos e conselhos que sempre me proporcionaram.

Agradeço a oportunidade de desenvolvimento pessoal e profissional concedido pelo Laboratório de Usinagem por Abrasão, principalmente pelas amizades que levarei por toda a vida, em especial aos alunos de graduação e pós-graduação: Anthony Gaspar Talon, Bruno Biondo Domingues, Bruno Kenta Sato, Fernando Sabino Fontequê Ribeiro, Lucas de Martini Fernandes, Mateus Vinícius Garcia, Rafael Lemes Rodriguez, Rafael Liberatti Javaroni, Rodrigo Ráfaga de Souza e todos os demais alunos e companheiros do LUA.

A Saint-Gobain - Surface Conditioning - Ceramic Materials na pessoa do Eng. Rodolfo Fischer Moreira de Oliveira por proporcionar a oportunidade de pesquisa conjunta ente empresa/universidade. Agradeço a dedicação, aos ensinamentos e momentos que pudemos passar juntos. Eu me sinto privilegiado de poder ter desenvolvido uma pesquisa em parceria com a Saint-Gobain, principalmente por todo conhecimento que pude adquirir através de nossas conversas e do conhecimento proporcionado por esta pesquisa.

Especial agradecimento ao Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues (EESC-USP) e Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz (UNICAMP) por sempre estarem dispostos a ajudar e contribuir intensamente com minha formação.

Ademais, ficam meus sinceros agradecimentos a todos que de forma direta ou indireta tenham contribuído com esta pesquisa e com a construção da minha vida acadêmica. Reitero meus mais sinceros agradecimentos àqueles que no decorrer desta jornada tenham me apoiado para a concepção e formação de um laboratório melhor, proporcionando sonhos e garantindo a formação de recursos humanos.

*“Faça o teu melhor, na condição que você tem,
enquanto você não tem condições melhores, para
fazer melhor ainda!”*

(Mário Sérgio Cortella)

RESUMO

A aplicação de ferro fundido nodular austemperado na indústria tem ganho destaque devido sua elevada resistência mecânica e fácil manufatura. Além disso, devido sua elevada fluidez, é possível fundir peças com dimensões próximas à final. Tais componentes podem necessitar de elevada precisão geométrica e dimensional, podendo ser corrigidos a partir do processo de retificação. Nesse processo, utiliza-se rebolos com diferentes grãos abrasivos e vários níveis de friabilidade, podendo estes interferir significativamente na qualidade da peça. Além disso, a elevada geração de calor é uma característica intrínseca do processo de retificação, sendo necessário a utilização de técnicas para mitigar o efeito. A lubrificação abundante é uma técnica que aplica de dezenas a centenas de litros de fluido de corte por minuto, mas possui um passivo trabalhista e ambiental questionável; em alternativa, tem-se a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), aplicando poucos mililitros por hora ao passo que respeita a política sustentável internacional, mas com o ônus de baixo poder de refrigeração. Vários estudos comprovaram que a adição de água aos fluidos de corte utilizados na técnica de MQL tendem a melhorar significativamente as variáveis de saída do processo, podendo ainda ser otimizado a partir da técnica de limpeza da superfície de corte do reboleto (WCJ), na qual a inserção de ar comprimido na superfície de corte do reboleto contribui para minimizar o fenômeno de empastamento. O objetivo desta pesquisa foi combinar os respectivos parâmetros citados e avaliar as diferentes variáveis de saída do processo, nas quais foram analisadas rugosidade média aritmética (R_a) e rugosidade média (R_z), desvios de circularidade, desgaste do reboleto, emissão acústica, energia específica de retificação e microdureza. Assim, este estudo foi idealizado a partir da escassez de conteúdos sobre a friabilidade de grãos abrasivos na retificação de ferro fundido nodular austemperado. Para tanto, foram utilizados dois rebolos, um com grãos abrasivos menos friáveis e outro com elevada friabilidade, comparando-os ainda com diferentes técnicas de lubrificação combinadas à aplicação de limpeza da superfície de corte do reboleto. Concluiu-se que o reboleto com grãos abrasivos menos friáveis se mostrou mais eficiente quanto ao acabamento superficial das peças, visto que o MQL diluído combinado ao sistema de limpeza produziu resultados muito próximos ao método de lubrificação abundante. Além disso, foi evidenciada uma perspectiva de produção eficiente, podendo catalogar o funcionamento dos rebolos. Ao mesmo tempo, a pesquisa pode estabelecer uma relação em favor de sua aplicação, associada a técnicas sustentáveis e não agressivas ao meio ambiente e à saúde do trabalhador.

Palavras-chave: Retificação. Friabilidade. Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI). Sustentabilidade. Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL).

ABSTRACT

Applying austempered ductile iron in the industrial sector has gained prominence due to its high mechanical strength and easy manufacture. In addition, due to its high fluidity, it is possible to cast parts with dimensions close to the final. Such components may need high dimensional and geometric precision, corrected from the grinding process. In this process, grinding wheels with different abrasive grains and various levels of friability can be used, which can significantly interfere with the piece's quality. However, high heat generation is an intrinsic characteristic of the grinding process, requiring techniques to mitigate the effect. Flood lubri-cooling is a technique that applies tens to hundreds of liters of cutting fluid per minute, but it has questionable labor and environmental liabilities; alternatively, there is the technique of minimum quantity lubrication (MQL), applying a few milliliters per hour while respecting the international sustainable policy, but with the burden of low cooling power. Several studies have shown that the addition of water to the cutting fluids used in the MQL technique significantly improves the process output variables and can even be optimized from the wheel cleaning jet (WCJ), in which compressed air is inserted into the cutting surface of the grinding wheel, and it helps to minimize the clogging phenomenon. The purpose of this research was to combine the respective parameters quoted and evaluate the different process output variables, in which arithmetic average roughness (Ra) and average roughness (Rz), roundness deviation, grinding wheel wear, acoustic emission, specific grinding energy, and microhardness were analyzed. Thus, this study was envisioned from the scarcity of contents about the austempered ductile iron and abrasives grains friability in the grinding process. Hence, two grinding wheels, one with abrasive grains less friable and the other with high friability, were used, comparing them still with different lubri-cooling techniques combined to wheel cleaning jet application. It was concluded that the grinding wheel with less friable abrasive grains proved to be more efficient in terms of the workpiece's surface finish since the diluted MQL combined with the wheel cleaning jet produced results very close to the flood application. Besides, it was evidenced a production perspective efficient, having been able to catalog the functioning of the grinding wheels. At the same time, the research can establish a relationship in favor of their performance, associated with sustainable techniques that are not harmful to the environment or the employee's health.

Keywords: Grinding process. Friability. Austempered Ductile Iron (ADI). Sustainability. Minimum Quantity Lubrication (MQL).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Motivação	15
1.2 Objetivo geral.....	16
1.3 Objetivos específicos.....	16
2. RELATO	18
3. ESTRUTURA DO ARTIGO	19
3.1 Resumo	19
3.2 Introdução	19
3.3 Procedimentos experimentais.....	19
3.4 Resultados e discussão.....	20
3.4.1 Rugosidade média aritmética (Ra) e rugosidade média (Rz).....	20
3.4.2 Desvios de circularidade	20
3.4.3 Desgaste diametral do rebolo	21
3.4.4 Potência de retificação	22
3.4.5 Emissão acústica	23
3.4.6 Energia específica de retificação.....	24
3.4.7 Microdureza	25
3.5 Conclusão	26
4. PRODUÇÕES CIENTÍFICAS.....	27
CONCLUSÕES.....	29
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	31
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

A remoção de material através da utilização de grãos abrasivos tem sido uma atividade praticada pela humanidade desde a pré-história (MALKIN; GUO, 2008). O processo de retificação surge a partir da necessidade de manufaturar peças com elevada precisão geométrica e dimensional (KLOCKE, 2009; ROWE, 2014). Esse processo é amplamente utilizado na indústria, no qual a ferramenta utilizada é o rebolo, composto de ligante, responsável pela fixação e manutenção dos grãos abrasivos distribuídos uniformemente e aleatoriamente no volume da camada abrasiva do rebolo; os grãos abrasivos, que realizam a remoção do material; a porosidade que auxilia na entrada de fluido de corte e alojamento de cavacos (BIANCHI et al., 2018a; MALKIN; GUO, 2008). Suas aplicações consistem especialmente no final da cadeia produtiva, onde a retificação normalmente representa o último processo ao qual a peça será submetida (DENKENA; GROVE; GÖTTSCHING, 2015; SATO et al., 2022).

Entretanto, o processo de retificação pode sofrer inúmeras influências referentes aos grãos abrasivos utilizados, visto que alterações químicas ou estruturais de um mesmo tipo de abrasivo podem resultar em diferenças nas propriedades destes materiais (MALKIN; GUO, 2007, 2008). Logo, a escolha do material dos grãos abrasivos deve ser embasada de acordo com o material a ser retificado, pois a dureza, estrutura cristalina, formato, friabilidade e a composição química dos grãos abrasivos são algumas das características que determinam sua eficácia na remoção de material, além de possuir uma relação custo-benefício aplicável industrialmente (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2013). Contudo, a aplicação de grãos abrasivos de nitreto de boro cúbico (CBN) tem mostrado melhor custo-eficiência nos processos de retificação, devido a sua elevada dureza, estabilidade e alta condutividade térmica, além do fato de ser inerte quimicamente, podendo ser utilizado em aplicações de alto desempenho (KUFFA; KUSTER; WEGENER, 2017; SATO et al., 2022; WEGENER et al., 2011).

Dentre todas as propriedades e características encontradas nos grãos abrasivos, uma em específico tem mostrado potencial para melhorar a eficiência do processo – friabilidade. Essa é uma característica importante dos grãos abrasivos, pois está relacionada à capacidade do grão se fragmentar em particulados menores, gerando novas arestas de corte (LINKE, 2016) quando submetido aos esforços de corte. Isto posto, tem-se na friabilidade uma tendência de um grão se fraturar sob compressão, uma vez que a friabilidade é inverso à tenacidade (capacidade em absorver impactos). Por isso, grãos mais friáveis são melhores para baixa forças de corte, sendo, portanto, a friabilidade uma vantagem para manter a homogeneidade da forma do rebolo (DE

MARTINI FERNANDES et al., 2018). Abrasivos mais friáveis tendem a fazer com que o rebolo se desgaste mais rapidamente do que os menos friáveis, o que pode ser vantajoso na retificação de alguns materiais e em algumas operações (LOPES et al., 2019b; ROWE, 2014). O equilíbrio entre tenacidade e friabilidade se faz necessário para que haja propriedades de geração de arestas de corte, de modo que não tenha desgaste acentuado e tampouco elevada geração de calor na interface de corte (STEPHENSON, 2016).

Todavia, os grãos abrasivos darão início ao mecanismo de formação de cavacos, o que inevitavelmente contribuirá com a deformação plástica do material que ainda não foram removidos da peça – *ploughing* – e ainda o atrito dos grãos abrasivos com a peça e pequenas espessuras de cavaco deformado plasticamente – *rubbing* – gerarão uma quantidade considerável de energia na forma de calor, aquecendo a região de contato rebolo-peça (DING et al., 2018; DOMAN, 2008; KAKAÇ; PRAMUANJAROENKIJ, 2009; LOPES et al., 2019c; MALKIN; GUO, 2008). Caso esse calor gerado não seja minimizado de maneira correta poderá levar a danos térmicos à peça e uma ineficiência econômica do processo, resultando em baixa taxa de remoção e desgaste acentuado do rebolo (MACEROL; FRANCA; KRAJNIK, 2020; MORETTI et al., 2021). Logo, como o processo de retificação envolve muita energia térmica e a maior parte é dissipada na forma de calor; uma elevada temperatura da interface de corte rebolo-peça pode provocar danos térmicos à peça, bem como incitar à queima e demais alterações microestruturais, gerando tensões internas que culminarão na alteração das propriedades mecânicas do material, sendo necessário, portanto, a utilização de fluido de corte para mitigar o ônus do processo (ALEXANDRE et al., 2018; MALKIN; GUO, 2008; ROWE, 2014; SATO et al., 2020).

Na maioria dos casos, o fluido de corte escolhido é composto de óleo mineral, semissintético ou sintético, água, bactericida e aditivos (BRINKSMEIER et al., 2015; ROWE, 2014). Ademais, a utilização de fluido de corte contribui para a lubrificarrefrigeração da interface rebolo-peça, diminuindo significativamente o atrito, ao passo que ocorre um aumento da eficiência do processo devido ao menor empastamento, resultando assim em uma boa manutenção do poder de corte do rebolo (MARINESCU et al., 2013; RODRIGUEZ et al., 2020b). Além do fluido de corte ajudar na limpeza da superfície de corte do rebolo e diminuir a temperatura do processo, novas tecnologias de fluidos lubrificarrefrigerantes tem contribuído eficientemente contra a corrosão de elementos metálicos constituintes da peça e da máquina ferramenta (TALON et al., 2019, 2020).

Contudo, o uso de fluidos de corte tem um grande impacto socioambiental, considerando a utilização de componentes tóxicos, como formaldeído, alcanolaminas e materiais orgânicos

voláteis (DEBNATH; REDDY; YI, 2014, 2016; JABBAR et al., 2017; OZCELIK et al., 2011; SHOKOOHI; KHOSROJERDI; RASSOLIAN SHIADHI, 2015). Nesse sentido, a Agência Internacional de Pesquisa do Câncer (IARC) classifica os fluidos de corte como cancerígenos, com evidência de que 85% de todo fluido de corte utilizado no mundo são a base de petróleo, se inalados ou em contato com a pele, podem causar dermatite, tosse, asma, obstrução pulmonar crônica, pneumonite por hipersensibilidade e doença cardíaca isquêmica, além de neoplasia no pâncreas, garganta e bexiga urinária (ABDALLA et al., 2007; BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017; DEBNATH; REDDY; YI, 2014; JABBAR et al., 2017; KATNA et al., 2017; NIZAMUDDIN; AGRAWAL; PATIL, 2018; PICCIOTTO; LJUNGMAN; EISEN, 2016). Por fim, o índice de dermatoses ocupacionais no mundo decorrente do contato com fluidos de corte chega a 80% dos casos, demonstrando a nocividade desses fluidos e a urgência em encontrar alternativas ao método abundante de aplicação de fluidos de corte (GARCIA et al., 2020; LAWAL; CHOUDHURY; NUKMAN, 2013).

Além disso, cerca de 85% da toda energia utilizada na usinagem refere-se a sistemas de recirculação de fluidos, armazenamento, bombas para fluidos de corte e outros equipamentos que não estão diretamente relacionados à remoção de material. Contudo, ressalta-se também que a manufatura representa cerca de 90% do consumo de energia na indústria (DUFLOU et al., 2012; FANG et al., 2011; SUN; LI, 2014). Outrossim, é notável que a energia utilizada por periféricos no processo de usinagem tem grande representatividade do consumo de energia elétrica do setor, e que a área de manufatura consumiu cerca de 32 bilhões de MJ em 2017, com projeção de consumo de 26 trilhões de MJ em 2030. Não somente o consumo de energia elétrica preocupa a sociedade, mas também os impactos para sua geração, uma vez que estudos da Agência Internacional de Energia (IEA) afirmam que a produção de eletricidade correspondeu por cerca de 40% das emissões de CO₂ em 2017, no qual apenas para a fabricação de fluidos de corte representou 2300 Mt de CO₂ no ano de 2016 (SAID et al., 2019; SATO et al., 2022).

Assim, estudos acerca de novas técnicas de lubrificação que possam ser alternativas à aplicação de fluido de corte abundante são de grande importância para os meios socioambientais, do qual pode se destacar o potencial de aplicação da técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL). A técnica de MQL consiste na aplicação de gotículas atomizadas de fluido de corte combinado com ar comprimido na interface de corte, tendo uma eficiência maximizada pela aplicação com pressão e velocidade do jato de fluido suficientes para penetrar a barreira de ar criado pela rotação do rebolo (barreira aerodinâmica), o que corresponde no máximo à 40% do fluido de corte devidamente aplicado na interface de corte na técnica abundante (BIANCHI et al., 2018b; DANIEL et al., 2020; SATO et al., 2021;

ZHANG et al., 2020) . Deste modo, se for considerado apenas o óleo de corte utilizado para compor a emulsão na técnica de lubrificação abundante, tem-se que o MQL pode reduzir em até 99,9% a quantidade de resíduos utilizado no processo, o que corresponde a uma vazão de 30 a 200 mL/h, ao passo que na técnica abundante pode representar de 1,8 a 30,6 L/h (BRINKSMEIER et al., 2015; MALKIN; GUO, 2008; SATO et al., 2020; SILVA et al., 2020; TAWAKOLI et al., 2011). Além disso, este método alternativo reduz drasticamente o custo final do processo, uma vez que os preços de compra, manutenção e descarte do fluido de corte no sistema são substancialmente reduzidos em comparação com o método abundante (MAO et al., 2013; RODRIGUEZ et al., 2019).

Embora técnica de MQL seja classificada com sustentável pela ISO 14000, estudos tem apontado que em processos com elevada geração de calor o MQL apresenta desvantagens, devido a sua baixa capacidade de refrigeração e remoção ineficiente de cavacos da interface de corte, intensificando o empastamento e o desgaste do rebolo a medida que imprecisões geométricas e dimensionais são observadas, tornando mais difícil sua aplicação industrial (HADAD; SADEGHI, 2012; OLIVEIRA et al., 2012; SANCHEZ et al., 2010). A fim de poder melhorar o desempenho da aplicação de MQL no processo de retificação, duas alternativas vêm se destacando por seus resultados promissores: a utilização de MQL com fluido de corte diluído em água para melhorar a capacidade de resfriamento do processo e a utilização de um sistema auxiliar de limpeza da superfície de corte do rebolo - *wheel cleaning jet* para a remoção dos cavacos empastados nas porosidades do rebolo (WCJ) (BIANCHI et al., 2019; CHOI; LEE; JEONG, 2001; GARCIA et al., 2020; JAVARONI et al., 2020; SATO et al., 2021).

A adição de água na técnica MQL é uma alternativa viável que surgiu para aumentar a capacidade de resfriamento da lubrificação, pois o calor específico da água é cerca de duas vezes maior que o do óleo, o que acelera a taxa de absorção de calor durante o processo (BELENTANI et al., 2013; YOSHIMURA et al., 2006). Apesar de reduzir a lubricidade do MQL, a adição de água melhora os resultados da retificação, já que apresenta melhorias na rugosidade, desvios de circularidade e diminui o desgaste do rebolo se comparado ao MQL puro (BELENTANI et al., 2013; CAMERON; BAUER; WARKENTIN, 2010; MAO et al., 2012; RODRIGUEZ et al., 2020b). Apesar da adição de água no MQL ser uma alternativa promissora, ainda assim tem-se uma formação intensa de empastamento na superfície de corte do rebolo (LOPES et al., 2021; MORETTI et al., 2020). Deste modo, a utilização de um fluxo de ar comprimido direcionado à superfície de corte do rebolo (WCJ) mostrou-se eficaz em remover quase que totalmente o empastamento, tornando mais ativo os grãos abrasivos que foram recobertos pelo empastamento, distribuindo melhor a força de corte entre uma maior

quantidade de grãos, reduzindo assim o desgaste do rebolo (BIANCHI et al., 2019; SATO et al., 2021).

Portanto, este trabalho desenvolveu um novo e exclusivo estudo acerca do processo de retificação, no qual pesquisas bibliométricas evidenciaram a carência de assuntos pertinentes à estudos relacionados a friabilidade e ferro fundido nodular austemperado. Neste sentido, utilizou-se dois rebolos de CBN com friabilidades opostas, um com baixa friabilidade (GL) e outro com elevada friabilidade (GS) na retificação cilíndrica externa de mergulho de ferro fundido nodular austemperado, combinado à diferentes técnicas de lubrificação: abundante, MQL puro + WCJ e MQL diluído + WCJ. Com isso, foi verificado como esses parâmetros de entrada influenciam as variáveis de saída escolhidas: rugosidade média aritmética (R_a) e rugosidade média (R_z), desvios de circularidade, desgaste diametral do rebolo, potência de retificação, emissão acústica, energia específica de retificação e microdureza. A partir desses resultados, buscou-se otimizar o processo de retificação por meio da melhor escolha da friabilidade de grãos abrasivos de CBN para composição do rebolo, e da melhor lubrificação alinhada a cada variável de saída, de acordo com as necessidades pertinentes da indústria, diretamente relacionadas as exigências socioambientais.

1.1 Motivação

No estudo bibliográfico realizado nas plataformas Scopus, Google Scholar, Science Direct e outros, notou-se escassez de trabalhos vinculados à sustentabilidade e técnicas de otimização de processos de retificação. Deste modo, visualizou-se vantagens e oportunidades de melhoria na aplicação da técnica de MQL no processo de retificação. A aplicação de MQL está na maioria das vezes condicionada a um baixo poder de refrigeração e insuficiente capacidade de limpeza da superfície de corte do rebolo, desvantagens essas que impedem sua ampla aplicação no processo de retificação.

A otimização dos processos industriais tem o objetivo de reduzir os custos operacionais, devido a oportunidade de redução do uso de fluido de corte, e se alinhar às leis, regulamentações e pressões sociais que obrigam as empresas a buscarem maneiras de tornarem os seus processos mais produtivos, ao passo que atendam as normas de sustentabilidade em suas cadeias produtivas. Contudo, os fluidos de corte se opõem totalmente a esses princípios, pois estão atrelados a um elevado custo de operação, além de ser altamente poluente ao meio ambiente e prejudicial à saúde humana. A aplicação da técnica de MQL na retificação ainda carece de desenvolvimento para serem eficazes no processo de retificação. O MQL foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar maior lubrificação com menor quantidade de lubrificante, sendo

eficiente em processos de usinagem de geometria definida, como torneamento e furação; já na retificação, o MQL não atende as demandas de refrigeração e remoção de cavaco, limitando sua utilização nesse processo.

Portanto, a motivação para o presente trabalho foi melhorar a eficiência da técnica de MQL em processos de retificação, contribuindo para a disseminação de sua aplicação industrial. A utilização de rebolos de CBN com diferentes friabilidades dos grãos combinada com diferentes técnicas de lubrificação e limpeza da superfície de corte do rebolo pode ser uma alternativa para tornar o processo mais sustentável e aplicável à indústria. Em função da sua ampla aplicação em diversos componentes de veículos, como virabrequins, bielas, pistões e outros, por exemplo, o ferro fundido nodular austemperado foi utilizado para a fabricação dos corpos de prova. Deste modo, constatou-se que esta combinação de MQL puro e diluído, sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo (WCJ) e rebolos com diferentes friabilidades dos grãos abrasivos de CBN na retificação cilíndrica externa de mergulho ainda é pouco explorada na literatura, justificando a execução do presente trabalho.

1.2 Objetivo geral

Avaliar os efeitos da retificação do ferro fundido nodular austemperado utilizando rebolos com grãos abrasivos de CBN de diferentes friabilidades, submetendo-os a lubrificação abundante, MQL puro e MQL diluído combinado à técnica de limpeza da superfície de corte do rebolo.

1.3 Objetivos específicos

- Estudar o desempenho entre os rebolos com grãos abrasivos com maior e menor friabilidade no processo de retificação do ferro fundido nodular austemperado;
- Relacionar a friabilidade dos grãos abrasivos com sua capacidade de remoção de material quando submetidos à diferentes técnicas de lubrificação;
- Averiguar a influência da aplicação de lubrificação abundante, MQL puro e diluído e quantificar o quanto isso influencia na vida do rebolo e na qualidade superficial e geométrica da peça retificada;

- Determinar o desempenho da adição de água no fluido de corte utilizado na técnica de MQL durante a retificação do ferro fundido nodular austemperado;
- Analisar a eficiência do processo de limpeza com ar comprimido para minimizar os efeitos negativos da utilização de MQL puro, aumentando a eficiência do processo e minimizando os impactos socioambientais.

2. RELATO

O artigo intitulado “Performance of austempered ductile iron (ADI) grinding using diluted oil in MQL combined with wheel cleaning jet and different CBN grains friability”, foi publicado na revista *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (ISSN: 0268-3768), cujo fator de impacto é 3,226 – Highest Percentile 84% (em 05/2022) e classificação Qualis A2. O artigo foi publicado em 09 de março de 2020 e divulga os resultados obtidos pelo projeto de pesquisa “Desempenho da lubrificação por MQL e limpeza da superfície de corte do rebolo na retificação de ferro fundido nodular”.

3. ESTRUTURA DO ARTIGO

A publicação intitulada “Performance of austempered ductile iron (ADI) grinding using diluted oil in MQL combined with wheel cleaning jet and different CBN grains friability” é composta por cinco seções:

3.1 Resumo

Nessa seção foi apresentado o tema principal do desenvolvimento do estudo referente a esta tese, bem como sua justificativa pertinente que motivaram esta pesquisa.

3.2 Introdução

Nessa seção foram apresentados os principais temas abordados pela pesquisa, contextualizando a lacuna existente no universo científico. Logo, os respectivos temas foram abordados:

- Problemas causados pelos fluidos de corte;
- Mínima Quantidade de Lubrificante;
- Obstáculos da aplicação de MQL na retificação;
- Aplicação de diferentes friabilidades de grãos de CBN;
- Aplicação industrial de ferro fundido nodular austemperado;
- Objetivos da pesquisa.

3.3 Procedimentos experimentais

Foram apresentados os equipamentos, bem como a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa. Nessa seção foram evidenciadas as informações necessárias para que a pesquisa possa ser replicada. Contudo, vislumbrou-se poder esclarecer os principais parâmetros acerca de:

- Dados da máquina;
- Geometria e material utilizados na fabricação dos corpos de prova;
- Parâmetros da remoção de material;
- Métodos e equipamentos de lubrificação;
- Método e equipamentos do sistema de limpeza por ar comprimido;
- Metodologia e equipamentos utilizados na medição e análise dos resultados.

3.4 Resultados e discussão

Nessa seção foram expostos os resultados e discutidos seus respectivos efeitos, a fim de poder explicitar o ocorrido e justificar a partir de referências bibliográficas os fenômenos observados. Deste modo, foram discutidos acerca dos tópicos a seguir:

3.4.1 Rugosidade média aritmética (Ra) e rugosidade média (Rz)

No decorrer dos estudos foi visto que a aplicação do sistema de MQL reduziu a rugosidade média aritmética (Ra) em 38% quando aplicado o rebolo com grãos de CBN mais friáveis (GS) e cerca de 40% para o rebolo com grãos de CBN menos friáveis (GL). Entendeu-se que essa redução foi ocasionada pela minimização das temperaturas durante a usinagem, proporcionada pela maior capacidade refrigerante da água. Com a queda da temperatura e a excelente lubrificação gerado pelo MQL, os grãos abrasivos permaneceram afiados, o que minimizou a deformação elástica e plástica do material, culminando em uma maior facilidade de corte.

Quando analisado o MQL puro combinado com WCJ, notou-se que a maior viscosidade do fluido de corte comparado à água aumentou a aderência dos cavacos sobre os grãos abrasivos, diminuindo a capacidade de remover cavacos da região de corte; isso resultou em maior empastamento do rebolo, gerando os fenômenos de *ploughing* e *rubbing*, ao invés de cisalhar o material. Além disso, todos os fluidos de corte revelaram que o rebolo menos friável (GL) apresentou uma melhora de 10% a 20% em relação ao rebolo mais friável (GS).

A maior fragilidade dos grãos GS, que frequentemente se rompem para gerar novas arestas de corte, causa também variações topográficas na superfície de corte do rebolo, refletindo diretamente na qualidade da superfície da peça, o que resulta em irregularidades e aumento do valor de rugosidade (ALEXANDRE et al., 2020). Portanto, foi evidenciado o maior potencial econômico e sustentável do MQL, aliado à sua capacidade de contribuir para uma redução dos riscos à saúde dos colaboradores, quando assim posto em processo. Diante disso, os baixos valores de rugosidade encontrados na aplicação desta técnica, juntamente com o WCJ e o rebolo menos friável (GL), são suficientes para compensar a pequena diferença entre os resultados do MQL diluído em comparação ao fluido abundante.

3.4.2 Desvios de circularidade

Os desvios de circularidade mais significativos ocorreram com a aplicação de MQL puro + WCJ. Isso é justificado pelo aumento do empastamento e, conseqüentemente, maior

aquecimento da zona de contato rebolo-peça, reduzindo a capacidade de corte do rebolo e aumentando a deformação da superfície da peça. Além disso, os resultados obtidos mostraram que o uso do WCJ não foi suficiente para equiparar o MQL ao método abundante.

Observou-se que a aplicação do método MQL diluído + WCJ gerou uma redução de 35% para o rebolo menos friáveis (GL) e 24% nos desvios de circularidade para o mais friável (GS), quando comparado ao MQL puro + WCJ. Essa diferença se deve a melhora na refrigeração proporcionada pela adição de água junto ao MQL, contribuindo para reduzir as deformações térmicas irregulares, que por sua vez reduzem os desvios de circularidade (BIANCHI et al., 2018b). Além disso, a diferença mais significativa entre MQL puro + WCJ e MQL diluído + WCJ foi obtido a partir dos grãos abrasivos menos friáveis (GL), o que se justifica por sua menor capacidade de criar novas arestas de corte, reduzindo irregularidades na superfície de corte e aumentando a precisão geométrica no processo (LOPES et al., 2019b).

O método de aplicação com fluido de corte abundante resultou nos menores desvios entre todos os testes e para ambos os grãos abrasivos testados. O empastamento é prejudicial à peça, pois os cavacos do material se alojam na superfície de corte do rebolo, deformando a superfície de corte e aumentando o atrito, o que provoca um aumento dos desvios de circularidade, prejudicando a superfície da peça (BIANCHI et al., 2018b; JESUS et al., 2012). Por outro lado, a aplicação do método abundante reduz os efeitos do empastamento e adesão dos cavacos nos poros do rebolo, que possui uma excelente capacidade de resfriamento (SILVA et al., 2020).

No entanto, a diferença nos desvios de circularidade entre o MQL diluído + WCJ e o método abundante foi de apenas 10,3% para o rebolo mais friável (GS) e 20,6% para o rebolo menos friável (GL), o que mostrou a aplicabilidade do MQL diluído + WCJ como alternativa ao método abundante. O rebolo menos friável apresentou menores desvios de circularidade para todos os fluidos de corte em comparação com o mais friável, pois a maior friabilidade levou à geração de novas arestas de corte com mais frequência, o que não ocorreu no menos friável, que conseguiu manter a superfície de corte do rebolo mais regular, contribuindo para uma redução dos desvios de circularidade.

3.4.3 Desgaste diametral do rebolo

O maior desgaste diametral do rebolo ocorreu na técnica de aplicação de MQL puro + WCJ, no qual foram conferidos valores de 11,15 μm para o rebolo menos friável (GL) e 12,84 μm para o rebolo mais friável (GS). Este aumento de desgaste ocorreu devido à redução da capacidade de remoção dos cavacos da zona de corte, intensificado pelo MQL puro em

comparação com outros métodos de lubrificação, aumentando assim o empastamento do rebolo, mesmo com a aplicação de WCJ. Este empastamento mais intenso exigiu dressagens mais frequentes, a fim de manter a qualidade da peça, aumentando assim o desgaste do rebolo. Devido ao fato da capacidade de remoção de calor do MQL puro + WCJ ser menor em comparação com o método abundante, houve uma alteração na resistência mecânica dos grãos abrasivos e do ligante, em decorrência da temperatura mais elevada na interface rebolo-peça, fazendo com que os grãos quebrem e, conseqüentemente, se degradem ainda mais facilmente, contribuindo para o desgaste do rebolo (DE MELLO et al., 2018; LOPES et al., 2019a).

O menor desgaste foi obtido usando fluido de corte abundante. Este método promoveu uma melhor limpeza da superfície de corte do rebolo, reduzindo o empastamento e a quantidade de dressagens necessárias para execução eficaz do processo de retificação. Além disso, a técnica abundante remove mais calor da zona de corte, ao passo que a redução da temperatura mantém as propriedades mecânicas do ligante, dificultando a liberação de grãos abrasivos e prolongando a vida do rebolo. Contudo, os resultados obtidos com o MQL diluído + WCJ aproximaram-se daqueles obtidos com o método abundante, no qual foi conferido um aumento de 5,3% no desgaste do rebolo mais friável (GS) e de 16,3% para o rebolo menos friável (GL) em comparação com o método abundante. Comparado dentre todos os métodos avaliados, o rebolo menos friável apresentou menor desgaste do que o rebolo mais friável, pois os grãos abrasivos GS tendem a criar novas arestas de corte com maior frequência, fragmentando com maior intensidade os grãos abrasivos, o que aumenta o desgaste.

3.4.4 Potência de retificação

O rebolo mais friável necessitou de menor potência, independentemente da técnica de lubrificação utilizada. Isso é explicado pelo fato de que os grãos abrasivos mais friáveis mantêm as arestas de corte mais afiadas; assim, a força tangencial necessária para realizar corte é menor. Assim, como no cálculo da potência, a força tangencial de corte é proporcional à potência (RODRIGUEZ et al., 2020a), ao comparar os métodos de MQL puro + WCJ com MQL diluído + WCJ, a potência de corte é maior para ambos os rebolos quando aplicado MQL puro, sendo 15,4% maior para GL e 15,7% maior para o rebolo mais friável (GS). Isso ocorreu, pois a capacidade de refrigeração do MQL puro é inferior à do MQL diluído, diminuindo a capacidade de remoção de calor da interface de corte. Assim, as propriedades mecânicas da peça tendem a ser alteradas em decorrência do calor, tornando-a mais dúctil ou com menor dureza, por exemplo. Todavia, essa maior ductilidade do material reduziu a potência de corte necessária para cisalhar o material, embora, por outro lado, tenha gerado maiores deformações

do material durante o processo e, com isso, cavacos longos, o que aumentou a temperatura na interface de corte e intensificou o empastamento do rebolo.

O empastamento mais intenso do rebolo ocorreu quando utilizado o MQL puro + WCJ em comparação com o MQL diluído + WCJ, tendo sido o principal responsável pelo maior valor de potência de corte. Ressalta-se que o WCJ foi o meio responsável por remover parte do empastamento do rebolo, aproximando-se dos valores de potência encontrados no método abundante. Quando comparado com a aplicação abundante, o MQL diluído + WCJ apresentou maior consumo de potência, ainda que para o rebolo com grãos menos friáveis houvesse um aumento de 17,2% no valor de potência corte, ao passo que 15,2% foi o aumento quando utilizado o rebolo com grãos mais friáveis. Nesse sentido, o empastamento não removido pelo WCJ foi responsável por aumentar a potência de corte em relação ao método abundante. No entanto, em ambos os rebolos, os resultados de MQL + WCJ diluído foram substancialmente semelhantes aos resultados do método abundante, mostrando que o fluido de corte diluído aplicado na técnica de MQL combinado com WCJ aumenta a empregabilidade do MQL como alternativa ao método abundante.

3.4.5 Emissão acústica

Constatou-se que o rebolo com grãos menos friáveis atuou com maior intensidade no processo, causando maiores valores de emissões acústicas quando comparado com rebolo com grãos mais friáveis. Devido ao aumento da capacidade de geração de arestas de corte dos grãos mais friáveis (GS), os grãos abrasivos do rebolo permitem regularmente a manutenção de arestas de corte mais afiadas, o que resultou na diminuição na força necessária para cisalhar o material.

Como o rebolo menos friável não tem a capacidade de formar arestas de corte com tanta frequência em comparação ao rebolo mais friável, há um aumento nas tensões de compressão no processo que são gerados pelos grãos abrasivos em decorrência da sua perda de corte, consequentemente, este fato aumenta a intensidade de contato com a peça (DE MARTINI FERNANDES et al., 2018). Além disso, o rebolo menos friável tende a se desgastar pela geração de microfraturas nos grãos abrasivos, permitindo uma maior área de contato dos grãos com a peça, o que intensifica o atrito e aumenta a espessura do cavaco. Este fenômeno contribui para o *ploughing* da superfície da peça, aumentando e justificando os valores de emissão acústica encontrados no processo (LOPES et al., 2019b)

Em direção ao melhor desempenho, o rebolo mais friável apresentou uma redução nos valores da emissão acústica, respectivamente de 13,8%, 11,5% e 13,6%, em comparação com

o rebolo menos friável, usando o método de lubrificação abundante, MQL puro e MQL diluído, respectivamente. Outro ponto a se destacar é a influência da água junto ao sistema MQL, que minimizou os efeitos da emissão acústica. Esta diminuição de cerca de 35% no valor da emissão acústica com MQL diluído em comparação com MQL puro também foi motivada pela melhora da capacidade de corte e menores deformações durante a remoção do material. Como a adição de água contribuiu para a redução da temperatura durante o processo de retificação, foi possível minimizar as deformações elásticas e plásticas na superfície da peça, o que geralmente é causado pelo aumento da ductilidade da peça sob elevadas temperaturas. Assim, a peça apresentou menores distorções, o que facilitou o corte e reduziu a intensidade do *ploughing* e do atrito na peça.

Contudo, a aplicação do sistema WCJ combinado ao MQL, contribuiu para a remoção dos cavacos aderidos ao rebolo durante o processo, corroborando para reduzir o fenômeno de empastamento. Consequentemente, o sistema minimizou os sulcos da superfície da peça causados por cavacos alojados nos poros do rebolo e, com isso, também diminuiu os valores de emissão acústica. Mesmo assim, a redução desse fenômeno não foi suficiente para que os resultados dessa técnica fossem semelhantes aos do método abundante. No entanto, os benefícios ambientais decorrentes da aplicação do sistema MQL, associados aos baixos valores de emissão acústica obtidos na retificação são de grande importância na escolha do fluido utilizado. Essa mesma tendência foi encontrada quando comparado diferentes técnicas de lubrificação: abundante e MQL diluído na retificação de aço ABNT 4340, no qual foi observada a mesma tendência de menores emissões obtidas pelo método abundante, mas com resultados satisfatórios para o sistema MQL (BIANCHI et al., 2018b; SATO et al., 2020).

3.4.6 Energia específica de retificação

Quando os dois rebolos são comparados, aquele composto de grãos menos friáveis (GL) apresentou maior energia específica em todas as aplicações. Como o rebolo mais friável (GS) apresentou a maior friabilidade, as arestas de corte foram renovadas com maior frequência, permitindo maior remoção de material. A energia específica em seu cálculo considera a quantidade de material removido e é inversamente proporcional, ou seja, o aumento da capacidade de remoção do material diminui os valores de energia específica. O método abundante tem os menores valores de energia específica para ambos os rebolos. Isso ocorre pelo fato da respectiva técnica promover melhor limpeza da superfície de corte do rebolo, reduzindo os efeitos deletérios causados pelo empastamento de cavacos nos poros da superfície de corte, levando a uma redução da energia específica (MALKIN; GUO, 2008). Além disso, o fluido de

corte aplicado pela técnica abundante realiza uma troca de calor mais eficiente, mantendo as propriedades mecânicas do rebolo, uma vez que produz uma menor temperatura na interface de corte, o que aumenta a capacidade de corte dos grãos abrasivos e, com isso, reduz a energia específica de retificação (SATO et al., 2021, 2022)

Comparando o método abundante com o MQL diluído + WCJ, a energia específica do MQL foi em média 15,5% maior para ambos os rebolos do que para o método abundante, pois a capacidade de trocar calor e remover cavacos da interface de corte do MQL é menor, ao passo que o empastamento foi intensificado, reduzindo a capacidade de corte. O MQL puro + WCJ apresentou os maiores valores de energia específica, sendo 17% superior em relação ao MQL diluído + WCJ. Este resultado ocorreu devido ao método MQL puro + WCJ ter uma capacidade de troca de calor menor, necessitando assim uma maior força tangencial para realizar o processo, e logo, aumentando a energia específica de retificação.

3.4.7 Microdureza

As análises de microdureza foram realizadas a fim de identificar se houveram alterações microestruturais do material a partir da superfície retificada. Deste modo, visa-se garantir que os tratamentos térmicos que antecederam a retificação não comprometam as propriedades mecânicas das peças (BIANCHI et al., 2018a). Por outro lado, os valores encontrados variaram muito, representando possivelmente uma sobre temperatura na peça durante o processo, que pode ter sido ocasionada por oscilações de temperatura na região de corte seguida de um rápido resfriamento e novo reaquecimento. Esta característica surge tanto pela aplicação ineficiente de fluido de corte quanto por uma menor capacidade de corte do rebolo. Assim, não é possível afirmar que houve alterações microestruturais em decorrência das diferentes técnicas de lubrificação aplicadas, pois o menor valor de microdureza (487,0 HV) comparado ao maior valor (496,0 HV), são irrelevantes para afirmar tal alteração. Desta forma, demonstra-se que todos os fluidos de corte usados com o sistema WCJ foram eficientes na lubrificação.

Além disso, todos os valores encontrados foram muito próximos ao valor de referência medido antes da retificação, concluindo que a diferença de friabilidade dos grãos abrasivos aplicados nos rebolos não influenciaram nos ensaios de microdureza. Assim, o método MQL + WCJ mostrou-se uma excelente alternativa à lubrificação abundante, considerando o consumo mínimo de fluido de corte quando comparado com o método abundante e os benefícios já mencionados decorrentes deste baixo consumo.

3.5 Conclusão do artigo

Apresenta os conhecimentos adquiridos sobre os efeitos da retificação de ferro fundido nodular austemperado utilizando rebolos com grãos de CBN de diferentes friabilidades, submetendo-os a lubrificação abundante, MQL puro e MQL diluído combinado à técnica de limpeza da superfície de corte do reboleto.

4. PRODUÇÕES CIENTÍFICAS

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

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

TALON, Anthony Gaspar et al. Comparative evaluation of CBN wheels with abrasive grains of different friability applied to steel and ductile iron grinding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 112, n. 9, p. 2547-2564, 2021.

DANIEL, Douglas Maiochi et al. Grinding comparative between ductile iron and austempered ductile iron under CBN wheel combined to abrasive grains with high and low friability. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 109, n. 9, p. 2679-2690, 2020.

MORETTI, Guilherme Bressan 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, p. 3661-3673, 2020.

DA SILVA, Andriago Elisاريو 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, p. 4373-4387, 2020.

LOPES, José Claudio et al. Performance of austempered ductile iron (ADI) grinding using diluted oil in MQL combined with wheel cleaning jet and different CBN grains friability. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 3, p. 1805-1818, 2020.

ALEXANDRE, Felipe Aparecido et al. Depth of dressing optimization in CBN wheels of different friabilities using acoustic emission (AE) technique. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 11, p. 5225-5240, 2020.

LOPES, José Claudio 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, 2019.

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

Ressalta-se ainda que ao todo foram produzidos mais de 50 artigos em periódicos internacionais, bem como patentes, livros e demais pareceres técnicos/científicos para diversos periódicos internacionais.

CONCLUSÕES

De acordo com a análise das variáveis de saída realizada nesta pesquisa, a partir da aplicação de dois rebolos superabrasivos de CBN com diferentes friabilidades, na retificação de ferro fundido nodular austemperado com diferentes métodos de lubrificação: abundante, MQL puro e MQL diluído combinado ao sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo, pode-se concluir que:

- A friabilidade dos grãos abrasivos aplicados nos rebolos teve uma influência significativa nos parâmetros avaliados, visto que o rebolo menos friável (GL) obteve os melhores resultados na rugosidade média aritmética (Ra) e rugosidade média (Rz), desvios de circularidade e desgaste diametral do rebolo para as três condições de lubrificação. Esses resultados foram obtidos, principalmente devido a menor fragmentação dos grãos abrasivos e menor geração de arestas de corte dos grãos abrasivos. Logo, isso implica em grãos operando sob o mecanismo de desgaste de microfraturas e com menores variações do que os grãos operando sob mecanismo de desgaste de macrofratura, como no rebolo mais friável;
- Por outro lado, o rebolo mais friável se desempenhou melhor do que o menos friável em potência de corte, energia específica de retificação e emissão acústica, apresentando os melhores resultados em todas as variações dos métodos de lubrificação. O maior desgaste dos grãos abrasivos ocasionou o melhor desempenho do rebolo mais friável (GS). Desta forma, a geração de novas arestas de corte com maior frequência culminou em um contato menos intenso em relação as forças atuantes. Além disso, esse efeito minimizou o *ploughing* e o *rubbing* na superfície da peça, o que, conseqüentemente, reduziu as tensões do processo e melhorou os resultados dessas três variáveis;
- Quando analisado a adição de água à técnica de MQL comparado a aplicação de MQL puro, evidenciou-se que o baixo poder de refrigeração do MQL puro foi aprimorado pela melhor capacidade da água em remover calor da interface de corte. Deste modo, obteve-se em decorrência da remoção de calor, uma melhor capacidade de desalojar os cavacos dos poros do rebolo e, conseqüentemente, reduzir os fenômenos de empastamento;

- Além disso, com o MQL diluído associado ao WCJ foi possível remover efetivamente os cavacos alojados nos poros da superfície de corte do rebolo. Logo, os resultados foram muito próximos ao da lubrificação abundante, como verificado nas análises realizadas. Assim sendo, pode-se ampliar o campo de aplicação da técnica de lubrificação por MQL, de modo a minimizar os impactos ao meio ambiente e saúde dos trabalhadores, substituindo o método de lubrificação abundante;
- Portanto, a escolha da aplicação de grãos abrasivos mais ou menos friáveis no rebolo pode ser combinado e otimizado a partir da seleção de uma melhor técnica de lubrificação, de acordo com as necessidades de obtenção de precisões geométricas e dimensionais do componente a ser fabricado. Contudo, foi pertinente explorar a oportunidade de selecionar métodos alternativos de lubrificação, que embora antagônico, culminou em uma possibilidade de similaridade de resultados.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aproveitando a experiência no desenvolvimento científico e tecnológico, pode-se estabelecer algumas sugestões para trabalhos futuros envolvendo a friabilidade de grãos abrasivos na retificação de ferro fundido nodular austemperado aplicado a diferentes técnicas de lubrificação, sendo:

- Utilização de maiores velocidades de avanço, a fim de verificar se o comportamento do rebolo mais friável realmente tornar-se-á uma melhor opção quanto ao consumo de potência, bem como as respectivas consequências nas demais técnicas de lubrificação;
- Realizar estudos de avaliação superficial da peça, destacando a utilização de microscopia eletrônica de varredura e microscopia óptica confocal, difração de raio-x, microscopia de força atômica, utilização de dinamômetro e termopares. De modo a propiciar um melhor entendimento, explorar a influência da friabilidade dos grãos abrasivos no mecanismo de remoção de cavaco, associando a outras diferentes técnicas de lubrificação;
- Avaliar o impacto da adição de água em outros fluidos de corte, como óleos vegetais e nanofluidos, desenvolvendo, também, mecanismos para quantificar a capacidade de lubrificação e refrigeração provida pelo MQL;
- Aplicar campo eletromagnético na interface de corte, com o objetivo de remover cavacos e minimizar o fenômeno de empastamento; além de potencializar o efeito refrigerante de alguns tipos de fluidos de cortes suscetíveis à campo magnético;
- Construir e desenvolver técnicas que tornem exequível a simulação computacional, capaz assim de reproduzir a dinâmica entre os componentes envolvidos e compreender, outros demais impactos passíveis de serem atenuado no processo de retificação.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, H. S. et al. Development of novel sustainable neat-oil metal working fluids for stainless steel and titanium alloy machining. Part 1. Formulation development. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 34, n. 1, p. 21–33, 2007.
- ALEXANDRE, F. A. et al. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 1–4, p. 67–79, 17 abr. 2018.
- ALEXANDRE, F. A. et al. Depth of dressing optimization in CBN wheels of different friabilities using acoustic emission (AE) technique. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 11–12, p. 5225–5240, 5 fev. 2020.
- BELENTANI, R. DE M. et al. Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 88–96, 2013.
- BENEDICTO, E.; CAROU, D.; RUBIO, E. M. Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems Used in Machining Processes. **Procedia Engineering**, v. 184, p. 99–116, 2017.
- 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.
- BIANCHI, E. C. et al. Application of the auxiliary wheel cleaning jet in the plunge cylindrical grinding with Minimum Quantity Lubrication technique under various flow rates. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 233, n. 4, p. 1144–1156, 19 mar. 2019.
- BRINKSMEIER, E. et al. Metalworking fluids - Mechanisms and performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 64, n. 2, p. 605–628, 2015.
- CAMERON, A.; BAUER, R.; WARKENTIN, A. An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 1, p. 126–130, jan. 2010.
- CHOI, H. Z.; LEE, S. W.; JEONG, H. D. A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 111, n. 1–3, p. 265–268, 25 abr. 2001.
- DANIEL, D. M. et al. Grinding comparative between ductile iron and austempered ductile iron under CBN wheel combined to abrasive grains with high and low friability. **The International**

Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 109, n. 9–12, p. 2679–2690, 5 ago. 2020.

DE MARTINI FERNANDES, L. et al. Comparative analysis of two CBN grinding wheels performance in nodular cast iron plunge grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, n. 1–4, p. 237–249, 9 set. 2018.

DE MELLO, H. J. et al. Contribution to cylindrical grinding of interrupted surfaces of hardened steel with medium grit wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 9–12, p. 4049–4057, 3 abr. 2018.

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.

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

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

DING, Z. et al. Investigation of the grinding temperature and energy partition during cylindrical grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, n. 5–8, p. 1767–1778, 2018.

DOMAN, D. A. **Rubbing & Plowing Phases in Single Grain Grinding**. [s.l: s.n.].

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. . Acesso em: 10 fev. 2020

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.

JABBAR, M. A. et al. Respiratory Health Effects of Metalworking Fluid among Metal Machining Workers : Review Article. **Asia Pacific Environmental and Occupational Health Journal**, v. 3, n. 2, p. 15–19, 2017.

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. 2020.

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

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

KATNA, R. et al. Green manufacturing—performance of a biodegradable cutting fluid. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 32, n. 13, p. 1522–1527, 2017.

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

KUFFA, M.; KUSTER, F.; WEGENER, K. Comparison of lubrication conditions for grinding of mild steel with electroplated cBN wheel. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 18, p. 53–59, 1 ago. 2017.

LAWAL, S. A.; CHOUDHURY, I. A.; NUKMAN, Y. **A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: A case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant** **Journal of Cleaner Production**, 2013.

LINKE, B. **Life Cycle and Sustainability of Abrasive Tools**. Cham: Springer International Publishing, 2016.

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

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

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

LOPES, J. C. et al. 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.

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

MALKIN, S.; GUO, C. Thermal Analysis of Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 2, p. 760–782, 2007.

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

MAO, C. et al. Experimental investigation of surface quality for minimum quantity oil-water lubrication grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 59, n. 1–4, p. 93–100, 2012.

MAO, C. et al. The influence of spraying parameters on grinding performance for nanofluid minimum quantity lubrication. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 64, n. 9–12, p. 1791–1799, 2013.

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

MORETTI, G. B. et al. Grinding behavior of austempered ductile iron: a study about the effect of pure and diluted MQL technique applying different friability wheels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 108, n. 11–12, p. 3661–3673, 23 jun. 2020.

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

NIZAMUDDIN, M.; AGRAWAL, S. M.; PATIL, N. The Effect of Karanja based Soluble Cutting Fluid on Chips Formation in Orthogonal Cutting Process of AISI 1045 Steel. **Procedia Manufacturing**, v. 20, p. 12–17, 1 jan. 2018.

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.

OZCELIK, B. et al. Experimental investigations of vegetable based cutting fluids with extreme pressure during turning of AISI 304L. **Tribology International**, v. 44, n. 12, p. 1864–1871, nov. 2011.

PICCIOTTO, S.; LJUNGMAN, P. L.; EISEN, E. A. **Straight metalworking fluids and all-cause and cardiovascular mortality analyzed by using G-estimation of an accelerated failure time model with quantitative exposure: Methods and interpretations** *American Journal of Epidemiology*, 2016.

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

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

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

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

SAID, Z. et al. A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 5–6, p. 2057–2086, 2019.

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

SATO, B. K. et al. Toward sustainable grinding using minimum quantity lubrication technique with diluted oil and simultaneous wheel cleaning. **Tribology International**, v. 147, p. 106276, 1 jul. 2020.

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

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

SHOKOOHI, Y.; KHOSROJERDI, E.; RASSOLIAN SHIADHI, B. H. H. Machining and ecological effects of a new developed cutting fluid in combination with different cooling techniques on turning operation. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 330–339, 2015.

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

STEPHENSON, D. A. J. **Metal cutting theory and practice**. Trird edit ed. [s.l.: s.n.].

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.

TALON, A. G. et al. Effect of hardened steel grinding using aluminum oxide wheel under application of cutting fluid with corrosion inhibitors. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 1–4, p. 1437–1448, 25 set. 2019.

TALON, A. G. et al. Grinding performance of hardened steel: a study about the application of different cutting fluids with corrosion inhibitor. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 108, n. 9–10, p. 2741–2754, 13 jun. 2020.

TAWAKOLI, T. et al. Minimum quantity lubrication in grinding: Effects of abrasive and coolant-lubricant types. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 17–18, p. 2088–2099, nov. 2011.

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

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, 2006.

ZHANG, Z. et al. Grinding performance and tribological behavior in solid lubricant assisted grinding of glass-ceramics. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 51, p. 31–43, 1 mar. 2020.