



ANÁLISE DO DESEMPENHO DA RETIFICAÇÃO DO AÇO VP50IM COM REBOLO DE CARBETO DE SILÍCIO PRETO UTILIZANDO MÉTODO DE LUBRIFICAÇÃO CONVENCIONAL COMPARADA A MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICAÇÃO (MQL) ASSOCIADA À LIMPEZA DO REBOLO

ANDRE BUENO TAVARES – bueno.tavares@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

JOSÉ CLÁUDIO LOPES – claudio.lopes@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

ANTHONY GASPAR TALON – anthony.talon@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

MATHEUS DE SOUZA RODRIGUES – souza.rodrigues@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

EDUARDO CARLOS BIANCHI – eduardo.bianchi@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

ÁREA: *PROCESSOS DE USINAGEM POR ABRASÃO*
SUBÁREA: *ANÁLISES DE MÉTODOS ALTERNATIVOS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO
NA RETIFICAÇÃO VISANDO SUSTENTABILIDADE*

RESUMO: A RETIFICAÇÃO É UM PROCESSO DE USINAGEM POR ABRASÃO QUE DEMANDA POR FLUIDOS DE CORTE DEVIDO A ELEVADA GERAÇÃO DE CALOR. NO ENTANTO, ESSES FLUIDOS SÃO EXTREMAMENTE PREJUDICIAIS À SAÚDE HUMANA E À NATUREZA. A TÉCNICA DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICAÇÃO (MQL) TEM SIDO UMA ALTERNATIVA ESTUDADA, MAS SUA APLICAÇÃO AINDA É LIMITADA DEVIDO À BAIXA REMOÇÃO DE CALOR E AO FENÔMENO DE EMPASTAMENTO DO REBOLO. NESTE CONTEXTO, A PRESENTE PESQUISA INVESTIGOU O DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE LIMPEZA DO REBOLO (WCJ) ASSOCIADO AO MQL (MQL+WCJ) EM TRÊS VELOCIDADES DE AVANÇO COM REBOLO DE CARBETO DE SILÍCIO PRETO, COMPARANDO OS RESULTADOS COM MQL E TÉCNICA CONVENCIONAL (FLUIDO EM ABUNDÂNCIA). OS PARÂMETROS DE SAÍDA AVALIADOS FORAM RUGOSIDADE SUPERFICIAL, DESVIO DE CIRCULARIDADE E DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO. A APLICAÇÃO DO JATO DE LIMPEZA DO REBOLO REDUZIU EM ATÉ 17% A RUGOSIDADE SUPERFICIAL, 16% O DESVIO DE CIRCULARIDADE E 18% O DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO. PORTANTO, A APLICAÇÃO DE WCJ MELHOROU O DESEMPENHO DA TÉCNICA MQL E REFORÇOU SEU POTENCIAL PARA CONTRIBUIR COM UMA PRODUÇÃO MAIS LIMPA EM ESCALA INDUSTRIAL.

PALAVRAS-CHAVES: *RETIFICAÇÃO; REBOLO DE CARBETO DE SILÍCIO PRETO; MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICAÇÃO; LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO; AÇO PARA MOLDES.*

1. INTRODUÇÃO

As indústrias utilizam a retificação como processo de usinagem para obter superfícies com alta precisão geométrica, baixa rugosidade e excelente acabamento superficial (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2007). A ferramenta abrasiva é composta por grãos abrasivos distribuídos aleatoriamente em sua superfície e conectados por um ligante (DA SILVA et al., 2020; ROWE, 2014). Esses grãos abrasivos são responsáveis pela remoção do material da peça.

Como a retificação é geralmente a etapa final da linha de produção, erros nesta etapa podem resultar em perdas significativas devido ao seu alto valor agregado (DA SILVA et al., 2020; ROWE, 2014).

Uma vez que esforços significativos são necessários para realizar o processo de usinagem, resultando em aumento de energias de retificação e temperaturas elevadas na interface entre a peça e a ferramenta, podem ocorrer danos térmicos à peça, como alterações microestruturais e desvios geométricos, e ao rebolo, incluindo alterações nas características dos grãos (DE MARTINI FERNANDES et al., 2018; JAVARONI et al., 2020a). Portanto, a implementação de um método eficaz de lubrificação durante a usinagem torna-se essencial (MAO et al., 2013).

Segundo (KALITA et al., 2012), os fluidos de corte são cruciais para melhorar o processo de retificação. Esses fluidos desempenham quatro funções principais: reduzir o atrito lubrificando a área de contato entre a peça e o rebolo, remover o calor por convecção da zona de corte, remover cavacos da superfície usinada e proteger a máquina contra corrosão (JAVARONI et al., 2019). Consequentemente, a indústria emprega amplamente o fluido de corte convencional, que envolve a injeção de um grande volume de fluido na superfície de trabalho, normalmente em emulsão de 2 a 5% de óleo em água (DEMIRBAS; KOBAYASHI, 2017). Como a indústria de processamento metal-mecânico ainda depende da técnica convencional de refrigeração-lubrificação, têm-se elevados custos de consumo, descartes e danos ambientais associados ao uso de fluidos de corte.

No entanto, apesar das vantagens do controle térmico, o método convencional de fluido de corte apresenta diversas desvantagens. O óleo utilizado na emulsão é altamente

poluente, exigindo métodos de descarte específicos que aumentam os custos de usinagem (LOPES et al., 2020). Além disso, o contato com a pele ou a inalação da névoa gerada durante a usinagem pode levar a graves doenças respiratórias e cutâneas, conforme indicado pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) (DA SILVA et al., 2020; DEBNATH; REDDY; YI, 2016; OZCELIK et al., 2011).

Neste contexto, a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) se apresenta como uma alternativa para reduzir a dependência no método convencional. O método MQL envolve a aplicação de uma mistura composta por um jato de ar comprimido e uma pequena quantidade de fluido de corte na zona de corte (TALON et al., 2020).

Notavelmente, existem diferenças significativas entre os dois métodos, já que o método tradicional utiliza fluido de corte a uma vazão de 17 L/min, enquanto o MQL emprega uma vazão próxima a 0,10 L/h (DANISH et al., 2021).

Segundo (BIANCHI et al., 2018) o método MQL utiliza um fluxo de ar com gotículas de óleo atomizadas direcionadas à zona de corte. Essa técnica reduz o volume de óleo empregado em 88,9% a 99,9% em comparação ao processo de lubrificação convencional. Como resultado, reduz custos e emissões de CO₂ na cadeia de produção, beneficiando a indústria e o meio ambiente (SATO et al., 2022b).

No entanto, a capacidade reduzida de limpeza da superfície de corte do rebolo na técnica MQL torna a ferramenta abrasiva mais propenso ao fenômeno de empastamento, resultando em menor desempenho de corte à medida que os grãos abrasivos ficam cobertos pelo material da peça. Isso, por sua vez, aumenta o atrito e a temperatura durante a retificação (ABBAS et al., 2019; HEINZEL; ANTSUPOV, 2012; RODRIGUEZ et al., 2019). Para sobrepujar esse problema, combinar a técnica MQL com um sistema auxiliar de jato de limpeza do rebolo (WCJ) oferece uma solução potencial para melhorar o processo. Além disso, WCJ demonstra resultados promissores como tecnologia complementar (LOPES et al., 2019a).

Assim como os parâmetros de entrada, compreender a influência do material usinado é de extrema importância (LOPES et al., 2022). A Plastics Europe Association informou que a produção global de plástico atingiu 360 milhões de toneladas em 2018, enfatizando a importância do aço para moldes neste contexto (DA SILVA et al., 2021). No segmento de injetores para moldes plásticos, o aço VP50IM se destaca como um dos materiais mais utilizados. Esta aplicação exige alta resistência mecânica para garantir a repetibilidade da produção de plástico. O aço VP50IM possui excepcional resistência ao desgaste e fácil usinabilidade, tornando-o uma escolha indispensável para aços para moldes (HUANG et al.,

2017). A produção de moldes é uma tarefa complexa e as propriedades do material selecionado desempenham um papel vital na obtenção do acabamento adequado do produto, principalmente na usinabilidade, capacidade de polimento e compatibilidade com tratamentos térmicos (GUIMARÃES et al., 2019).

Além disso, o aço para moldes usado em injetores de polímero requer uma rugosidade Ra menor, idealmente menor que 1 μm . Portanto, os resultados da pesquisa sobre materiais superiores, métodos de resfriamento de lubrificação e parâmetros de corte são significativos para as indústrias, especialmente nos setores de plástico e vidro em geral. Esses avanços permitem custos mais baixos, impacto ambiental reduzido, tempos de produção mais curtos e melhor qualidade da superfície (LI et al., 2015). Portanto, determinar as condições ideais de usinagem para esses aços é essencial, considerando o papel crítico da retificação na produção de moldes de alta qualidade.

O presente estudo aborda a retificação do aço VP50IM utilizando métodos convencionais de lubri-refrigeração e MQL com e sem limpeza da superfície de corte do rebolo. A avaliação dos parâmetros como rugosidade superficial e desvio de circularidade revelou a superioridade do sistema tradicional sobre o MQL em todas as velocidades de avanço. Este resultado pode ser atribuído ao maior volume de fluido empregado no método convencional, que proporciona capacidades superiores de lubrificação e refrigeração, reduzindo assim as tensões mecânicas e potenciais deformações térmicas (LOPES et al., 2022).

SATO et al., (2022a) obtiveram resultados semelhantes ao retificar o aço VP50IM usando carbeto de silício verde. Os autores chegaram a conclusão que o método convencional produziu a menor rugosidade superficial, enquanto a técnica MQL resultou em uma rugosidade superficial 14% maior.

Complementarmente, MORETTI et al. (2021), usando um rebolo de óxido de alumínio, obtiveram resultados comparáveis para o aço VP50IM, concluindo que empregar a técnica MQL com uma taxa de avanço de 0,25 mm/min resultou em um aumento de apenas 13% na rugosidade superficial.

Assim, fica evidente que a técnica MQL sozinha não supera os resultados obtidos pelo método convencional. Consequentemente, avaliar a associação da técnica MQL ao jato de limpeza do rebolo (WCJ) torna-se interessante. Ao pesquisar artigos e estudos sobre o aço para molde VP50IM, foi observada uma lacuna notável na literatura, exigindo mais investigação (DA SILVA et al., 2021). Dada a importância dos moldes na indústria e o uso extensivo de retificação nesse meio, esta pesquisa visa aprimorar o conhecimento científico

sobre a retificação do aço para moldes VP50IM utilizando rebolo de carbeto de silício preto sob três diferentes técnicas de lubrificação visando reduzir os impactos ambientais provenientes da técnica convencional (uso de fluido de corte em abundância) e ainda assim, mantendo a qualidade do produto concebido.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Retificadora, corpos de prova e rebolo

Foi utilizada uma retificadora CNC cilíndrica de mergulho, modelo RUAP 515H do fabricante SULMECÂNICA LTDA.

Os corpos de prova foram confeccionados em aço VP50IM. As peças foram preparadas em torno CNC em formato de anel, obtendo diâmetro externo inicial de 75 mm, espessura de 4 mm e furo de 30 mm para fixação das peças da retificadora no porta-mandril. Durante cada ciclo de retificação foram removidos 78,54 mm³, obtendo-se um diâmetro final de 70 mm.

A composição química do aço VP50IM é apresentada na Tabela 1. O material possui excelentes propriedades mecânicas para construção de moldes de injeção e extrusão de termoplásticos.

O rebolo utilizado foi um Carbeto de Silício Preto ligante vitrificado, dureza média e granulometria 60, modelo C60L7V fabricado pela empresa SULMECÂNICA LTDA.

Tabela 1: Composição Aço VP50IM.

Elemento	C	Si	Mn	Mo	Ni	Al	Cu	S
Percentual em massa (%)	0,15	0,30	1,55	0,30	3,00	1,00	1,00	0,10

Fonte: Villares Metais

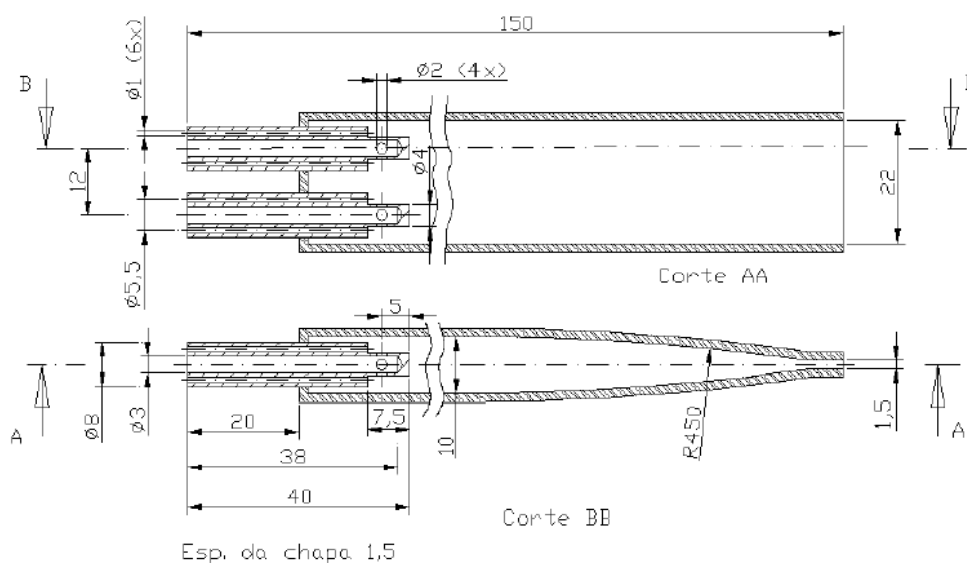
2.2 Sistemas de lubri-refrigeração e limpeza da superfície de corte do rebolo (WCJ)

O sistema convencional é composto por um tanque de 100 litros para armazenamento do fluido, uma bomba de sucção, mangueiras e um bico fixo para aplicação do fluido, que é um refrigerante de base semissintética e está comercialmente disponível como ME-1, fornecido pela Quimatic Tapmatic Brasil Ltda. O fluido foi utilizado como emulsão na concentração de 3%. A vazão do fluido de corte foi de 10 l/min e a pressão de trabalho de 0,4 MPa.

O sistema MQL era composto por compressor, regulador de pressão, medidor de

vazão de ar, válvula dosadora de fluido de corte (equipamento MQL) e bico projetado para utilização do MQL na retificação, conforme Figura 1. O compressor utilizado foi do fabricante Compressores Schulz modelo MSV 30, com vazão teórica de 850 L/min. O equipamento MQL foi fornecido pela ITW Chemical Products, modelo Accu Lube 79053D, que foi utilizado com pressão de trabalho constante de aproximadamente 0,6 MPa. Este equipamento permite ajustar individualmente o fluxo de ar e lubrificante. Para as análises da técnica MQL, foi utilizado fluido ITW Chemical Products modelo Biocut 9000 com diluição de uma parte de óleo para cinco partes de água e vazão de 0,120 l/min.

Figura 1. Desenho técnico com vistas superior e lateral do bocal de aplicação MQL.



Fonte: O autor.

O sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo (WCJ) foi composto pelos seguintes componentes: compressor, medidor de vazão e pressão de ar comprimido, distribuidor de vazão e bocal. O fluxo de ar comprimido foi monitorado por um medidor de vazão tipo turbina e o bocal acoplado a uma distância de 1 mm da superfície de corte do rebolo com ângulo de incidência de 30° da normal que, segundo (Oliveira et al.), proporciona o melhor desempenho para a técnica. O sistema de limpeza do rebolo e o sistema MQL eram independentes, evitando sobrecarga do compressor e variações de pressão. A pressão de trabalho utilizada foi de 0,6 MPa.

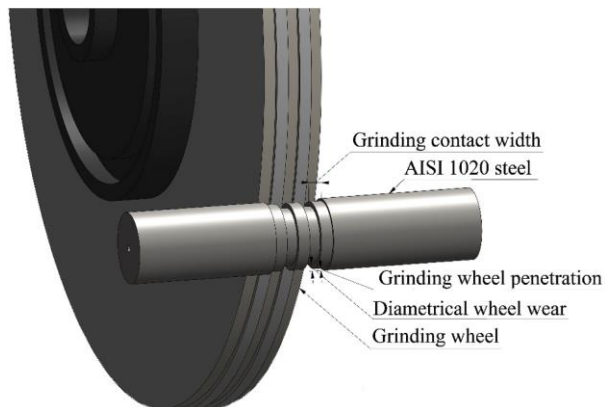
2.3 Procedimento Experimental

Os parâmetros de entrada foram mantidos constantes, com exceção do método de lubrificação e sistema de limpeza do rebolo com o objetivo de investigar a influência dessas técnicas no processo de retificação. Os métodos de lubri-refrigeração comparados foram convencional, MQL sem WCJ e MQL com WCJ em temperatura ambiente. Os ensaios foram realizados com as taxas de avanço de 0,25 mm/min, 0,5 mm/min e 0,75mm/min, velocidade de corte de 32 m/s, a velocidade da peça de 163 rpm e o tempo de centelhamento de 8 s.

A medição da rugosidade média superficial (R_a) foi realizada com um perfilômetro Taylor Hobson modelo Surtronic3+, perpendicularmente às marcas de retificação. Após cada ensaio, foram medidos dez pontos diferentes equidistantes (espaçamento de 36°) e calculados os valores médios. O dispositivo foi ajustado com corte de 0,8mm e comprimento de avaliação de 1,25mm.

O desgaste diametral do rebolo foi medido através da impressão do perfil da superfície desgastada do rebolo em uma amostra de superfície cilíndrica (37 mm de diâmetro x 40 mm de comprimento) fabricada em aço dúctil ABNT1020. O desgaste diametral foi medido pelo mesmo equipamento utilizado nas medições de rugosidade. A Figura 2 mostra a configuração para medição do rebolo e a figura 3 apresenta o layout da técnica MQL associada a limpeza da superfície de corte do rebolo.

Figura 2 - Esquema para impressão do desgaste do rebolo em corpo de prova.



Fonte: O autor.

Figura 3. Esquema retificadora com sistema MQL+WCJ



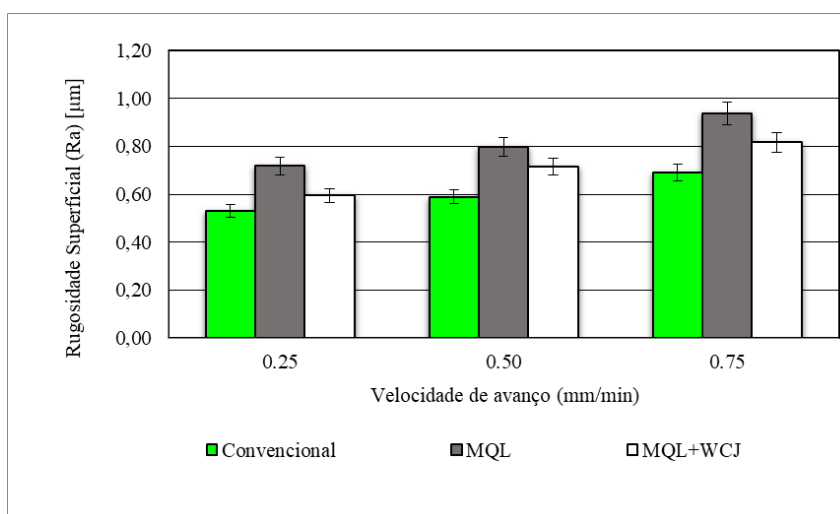
Fonte: O autor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Rugosidade Superficial

O processo de retificação exige excelente acabamento superficial. Portanto, estimar a rugosidade superficial é uma etapa crucial para determinar a qualidade dos produtos fabricados (KAREGOUDRA; YENDAPALLI, 2023). A Figura 4 apresenta o parâmetro rugosidade média superficial (R_a) para cada condição de lubri-refrigeração e velocidade de avanço.

Figura 4. Rugosidade média superficial (R_a) por condição de lubri-refrigeração e velocidade de avanço.



Fonte: O autor.

Os menores valores de rugosidade superficial foram obtidos na velocidade de avanço de 0,25 mm/min para todas as condições analisadas. Segundo ROWE (2014), maiores taxas de avanço geram um aumento na taxa de remoção de material. Porém, também aumenta as forças de corte e a rugosidade superficial. Pode-se observar que para todas as taxas de avanço a técnica convencional proporcionou os melhores resultados. Isso era esperado, pois a condição que utiliza fluidos de corte em abundância possibilita maior remoção de calor da peça e do rebolo, visto que este possui maior vazão e muita água em sua composição (a água possui maior calor específico em relação ao óleo e ao ar), resultando em menor temperatura durante a retificação. Além disso, a técnica convencional permite uma ótima remoção de cavacos da zona de corte, evitando a ocorrência do fenômeno de empastamento do rebolo. Por outro lado, os resultados da técnica MQL foram inferiores ao método convencional e MQL+WCJ em todas as velocidades de avanço. Embora o MQL tenha uma qualidade de lubrificação excepcionalmente superior, ele apresenta algumas limitações em relação ao escoamento de cavacos, capacidade de refrigeração e entupimento dos poros do rebolo. Essas limitações permitem que os cavacos soltos se alojem nos poros do rebolo, proporcionando o entupimento do rebolo e resultando em atrito entre material não desejado. Além disso, os cavacos que cobrem as arestas de corte dos grãos abrasivos reduzem o número de grãos ativos, aumentando o comprimento entre dois grãos ativos e resultando em superfícies mais irregulares (HATAMI; ADIBI; REZAEI, 2022; PATRA; SWAIN, 2022).

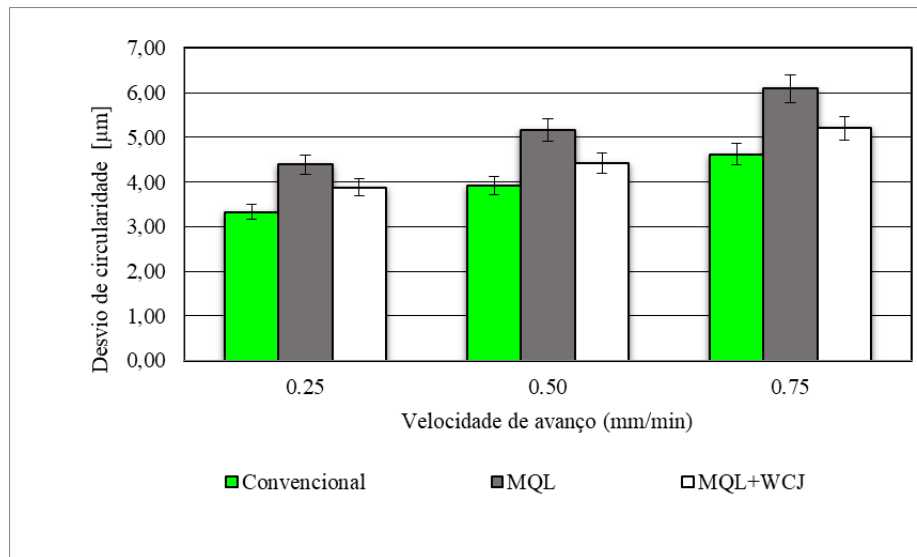
Por outro lado, MQL+WCJ proporcionou melhores resultados em comparação com MQL (reduzido em 17% dos valores de rugosidade superficial) e resultados semelhantes à condição convencional (na taxa de avanço de 0,25 mm/min, o resultado de rugosidade superficial foi apenas 12% maior). O sistema de limpeza do rebolo (WCJ) produz uma película de ar comprimido entre a superfície retificada e a superfície do rebolo, evitando que os cavacos se alojem nos poros do rebolo. Além disso, a capacidade de resfriamento do MQL é aumentada, uma vez que o fluxo de ar rouba o calor da zona de corte e reduz a temperatura de retificação, diminuindo os ciclos de dilatação e evitando o desgaste do rebolo, o que melhora a rugosidade da superfície (JAVARONI et al., 2020b).

3.2 Desvio de circularidade

A medição do desvio de circularidade é dada pela diferença de raios entre os diâmetros de dois círculos concêntricos (HENZOLD, 2021). É um parâmetro geométrico da peça e desempenha um papel importante quando são necessários requisitos de precisão. A Figura 5 apresenta os resultados de desvio de circularidade de acordo com as condições de lubri-

refrigeração sob diferentes velocidades de avanço.

Figura 5. Desvio de circularidade por condição de lubri-refrigeração e velocidade de avanço.



Fonte: O autor.

Segundo KWAK (2005), a ocorrência de desvios geométricos no processo de retificação é causada principalmente por efeitos térmicos e rigidez do sistema de retificação. O autor examinou profundamente os aspectos térmicos e propôs que a propagação do calor durante a retificação pode gerar expansão térmica na superfície da peça em formato convexo. Portanto, a profundidade real de corte não é constante e é mais profunda do que a intenção inicial, levando a desvios geométricos de dezenas de micrômetros dependendo das condições de retificação aplicadas. Além disso, eles descobriram que a rigidez do sistema de retificação desempenha um papel importante na precisão geométrica, especialmente de componentes como o fuso da retificadora, o rebolo e a mesa de retificação.

Olhando nesta direção, notou-se a mesma tendência em relação à rugosidade superficial quando comparada ao desvio de circularidade. A técnica convencional proporcionou os melhores resultados. Como a rigidez da máquina ferramenta foi a mesma para todas as condições testadas, os aspectos térmicos foram os fatores que variaram durante os ensaios. Sabendo que a capacidade de remoção de calor da técnica convencional supera o desempenho das técnicas MQL e MQL+WCJ, é óbvio que o desvio de circularidade para a condição convencional apresentaria valores mais baixos. Além disso, uma maior vazão de fluido (convencional de 10 l/min contra MQL de 0,120 l/min) também contribuiu consideravelmente para um melhor resultado da técnica. Resumidamente, temperaturas mais

baixas no rebolo evitam que os grãos abrasivos se soltem do ligante e controlam a expansão térmica da peça, evitando alterações na profundidade de corte, contribuindo para estabilizar o processo de retificação.

Na direção oposta, a técnica MQL apresentou o pior resultado (32% superior à técnica convencional), aumentando a sua desvantagem no que se refere a dissipação de calor. Além disso, a dificuldade de remoção de cavacos da zona de corte promove o fenômeno de empastamento dos poros do rebolo, e a superfície do rebolo fica coberta com material da peça, alterando a geometria dos grãos abrasivos e elevando o atrito entre o rebolo e a peça, gerando mais calor, levando a maior expansão térmica.

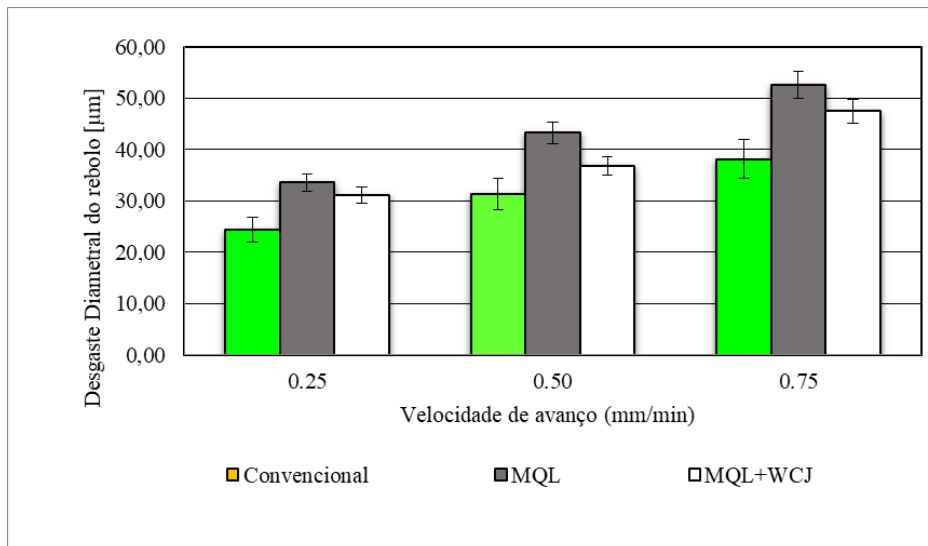
Por fim, MQL+WCI apresentou resultados próximos aos da técnica convencional (apenas 14% maiores em média), o que provou aumentar a remoção de calor do rebolo e reduzir as temperaturas de retificação. Além disso, o fenômeno do empastamento do rebolo é minimizado pelo jato de ar comprimido (WCI), mantendo a superfície de corte do rebolo mais limpa, reduzindo o atrito desnecessário promovido pelos cavacos soldado ao rebolo (OLIVEIRA et al., 2012). Portanto, semelhante aos resultados obtidos por JAVARONI et al. (2020b), o desvio de circularidade é altamente melhorado quando WCI é aplicado à técnica de lubri-refrigeração MQL.

3.3 Desgaste diametral do rebolo

O desgaste diametral do rebolo é consequência do atrito entre a peça e a superfície do rebolo, fratura do ligante e do grão abrasivo. A ocorrência se deve às solicitações de trabalho a que o rebolo é submetido e à deterioração térmica do ligante quando exposto ao calor (BIANCHI et al., 2018).

Segundo LOPES et al. (2023) o custo do rebolo pode chegar a 10% do custo final do processo de retificação. Assim, o desgaste do rebolo e a relação G são variáveis relevantes a serem monitoradas, pois afetam o custo-benefício do processo de retificação. A Figura 6 apresenta o desgaste diametral do rebolo para cada condição de lubri-refrigeração sob três velocidades de avanço.

Figura 6. Desgaste diametral do rebolo por condição de lubri-refrigeração e velocidade de avanço.



Fonte: O autor.

Inicialmente, pode-se notar que o desgaste diametral do rebolo aumenta à medida que aumenta a taxa de avanço. Maior taxa de avanço promove maior geração de calor, aumentando assim a temperatura do rebolo e da peça. Temperaturas extremas na superfície da peça levam a uma deformação plástica prolongada durante a remoção de cavacos na retificação. Portanto, os cavacos tendem a se alojar nos poros do rebolo. Consequentemente, a superfície do rebolo fica coberta e as arestas de corte dos grãos abrasivos são alteradas, promovendo mais atrito entre os cavacos fundidos na superfície do rebolo e a superfície da peça (para esta pesquisa, superfícies de contato de aço com aço). Além disso, o calor excessivo pode intensificar a deterioração do ligante, aumentando o desprendimento dos grãos e aumentando o desgaste do rebolo (LOPES et al., 2023).

Analisando os gráficos apresentados, quanto mais severo for o processo de retificação com maior avanço, maior será a diferença entre os valores das técnicas convencional, MQL e MQL+WCI para desgaste diametral do rebolo. A técnica convencional obteve os melhores resultados para o desgaste diametral do rebolo em todas as taxas de avanço testadas, o que era esperado, uma vez que o resfriamento é mais crítico do que a lubrificação quando se analisa a análise essa variável de saída. Além disso, a técnica de fluido de corte em abundância provou manter os valores de temperatura na zona de corte, no rebolo e na superfície da peça abaixo dos valores das condições MQL e MQL+WCI. Por outro lado, o MQL apresentou os piores valores de desgaste diametral do rebolo devido ao fenômeno de empastamento (valores, em média, 38% superiores à técnica convencional para todas as taxas de avanço). Já a técnica MQL+WCI, reduziu, em média, 12% o desgaste diametral do rebolo em comparação com o

MQL sem WCJ e comprovou sua eficiência ao aumentar a vida útil da ferramenta. O jato de ar comprimido atuando na superfície de corte do rebolo certamente reduziu o fenômeno de empastamento do rebolo e, portanto, controlou a temperatura do processo, reduzindo o atrito entre materiais indesejados. Resultados semelhantes foram obtidos por GARCIA et al. (2020), nos quais foram testadas diferentes diluições de água em óleo nas técnicas MQL com e sem WCJ. Os autores notaram que o desgaste do rebolo diminuiu para todos os métodos MQL testados ao usar jato de limpeza do rebolo. Por fim, o MQL+WCJ demonstrou sua eficácia ao apresentar resultados satisfatórios e muito próximos dos obtidos com a técnica convencional, comprovando sua competitividade e apoiando sua aplicabilidade na indústria.

4. CONCLUSÃO

- A rugosidade superficial resultante utilizando a técnica MQL é 25% maior se comparada ao método convencional. Porém, a diferença é reduzida para 15% com a ajuda do sistema WCJ. Portanto, a rugosidade da superfície é bastante melhorada pelo WCJ, especialmente devido a redução do fenômeno do empastamento do rebolo.

- No tocante ao desvio de circularidade, o MQL fornece resultado 32% maior que o sistema convencional, porém o WCJ reduziu a diferença para 16% devido a maior dissipação de calor do processo, controlando a expansão térmica na zona de corte a qual afeta diretamente a circularidade da peça.

- O desgaste diametral do rebolo é o parâmetro com menor sensibilidade ao sistema WCJ. Em média, o desgaste é reduzido em 12% quando se associa WCJ ao MQL.

Finalmente, a associação de MQL+WCJ mostrou-se uma condição relevante uma vez que todos os aspectos relacionados à qualidade da peça foram melhorados. Além disso, foi possível reduzir em 83 vezes o volume de fluido utilizado no processo de retificação e ainda assim atender as tolerâncias exigidas pelo processo. Portanto, MQL+WCJ pode ser uma alternativa promissora ao método convencional, apresentando resultados compatíveis com um sólido benefício de redução drástica do volume de fluido utilizado, proporcionando uma fabricação mais limpa.

REFERÊNCIAS

ABBAS, A. T. et al. Sustainability assessment associated with surface roughness and power consumption characteristics in nanofluid MQL-assisted turning of AISI 1045 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 1–4, p. 1311–1327, 1 nov. 2019.

- BIANCHI, E. C. et al. Plunge cylindrical grinding with the minimum quantity lubrication coolant technique assisted with wheel cleaning system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 2907–2916, 1 mar. 2018.
- DA SILVA, A. E. et al. Behavior of austempered ductile iron (ADI) grinding using different MQL dilutions and CBN wheels with low and high friability. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 11–12, p. 4373–4387, 27 abr. 2020.
- DA SILVA, A. E. et al. Grinding behavior of VP50IM steel using green and black silicon carbide compared to aluminum oxide wheel under different feed rates. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 117, n. 9–10, p. 2639–2653, 2021.
- DANISH, M. et al. Machinability investigations on CFRP composites: a comparison between sustainable cooling conditions. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 114, n. 11, p. 3201–3216, 2021.
- 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.
- 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.
- DEMIRBAS, E.; KOBAYASHI, M. Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 105, p. 79–90, 1 jan. 2017.
- 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.
- GUIMARÃES, C. et al. Evaluation of surface and sub-surface integrities of a mold steel under different grinding conditions. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 10, p. 435, 2019.
- HATAMI, O.; ADIBI, H.; REZAEI, S. M. Application of a compressed air jet for cleaning of wheel surface in grinding nickel-based super alloy Inconel 718. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 37, p. 233–244, maio 2022.
- HEINZEL, C.; ANTUSPOV, G. Prevention of wheel clogging in creep feed grinding by efficient tool cleaning. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1, p. 323–326, 2012.
- HENZOLD, G. Inspection of Geometrical Deviations (Verification). Em: **Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection**. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 309–409.

- HUANG, W.-T. et al. Multiple quality characteristics of nanofluid/ultrasonic atomization minimum quantity lubrication for grinding hardened mold steel. **IEEE transactions on automation science and engineering**, v. 15, n. 3, p. 1065–1077, 2017.
- JAVARONI, R. L. et al. Minimum quantity of lubrication (MQL) as an eco-friendly alternative to the cutting fluids in advanced ceramics grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, n. 5–8, p. 2809–2819, 28 ago. 2019.
- JAVARONI, R. L. et al. Grinding hardened steel using MQL associated with cleaning system and cBN wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 5–6, p. 2065–2080, 13 mar. 2020a.
- JAVARONI, R. L. et al. Improvement in the grinding process using the MQL technique with cooled wheel cleaning jet. **Tribology International**, v. 152, p. 106512, 4 dez. 2020b.
- KALITA, P. et al. Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication grinding using oil-based nanolubricants. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 14, n. 2, p. 160–166, abr. 2012.
- KAREGOUDRA, S.; YENDAPALLI, V. A systematic review on non-contact methods to estimate the surface roughness. **Materials Today: Proceedings**, jun. 2023.
- KWAK, J.-S. Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 3, p. 327–334, mar. 2005.
- LI, B. et al. Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 29, n. 4, p. 1084–1095, 2016.
- LI, H. et al. Analysis of loads on grinding wheel binder in grinding process: insights from discontinuum-hypothesis-based grinding simulation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 78, n. 9–12, p. 1943–1960, 2015.
- 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. 2019a.
- LOPES, J. C. et al. Performance of austempered ductile iron (ADI) grinding using diluted oil in MQL combined with wheel cleaning jet and different CBN grains friability. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 3–4, p. 1805 – 1818, 2020.
- LOPES, J. C. et al. Manufacturing process linked to the MQL compared to flood lubrication applied to the grinding of VP50IM steel using black silicon carbide wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 120, n. 5, p. 4179–4190, 2022.
- LOPES, J. C. et al. Sustainable thinking toward to industry's future combined with new knowledge on greenhouse effect mitigation generated by the grinding process. **Journal of Cleaner Production**, v. 386, 2023.

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

MAO, C. et al. Analysis of heat transfer coefficient on workpiece surface during minimum quantity lubricant grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 66, n. 1, p. 363–370, 2013.

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

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.

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.org/10.1016/j.jmpt.2012.05.001>. **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.

PATRA, S. K.; SWAIN, S. Effects of minimum quantity lubrication (MQL) in grinding: Principle, applications and recent advancements. **Materials Today: Proceedings**, v. 69, p. 96–106, 2022.

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.

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

SATO, B. K. et al. Evaluating the effect of MQL technique in grinding VP50IM steel with green carbide wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 121, n. 11, p. 7287–7294, 2022a.

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. 2022b.

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.