

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

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

RAFAEL LEMES RODRIGUEZ

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO COM APLICAÇÃO
SIMULTÂNEA DA TÉCNICA DE MQL E JATO DE LIMPEZA NA
SUPERFÍCIE DO REBOLO**

BAURU

2021

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO COM APLICAÇÃO
SIMULTÂNEA DA TÉCNICA DE MQL E JATO DE LIMPEZA NA
SUPERFÍCIE DO REBOLO**

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

Área de concentração: Processos de fabricação

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Co-orientador: Prof. Ms. José Claudio Lopes

BAURU

2021

Rodriguez, Rafael Lemes.

Avaliação do processo de retificação com aplicação simultânea da técnica de MQL e jato de limpeza na superfície do rebolo / Rafael Lemes Rodriguez, 2021
26 p.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi
Coorientador: José Claudio Lopes

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021

1. Retificação. 2. MQL. 3. Refrigerante 4. Jato de Limpeza 5. Fenômeno de Empastamento. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RAFAEL LEMES RODRIGUEZ, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 24 dias do mês de junho do ano de 2021, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RAFAEL LEMES RODRIGUEZ, intitulada **AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO COM APLICAÇÃO SIMULTÂNEA DA TÉCNICA DE MQL E JATO DE LIMPEZA NA SUPERFÍCIE DO REBOLO**. 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, Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Materiais e Tecnologia / Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI



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

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

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

À Raffaella pelo amor, apoio e paciência.

AGRADECIMENTOS

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

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

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

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

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

“A persistência é o menor caminho do êxito”

Charles Chaplin

RESUMO

Nos últimos anos, diversos pesquisadores têm proposto melhorias à técnica de lubrificação por mínima quantidade de lubrificante (MQL), a fim de aumentar sua eficiência e torná-la uma alternativa viável à aplicação convencional de fluidos de corte para uma usinagem mais limpa. Além do efeito de lubrificação inerente à técnica MQL, busca-se a limpeza do rebolo, uma vez que sua superfície está relacionada à ocorrência do fenômeno de empastamento que resulta em diminuição do desempenho do processo. O principal objetivo deste estudo foi avaliar a influência do jato de limpeza na tentativa de reduzir o fenômeno de empastamento do rebolo e aumentar as eficiências de resfriamento na retificação externa cilíndrica do aço AISI 4340 sob a aplicação da técnica MQL com rebolo de óxido de alumínio. O MQL combinado com o jato de limpeza foi comparado à lubrificação abundante (convencional) e MQL sem limpeza (tradicional). A retificação com MQL empregou vazões de 30, 60 e 120 mL/h para avaliar os efeitos da quantidade de fluido no processo de retificação. Os métodos convencionais e MQL com limpeza produziram os menores valores de rugosidade superficial e desvio de circularidade em comparação com os outros métodos usados, devido ao fato de manterem a afiação do rebolo por mais tempo. Além disso, os métodos convencionais e MQL com limpeza aumentaram a relação G e reduziram as forças tangenciais de retificação e a energia específica em comparação com o MQL tradicional. O método MQL com limpeza possibilitou a remoção de parte dos cavacos aderidos na superfície ativa do rebolo quando comparado ao MQL tradicional, reduzindo o empastamento do rebolo, que é um dos motivos da perda de afiação do rebolo. A forma de cavacos tubulares ocorreu não apenas na retificação MQL com limpeza, mas também na retificação MQL tradicional, embora esta morfologia não seja mencionada na literatura.

Palavras-chave: Retificação, MQL, Refrigerante, Jato de Limpeza, Fenômeno de Empastamento.

ABSTRACT

In the last years, many researchers have proposed improvements to the minimum quantity lubrication (MQL) technique, in order to increase its efficiency and make it a viable alternative to the conventional application of cutting fluids for a cleaner machining. Besides the lubricating effect inherent to the MQL technique, the cleaning of grinding wheel is pursued, since its surface undergoes the clogging phenomenon resulting in decreasing of the process performance. The main objective of this study is to assess the influence of the auxiliary wheel cleaning jet (WCJ) in an attempt to reduce the wheel clogging phenomenon and increase lubricating and machining efficiencies in the cylindrical external grinding of AISI 4340 steel under the application of the MQL technique using aluminum oxide grinding wheel. The MQL combined with cleaning jet was compared to both flood application (conventional) and MQL without WCJ (traditional). MQL grinding employed oil flow rates of 30, 60 and 120 mL/h in order to evaluate the effects of amount of grinding fluid in the assessment. The conventional and MQL + WCJ methods produced lower surface roughness and roundness deviation compared to the other methods used due to the fact that they kept the wheel sharpness longer. Moreover, conventional and MQL + WCJ methods increased G ratio and reduced tangential grinding forces and specific energy in comparison to traditional MQL. The MQL + WCJ method enabled the removal of part of chips adhered on the grinding wheel active surface (GWAS) when compared to the traditional MQL, reducing the wheel clogging, which is one of the reasons for loss of wheel sharpness. Tubular chip form occurred not only in MQL + WCJ grinding but also in traditional MQL grinding, although it is not mentioned in literature.

Keywords: Grinding, MQL, Coolant, Cleaning jet, Clogging phenomenon

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Motivação	12
1.2 Objetivos.....	13
1.3 Objetivos Específicos.....	13
2 RELATO	14
3 ESTRUTURA DO ARTIGO	14
3.1 Resumo	14
3.2 Introdução	14
3.3 Materiais e Métodos.....	14
3.4 Resultados e Discussão	15
3.4.1 Rugosidade Superficial.....	15
3.4.2 Superfície do rebolo e da peça	15
3.4.3 Cavacos de retificação.....	15
3.4.4 Desvio de Circularidade	15
3.4.5 Relação G	16
3.4.6 Força tangencial e energia específica.....	16
3.5 Conclusão	16
4 CITAÇÃO DO ARTIGO	17
5 CONCLUSÃO.....	18
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	20
7 REFERÊNCIAS.....	21

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Boswell et al. (2017), o desempenho dos processos tradicionais de usinagem está fortemente relacionado com a aplicação do fluido de corte na zona de contato peça/ferramenta, que tem como objetivo diminuir a temperatura na interface e a força de corte. No processo de retificação, grande quantidade de energia é gerada devido à ação de pequenas e múltiplas arestas de corte dos grãos abrasivos do rebolo, que se movem contra o material da peça e resultam em atrito, cisalhamento e deformação elástica e plástica. Marinescu et al. (2016) explicam que toda essa energia é convertida em calor e é particionada ente rebolo, peça de trabalho, cavaco e fluido lubrificarrefrigerante. A aplicação de fluido de corte na zona de corte reduz a geração de calor, em especial o calor dissipado através da peça. Irani et al. (2005) afirmam que a deformação e consequentemente a potência de corte são reduzidas porque parte do calor é removido da zona de corte pela função refrigerante dos fluidos de corte.

Por outro lado, a maioria dos fluidos de corte representa preocupação ao meio ambiente e à saúde humana. Segundo Brinksmeier et al. (2010), eles podem resultar em irritação grave da pele e doenças ao operador, como dermatite e asma. A ocorrência de aerossóis perigosos é prejudicial à pele humana e produzem risco de inalação tóxica devido às altas velocidades e pressões periféricas as quais os fluidos de corte são empregados. O custo total com refrigerantes também é crítico; Walker (2013) apresenta que eles podem representar 8-16% do custo total de usinagem e inclui armazenamento complexo, filtragem, descarte de resíduos e sistemas, além da energia consumida e capital humano. Isso resulta em custos mais altos do que os custos de ferramentas. Ramesh et al. (2013) descrevem a técnica convencional de lubrificarrefrigeração como um dos principais poluidores ambientais no processo de usinagem. Apesar disso, Shen e Shi (2009) afirmam que o fluido de corte à base de água aplicado pelo método convencional é a técnica mais comum de lubrificarrefrigeração utilizada no processo de usinagem, devido aos seus ótimos efeitos de resfriamento e lubrificação.

A fim de reduzir as temperaturas do processo de retificação, melhorar o efeito de lubrificação e proteger o meio ambiente, a técnica de quantidade mínima de lubrificação (MQL) tem sido amplamente divulgada na literatura. A técnica de MQL foi desenvolvida na Alemanha entre 1996 e 2000 em alguns institutos de pesquisa em parceria com a indústria automotiva. Boswell et al. (2017) descrevem que o movimento das empresas manufatureiras em direção à sustentabilidade na produção tem sido impulsionado por legislações governamentais mais rígidas e pela mudança da opinião pública. As empresas estão dedicando esforços para se tornarem ecologicamente corretas, a fim de evitar futuras penalidades financeiras e contribuir

para uma produção mundial mais limpa. Segundo Silva et al. (2007), vários pesquisadores e fabricantes de máquinas-ferramentas estão se concentrando em tecnologias ambientalmente corretas com vistas à preservação do meio ambiente e estando alinhadas com a norma ISO 14000.

Brinksmeier et al. (1999) estudaram o desempenho de três técnicas lubrificadoras diferentes (a seco, convencional e MQL) no fresamento de liga de titânio com ferramentas de carboneto não revestido e aço rápido. Os autores concluíram que a técnica MQL proporcionou desempenho moderado no processo de usinagem com ferramentas de metal duro não revestidas. Quando as ferramentas de aço rápido foram usadas com a técnica MQL, a vida da ferramenta aumentou a uma taxa de, respectivamente, 32% e 800% em comparação com a lubrificação convencional e a seco.

Hadad et al. (2012) avaliaram a retificação do aço 100Cr6 com técnica MQL, utilizando um termopar para medir a temperatura no processo. Os autores mostraram que a retificação com aplicação MQL consome 7% a 10% menos energia do que a retificação a seco. Dhar et al. (2007) mostraram que o método de lubrificação MQL gera 5 a 15% de força de corte menor que a retificação a seco, prolongando a vida da ferramenta de corte. Li et al. (2008) avaliaram o desempenho da técnica MQL em comparação ao método convencional de lubrificação. Os resultados mostraram a viabilidade do processo, uma vez que a técnica MQL não apresentou efeito negativo na integridade superficial da peça. Tawakoli et al. (2009) relataram o MQL como uma técnica com ótimos parâmetros de dosagem na retificação. Os autores também inferem que o método de MQL atinge não apenas uma qualidade superior da superfície da peça, mas também uma força tangencial de corte mais baixa e menor energia específica em comparação com a técnica convencional de lubrificação.

Bianchi et al. (2018) avaliou o desempenho da retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340 utilizando rebolo de óxido de alumínio sob aplicação da técnica de MQL assistido com jato de limpeza superficial do rebolo (MQL + WCJ, “Wheel Cleaning Jet”) em comparação à aplicação do método convencional e MQL sem sistema de limpeza superficial do rebolo. A técnica de MQL foi empregada em diferentes vazões (30, 60 e 120 mL/h). Eles analisaram os seguintes parâmetros de saída para avaliar o desempenho da técnica proposta: rugosidade superficial, desvio de circularidade, microdureza da peça, desgaste diametral do rebolo e potência consumida. Os autores mostraram que a retificação com MQL + WCJ apresentou melhores resultados do que a técnica tradicional de MQL para todos os parâmetros de saída investigados. Eles também apresentaram a usinagem com a técnica MQL + WCJ como

uma alternativa viável a aplicação convencional de fluido de corte, proporcionando os potenciais benefícios de saúde, ambientais e econômicos. Apesar dos avanços propostos por esses autores em termos de avaliação de desempenho da retificação sob a aplicação de MQL+WCI com rebolo convencional, este trabalho não apresenta um estudo aprofundado acerca do comportamento e efeitos do fenômeno de empastamento.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de empastamento na superfície do rebolo para as diferentes técnicas de refrigeração, apresentando os resultados obtidos com microscopia eletrônica de varredura (MEV) em conjunto com espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e imagens de microscopia confocal da superfície do rebolo. Imagens de MEV da superfície usinada e cavacos gerados no processo também são apresentadas para que se possa analisar a qualidade do acabamento superficial de cada método de resfriamento. Ademais, as variáveis de saída investigadas foram: rugosidade superficial, desvio de circularidade, relação G e energia específica.

1.1 Motivação

A melhoria contínua dos processos de fabricação, em especial a usinagem por abrasão, está relacionada ao desenvolvimento de novas tecnologias alinhadas ao aumento da sustentabilidade ambiental, bem como redução dos custos de produção. Estudos acerca de técnicas alternativas à aplicação do lubrificante convencional vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de se tornar os processos de fabricação mais limpos, com a redução de resíduos e o atendimento a legislações ambientais cada vez mais rígidas.

Nesse sentido, a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) destaca-se com grande potencial. Esta técnica vem sendo amplamente estudada para aumentar a viabilidade de sua aplicação nos processos tradicionais de usinagem e assim produzir peças com qualidade similar ou maior que as obtidas com o uso dos fluidos de corte em abundância nos processos de usinagem. No entanto, o grande fator limitante da aplicação desta técnica é a ocorrência do fenômeno de empastamento na superfície do rebolo.

Apesar dos avanços propostos por autores como Bianchi et al. (2018) acerca da avaliação de desempenho da técnica de MQL com limpeza superficial do rebolo convencional de óxido de alumínio, este e outros trabalhos não apresentam um estudo detalhado do comportamento do fenômeno de empastamento, apesar de mostrarem uma melhora na eficiência do processo com a adição do jato de limpeza e consequente redução o fenômeno de empastamento. Bem como no trabalho de Oliveira et al. (2012), não há um estudo mais

aprofundado em relação às condições de ocorrência do fenômeno de empastamento e suas influências.

1.2 Objetivos

Avaliar o comportamento do fenômeno de empastamento, tal como avaliar a sua influência no resultado final da peça e do cavaco após a retificação do aço ABNT 4340 sob a aplicação de MQL com e sem limpeza superficial do rebolo convencional de óxido de alumínio.

1.3 Objetivos Específicos

Avaliar a microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por dispersão em energia (EDS) e imagens de microscopia confocal da superfície do rebolo.

Analisar as imagens de MEV da superfície usinada e dos cavacos gerados no processo;

Estudar a eficiência do processo para as variáveis de saída: rugosidade superficial, erros geométricos (desvio de circularidade) da peça, razão G, força tangencial e energia específica.

2 RELATO

O artigo intitulado “Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface”, foi publicado na revista Journal of Materials Processing Technology (ISSN: 0924-0136), cujo fator de impacto é 4,669 (em 04/2021) e classificação Qualis A1. Publicado em setembro de 2019 o artigo divulga os resultados da obtidos pelo projeto de pesquisa “Avaliação do processo de retificação com aplicação simultânea da técnica de MQL e jato de limpeza na superfície do rebolo”.

3 ESTRUTURA DO ARTIGO

A publicação intitulada “Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface” é composta por cinco seções.

3.1 Resumo

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

3.2 Introdução

Nessa seção são apresentados os principais tópicos envolvidos na pesquisa:

- Principais características do processo de retificação
- Importância da aplicação de fluidos de corte
- Riscos à saúde e ao meio ambiente causados pela aplicação dos fluidos de corte
- Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)
- Estudos inovadores relacionados à aplicação de MQL
- Obstáculos da aplicação de MQL na retificação
- Objetivos da pesquisa.

3.3 Materiais e Métodos

Apresenta os equipamentos e metodologia utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. Nessa seção estão as informações necessárias para que a pesquisa possa ser replicada.

- Dados do equipamento utilizado nos testes;
- Geometria e especificação do material dos corpos de prova;
- Parâmetros de corte aplicados;
- Técnicas de lubrificação resfriada aplicadas;

- Método e equipamentos do sistema de limpeza por ar comprimido;
- Metodologia e equipamentos utilizados para obtenção dos parâmetros de saída.

3.4 Resultados e Discussão

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

3.4.1 Rugosidade Superficial

Neste tópico são apresentados os resultados de rugosidade superficial obtidos para as diferentes condições de lubrificação. Dessa forma, foi possível comparar os efeitos para o acabamento superficial da aplicação do MQL a diferentes vazões (30, 60 e 120 mL/h) com e sem jato de limpeza superficial do rebolo em relação à aplicação convencional de fluido de corte.

3.4.2 Superfície do rebolo e da peça

Esta seção apresenta imagens de MEV (Microscopia eletrônica de varredura), EDS (Espectrometria por energia dispersiva) e imagens de microscopia confocal da superfície do rebolo com o objetivo de estudar o comportamento do fenômeno de empastamento do rebolo. Ademais, são apresentadas as imagens de MEV da superfície das peças retificadas para as diferentes condições de lubrificação: convencional, MQL e MQL com limpeza superficial.

3.4.3 Cavacos de retificação

Nesta seção, as imagens de MEV dos cavacos coletados em cada condição de lubrificação foram analisadas. Cada condição apresentou particularidades específicas para os cavacos obtidos de modo a possibilitar a comparação entre as técnicas de lubrificação.

3.4.4 Desvio de Circularidade

Neste tópico são apresentados os resultados de desvio de circularidade obtidos para as diferentes condições de lubrificação. Dessa forma, foi possível comparar os efeitos para os desvios de forma da aplicação do MQL em diferentes vazões (30, 60 e 120 mL/h) com e sem jato de limpeza superficial do rebolo em relação à aplicação convencional de fluido de corte.

3.4.5 Relação G

Os resultados de relação G obtidos para as diferentes condições de lubrificação foram apresentados nesta seção. Dessa forma, foi possível comparar os efeitos para o desgaste do rebolo da aplicação do MQL em diferentes vazões (30, 60 e 120 mL/h) com e sem jato de limpeza superficial do rebolo em relação à aplicação convencional de fluido de corte.

3.4.6 Força tangencial e energia específica

Nesta seção, os resultados de força tangencial e energia específica foram apresentados para as diferentes condições de lubrificação. Dessa forma, foi possível comparar os efeitos para a eficiência energética do processo da aplicação do MQL em diferentes vazões (30, 60 e 120 mL/h) com e sem jato de limpeza superficial do rebolo em relação à aplicação convencional de fluido de corte.

3.5 Conclusão

Apresenta os principais resultados obtidos acerca do processo de retificação do aço ABNT 4340 temperado e revenido com rebolo convencional de óxido de alumínio, utilizando lubrificação convencional e a técnica de MQL a diferentes vazões com e sem limpeza superficial do rebolo.

4 CITAÇÃO DO ARTIGO

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

RODRIGUEZ, R. L. et al. Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface. **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 271, September 2019, Pages 357-367.

RODRIGUEZ, R. L. et al. Contribution for minimization the usage of cutting fluids in CFRP grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, n. 1–4, p. 487–497, 2019.

SATO, B. K. et al. Grinding performance of AISI D6 steel using CBN wheel vitrified and resinoid bonded. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, p. 2167–2182, 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, p. 1265–1275, 2020.

5 CONCLUSÃO

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

- O método MQL combinado com jato de limpeza (MQL+WCJ) sob vazão de 30, 60 e 120 mL/h permitiu significativa redução da rugosidade (R_a) em relação ao método MQL tradicional e levemente maior do que a aplicação convencional de fluido de corte. Notou-se que os métodos que melhor mantêm a afiação do rebolo produziram o melhor acabamento superficial. O desvio de circularidade está incluído nesta observação, uma vez que o rebolo mais afiado gera menor força de retificação implicando em menor deformação elástica da peça e, portanto, menor desvio de forma.
- O empastamento é uma das razões da perda de afiação do rebolo. O método MQL+WCJ foi capaz de remover parte dos cavacos aderidos no rebolo quando comparado ao método MQL tradicional. No entanto, a aplicação convencional de fluido de corte foi o método que proporcionou a menor adesão.
- A retificação com o método MQL tradicional produziu acabamento superficial com acentuada deformação plástica em relação às demais condições testadas. Este resultado sugere que a adesão dos cavacos no rebolo atuou na redução da densidade de grãos ativos, devido ao encobrimento dos grãos menos expostos; na criação de maiores espaços entre grãos mais sobressalentes, onde os cavacos aderidos acarretaram riscamento na peça; e na maior força por grão devido a redução do número de grãos ativos gerando maior desgaste do topo dos grãos e, então, força de atrito.
- A limpeza do rebolo no método MQL+WCJ, especialmente com as vazões de 60 e 120 mL/h, permitiu melhor afiação e, então, menor valor de energia específica do que no MQL tradicional e próxima da aplicação convencional de fluido de corte. Este último método combinou menor temperatura na peça e maior afiação do rebolo, o que contribuiu para um corte com menor deformação plástica na peça e, por isso, envolvendo menos energia específica.
- Os métodos de aplicação de fluido que mantêm o rebolo mais afiado, i.e., com maior protusão e densidade de grãos ativos, conseguem maior taxa de remoção

de material e a menor força nos grãos os deixam menos suscetível ao desalojamento deles do ligante e também à fratura. Desta forma, os métodos que produzem menos empastamento do rebolo apresentam maior relação G, na seguinte ordem: lubrificação convencional, MQL+WCJ com 120, 60, 30 mL/h, MQL tradicional com 120, 60 e 30 mL/h.

Por fim, pode-se concluir que a técnica MQL + WCJ é uma alternativa viável à aplicação convencional de fluidos de corte para uma usinagem mais limpa.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- Avaliar a adição de água no fluido do sistema de MQL para retificação com rebolo de óxido de alumínio e compará-la com a aplicação de MQL com óleo puro.
- Realizar o estudo acerca da tensão residual por difração de Raio X.
- Aplicar diferentes tipos de fluidos na técnica de MQL, como óleos vegetais e nano fluidos.
- Estudar os ganhos em relação à redução de custos e impactos ambientais gerados pela utilização da técnica de MQL.

7 REFERÊNCIAS

- Baheti, U., Guo, C., Malkin, S., 1998. Environmentally conscious cooling and lubrication for grinding. **Proc Int Sem Improv Mach Tool Perform** 2, 643–654.
- Barczak, L.M., Batako, A.D.L., Morgan, M.N., 2010. A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 50 (11), 977–985.
- Bianchi, E.C., Rodriguez, R.L., Hildebrandt, R.A., Lopes, J.C., de Mello, H.J., da Silva, R.B., de Aguiar, P.R., 2018a. Plunge cylindrical grinding with the minimum quantity lubrication coolant technique assisted with wheel cleaning system. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 95, 2907. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1396-5>.
- Bianchi, E.C., Rodriguez, R.L., Hildebrandt, R.A., Lopes, J.C., Mello, H.J., Aguiar, P.R., Silva, R.B., Jackson, M.J., 2018b. Application of the auxiliary wheel cleaning jet in the plunge cylindrical grinding with minimum quantity lubrication technique under various flow rates. **Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manuf.** (May). <https://doi.org/10.1177/0954405418774599>.
- Boswell, B., Islam, M.N., Davies, I.J., Ginting, Y.R., Ong, A.K., 2017. A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0142-31>.
- Brinksmeier, E., Walter, A., Janssen, R., Diersen, P., 1999. Aspects of cooling lubrication reduction in machining advanced materials. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture.** 213(8):769-778. [doi:10.1243/0954405991517209](https://doi.org/10.1243/0954405991517209)
- Brinksmeier, E., Mutlugünes, Y., Klocke, F., Aurich, J.C., Shore, P., Ohmori, H., 2010. Ultra-precision grinding. **CIRP Ann. Manuf. Technol.** 59 (2), 652–2671. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.00113>.
- Chen, J., Shen, J., Huang, H., Xu, X., 2010. Grinding characteristics in high speed grinding of engineering ceramicss with brazed diamond wheels. **J. Mater. Process. Technol.** 210 (6–7), 899–906.
- Chen, Z.Z., Tian, L., Fu, Y.C., Xu, J.H., Ding, W.F., Su, H.H., 2012. Chip formation of nickel-based superalloy in high speed grinding with single diamond grit. **Int. J. Abras. Technol.** 5 (2), 93–106.

- Chen, J.B., Fang, Q.H., Wang, C.C., Du, J.K., Liu, F., 2016. Theoretical study on brittle-ductile transition behavior in elliptical ultrasonic assisted grinding of hard brittle materials. **Precis. Eng.** 46, 104–117.
- Chuang, T.J., Jahanmir, S., Tang, H.C., 2003. Finite element simulation of straight plunge grinding for advanced ceramics. **J. Eur. Ceram. Soc.** 23 (10), 1723–1733.
- Dhar, N.R., Ahmed, M.T., Islam, S., 2007. An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 47 (5), 748e753.
- Dongkun, Z., Changhe, L., Dongzhou, J., Yanbin, Z., Xiaowei, Z., 2015. Specific grinding energy and surface roughness of nanoparticle jet minimum quantity lubrication in grinding. **Chinese J. Aeronaut.** 28 (April (2)), 570–581. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2014.12.035>.
- Dowson, D., Taylor, C.M., Childs, T.H.C., Godet, M., Dalmaz, G., 1991. Wear particles: from the cradle to the grave. **Proceedings of the Eighteenth Leeds-Lyon Symposium on Tribology** 1992.
- Fu, Z.Q., Wang, C.B., Zhang, W., Wang, W., Yue, W., Yu, X., Peng, Z.J., Lin, S.S., Dai, M.J., 2013. Influence of W content on tribological performance of W-doped diamond-like carbon coatings under dry friction and polyalpha olefin lubrication conditions. **Mater. Des.** 51 (5), 775–779.
- Gaitonde, V.N., Karnik, S.R., Davim, J.P., 2008. Selection of optimal MQL and cutting conditions for enhancing machinability in turning of brass. **J. Mater. Process. Technol.** 204 (1), 459–464.
- Guo, S., Li, C., Zhang, Y., Wang, Y., Li, B., Yang, M., Zhang, X., Liu, G., 2017. Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy. **J. Clean. Prod.** 140 (January (1)), 1060–1076 Part 3.
- Hadad, M.J., Tawakoli, T., Sadeghi, M.H., Sadeghi, B., 2012. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication - MQL grinding process. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 54–55, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.11.010>.
- Iqbal, A., Ning, H., Khan, I., Liang, L., Dar, N.U., 2008. Modeling the effects of cutting parameters in MQL-employed finish hard-milling process using D-optimal method. **J. Mater. Process. Technol.** 199 (1) 31 379-390.
- Irani, R.A., Bauer, R.J., Warkentin, A., 2005. A review of cutting fluid application in the grinding process. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 45, 1696–1705. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.03.006>.

- Jia, D.Z., Li, C.H., Zhang, D.K., Zhang, Y.B., Zhang, X.W., 2014. Experimental verification of nanoparticle jet minimum quantity lubrication effectiveness in grinding. **J. Nanoparticle Res.** 16 (12), 1–15.
- Khan, Z.A., Hadfield, M., Wang, Y., 2005. Pressurised chamber design for conducting rolling contact experiments with liquid refrigerant lubrication. **Mater. Des.** 26 (8), 680–689.
- Kini, M.V., Chincholkar, A.M., 2010. Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of $\pm 30^\circ$ glass fibre reinforced polymer pipes. **Mater. Des.** 31 (7), 3590–3598.
- Klocke, F., Brinksmeier, E., Weinert, K., 2005. Capability profile of hard cutting and grinding processes. **CIRP Ann.-Manuf. Technol.** 54 (2), 557–581.
- Kumar, A., 1971. **Clogging Behaviour of Grinding Wheels**. Dissertation for Degree of Master of Engineering in Production Engineering. University of Roorke.
- Kwak, J., 2005. Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 45 (3), 327–334. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.08.007>.
- Li, C.H., Hou, Y.L., Xiu, S.C., Cai, G.Q., 2008. Application of lubrication theory to neardry green grinding-feasibility analysis. **Adv. Mater. Res.** 44, 135e142.
- Li, C.H., Li, J.Y., Wang, S., Jia, D.Z., 2013. Modeling and numerical simulation of the grinding temperature distribution with nano-particle jet of MQL. **Adv. Mech. Eng.** 7 (2), 167–181.
- Malkin, S., Guo, C., 2007. Thermal analysis of grinding. **CIRP Ann.-Manuf. Technol.** 56 (2), 760–782.
- Malkin, S., Guo, C., 2008. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**. Industrial Press, New York p. 372, 2008.
- Marinescu, I.D., Hitchiner, M.P., Uhlmann, E., Rowe, W.B., Inasaki, I., 2016. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**, CRC Press, 2nd. edition. Taylor & Francis Group, USA 724 p.
- Nadolny, K., Plichta, J., Sutowski, P., 2014. Regeneration of grinding wheel active surface using high-pressure hydro-jet. **J. Cent. South Univ.** 21, 3107–3118.
- Nadolny, K., Wojtewicz, M., Sienicki, W., Herman, D., 2015. An analysis of centrifugal MQL supply system potential in the internal cylindrical grinding process. **Arch. Civ. Mech. Eng.** 15 (May (3)), 639–649.
- Oliveira, D.J., Guermandi, L.G., Bianchi, E.C., Diniz, A.E., Aguiar, P.R., Canarim, R.C., 2012. Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel

cleaning. **Mater. Process Technol.** 212 (12), 2559–2568.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.019>.

Prabhu, T.R., 2015. Effects of solid lubricants, load, and sliding speed on the tribological behavior of silica reinforced composites using design of experiments. **Mater. Des.** 77, 149–160.

Ramanath, S., Ramaraj, T.C., Shaw, M.C., 1987. What grinding swarf reveals. **CIRP Annals** 36 (1), 245–247.

Ramesh, K., Yeo, S., Zhong, Z., Huang, H., 2003. Ecological grinding with chilled air as coolant. **Proc. IMechE, Part B: J. Eng. Manuf.** 217 (3), 409–419.

Rowe, W.B., 2009. Principles of Modern Grinding Technology. William Andrew Publication.

Setti, D., Sinha, M.K., Ghosh, S., Rao, P.V., 2015. Performance evaluation of Ti–6Al–4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 88 (88), 237–248.

Shen, B., Shih, A.J., 2009. Minimum quantity lubrication (MQL) grinding using vitrified CBN wheels. **Trans. NAMRI/SME** 37 129e136.

Silva, L.R., Bianchi, E.C., Fusse, R.Y., Catai, R.E., Franca, T.V., Aguiar, P.R., 2007. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant –MQL in grinding. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 47, 412–418. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.03.015>.

Stachurski, W., Nadolny, K., 2018. Influence of the condition of the surface layer of a hob cutter sharpened using the MQL-CCA hybrid method of coolant provision on its operational wear. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 98, 2185–2200.

Stachurski, W., Sawicki, J., Wójcik, R., Nadolny, K., 2017. Influence of application of hybrid MQL-CCA method of applying coolant during hob cutter sharpening on cutting blade surface condition. **J. Clean. Prod.** 171 (10 January), 892–910.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.059>.

Tang, J.Y., Du, J., Chen, Y.P., 2009. Modeling and experimental study of grinding forces in surface grinding. **J. Mater. Process. Technol.** 209 (6), 2847–2854.

Tawakoli, T., Hadad, M.J., Sadeghi, M.H., Daneshi, A., Stockert, S., Rasifard, A., 2009. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 49 (12), 924e932.

Walker, T., 2013. **The MQL Handbook – A Guide to Machining With Minimum Quantity Lubrication**. [s.l.]. UnistInc.

- Wójcik, R., Nadolny, K., 2017. Effects of a variety of cutting fluids administered using the minimum quantity lubrication method on the surface grinding process for nickel-based alloys. **J. Zhejiang Univ.-Sci. A (Appl. Phys. Eng.)** 18 (9), 728–740.
- Wong, Y.C., Doyle, E.D., 1999. Implications of high strain deformation in grinding. **Wear** 233–235, 395–401.
- Yang, M., Li, C., Zhang, Y., Jia, D., Zhang, X., Hou, Y., Li, R., Wang, J., 2017a. Maximum undeformed equivalent chip thickness for ductile-brittle transition of zirconia ceramics under different lubrication conditions. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 122 (November 2017), 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.06.003>.
- Yang, M., Li, C., Zhang, Y., Wang, Y., Li, B., Jia, D., Hou, Y., Li, R., 2017b. Research on microscale skull grinding temperature field under different cooling conditions. **Appl. Therm. Eng.** 126 (November), 525–537. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.183>.
- Yin, L., Han, Y.G., Song, X.F., Li, J., Wang, H., 2007. In vitro study on high rotation deep removal of ceramic prostheses in dental surgery. **J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater.** 82 (2), 334–345.
- Yue, W., Liu, C.Y., Fu, Z., Liu, C.Y., Fu, Z.Q., Wang, C.B., Huang, H.P., Liu, J.J., 2014. Effects of molybdenum dithiocarbamate and zinc dialkyl dithiophosphate additives on tribological behaviors of hydrogenated diamond-like carbon coatings. **Mater. Des.** 64 (9), 601–607.
- Zhang, Y., Li, C., Jia, D., Zhang, D., Zhang, X., 2015. Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 99, 19–33.
- Zhang, Y., Li, C., Ji, H., Yang, X., Yang, M., Jia, D., Zhang, X., Li, R., Wang, J., 2017. Analysis of grinding mechanics and improved predictive force model based on material-removal and plastic-stacking mechanisms. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 122, 81–97.