

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Dissertação será disponibilizado somente a partir de 30/06/2025.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

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

LUCAS DE MARTINI FERNANDES

**PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE CERÂMICA AVANÇADA COMBINADO À
MITIGAÇÃO DE RISCOS À SAÚDE DOS COLABORADORES USANDO UMA
TÉCNICA ALTERNATIVA DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO**

BAURU

2023



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



LUCAS DE MARTINI FERNANDES

**PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE CERÂMICA AVANÇADA COMBINADO À
MITIGAÇÃO DE RISCOS À SAÚDE DOS COLABORADORES USANDO UMA
TÉCNICA ALTERNATIVA DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO**

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.

Orientador: Prof. Dr. José Claudio Lopes

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

BAURU

2023

F363p

Fernandes, Lucas de Martini

PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE CERÂMICA AVANÇADA
COMBINADO À MITIGAÇÃO DE RISCOS À SAÚDE DOS
COLABORADORES USANDO UMA TÉCNICA ALTERNATIVA
DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO / Lucas de Martini Fernandes. --
Bauru, 2023

134 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: José Claudio Lopes

Coorientador: Eduardo Carlos Bianchi

1. Retificação. 2. Cerâmica avançada. 3.Rebolo diamantado. 4. MQL. 5.
Ecoeficiência. I. Título

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de LUCAS DE MARTINI FERNANDES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 30 dias do mês de junho do ano de 2023, às 10:00 horas, por meio de Vídeoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE Mestrado de LUCAS DE MARTINI FERNANDES, intitulada **PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE CERÂMICA AVANÇADA COMBINADO À MITIGAÇÃO DE RISCOS À SAÚDE DOS COLABORADORES USANDO UMA TÉCNICA ALTERNATIVA DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Profa. Dra. KATIA CRISTIANE GANDOLPHO CANDIOTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Materiais / Escola de Engenharia de Lorena / USP. 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. JOSÉ CLAUDIO LOPES

A todos que contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico e profissional e que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho. A todos meus familiares, amigos e colegas que contribuíram de alguma maneira com meu desenvolvimento pessoal ao longo de minha vida. À minha esposa Naoni pelo apoio e à minha filha Laís.

AGRADECIMENTOS

Agradeço grandemente ao meu orientador, Professor Doutor José Claudio Lopes e ao meu coorientador, Professor Doutor Eduardo Carlos Bianchi, pela oportunidade e apoio na formação acadêmica desde minha iniciação científica no tema de usinagem, no Laboratório de Usinagem por Abrasão, até os dias de hoje, assim como fornecendo as condições para todos os trabalhos desenvolvidos desde então até o momento.

Agradeço grandemente a todos os colegas do Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) pelos ensinamentos, suporte, parcerias e trocas de conhecimento, especialmente aos que tive oportunidade de ter mais contato: Anthony Gaspar Talon, Bruno Biondo Domingues, Bruno Kenta Sato, Fernando Sabino Fontequê Ribeiro, Mateus Vinícius Garcia, Rafael Lemes Rodriguez, Rafael Liberatti Javaroni e Roberta Silveira Volpato, assim como aos servidores Dr. Hamilton José de Mello e Hélio Aparecido de Souza por todo suporte, atenção, ensinamentos e cuidados com os laboratórios da UNESP.

Agradeço grandemente à minha esposa, Naoni da Luz de Martini, por me incentivar a seguir neste desafio e permitir que eu pudesse dedicar o tempo necessário para desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço grandemente a meus pais Leila de Martini Fernandes e Humberto Gonçalves Fernandes que me criaram e deram apoio até quando puderam, à minha irmã Esther de Martini Fernandes pelo companheirismo e apoio até os dias de hoje, aos meus avós Nair Eugênio de Martini e Geraldo de Martini que também contribuíram com a minha criação e a todos os vários familiares que tenho consideração e não citei aqui.

Agradeço grandemente ao Flávio Gusi, Lucas Hidalgo Pitaluga e Waldiney Miosso, da empresa Schott Flat Glass, pelo companheirismo e trocas de conhecimentos, assim como pelo apoio para que eu desenvolvesse este trabalho.

Agradeço grandemente à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, *campus* Bauru, que possibilitou meus estudos durante meu período de graduação, assim como ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia, que permitiu o desenvolvimento deste trabalho, e a todos os professores que despenderam tempo e esforço para garantir meu acesso à conhecimentos gerais, assim como pelo incentivo à aprendizagem.

Agradeço, por fim, a todos que não registrei aqui o nome, mas que tiveram passagem pela minha vida e contribuíram de alguma maneira para meu desenvolvimento pessoal, profissional ou acadêmico.

“A ciência é muito mais do que um corpo de conhecimentos. É uma maneira de pensar.”

(Carl Sagan)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Motivações	20
1.2 Objetivos	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Processo de retificação	23
2.1.1 Interação do rebolo com a peça	25
2.1.2 Interação do grão abrasivo com a peça	26
2.1.3 Cinemática do rebolo	27
2.2 Métodos de lubri-refrigeração	29
2.2.1 Convencional (abundante)	29
2.2.1.1 Impactos à saúde	31
2.2.1.2 Impactos ambientais	33
2.2.1.3 Custos	34
2.2.2 Lubri-refrigerações alternativas	35
2.2.3 Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL).....	36
2.2.4 MQL com jato de limpeza (WCJ)	37
2.3 Retificação cilíndrica externa de mergulho	39
2.3.1 Ciclo da retificação cilíndrica externa	40
2.3.2 Parâmetros de corte na retificação cilíndrica externa de mergulho	42
2.3.2.1 Comprimento de contato (l_c).....	43
2.3.2.2 Profundidade de corte (a).....	45
2.3.2.3 Velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo (V_s)	47
2.3.2.4 Velocidade periférica da peça (V_w)	48
2.3.2.5 Velocidade de avanço / mergulho (V_f)	49
2.3.2.6 Taxa de remoção de material (Q_w)	49
2.3.2.7 Espessura equivalente de corte (h_{eq})	50
2.3.3 Processo de formação do cavaco	52
2.3.4 Forças de corte no processo de retificação	53
2.3.5 Potência na retificação	55
2.4 Retificação no modo de remoção frágil	56
2.5 Rebolo	58
2.5.1 Grãos abrasivos.....	60

2.5.2.1 Granulometria	63
2.5.2.2 Friabilidade dos grãos abrasivos.....	63
2.5.2.3 Grão abrasivo de diamante	66
2.5.3 Dureza do rebolo.....	68
2.5.4 Estrutura do rebolo	69
2.5.5 Ligantes.....	71
2.5.5.1 Resinoides.....	72
2.5.5.2 Vitrificadas ou cerâmicas	73
2.5.5.3 Metálicos.....	75
2.5.6 Processo de dressagem do rebolo	76
2.6 Cerâmicas avançadas.....	78
2.6.1 Óxido de Alumínio (Alumina).....	79
2.6.1.1 Radome Sparrow III	81
2.7 Análise das principais variáveis de saída na peça do processo de retificação	82
2.7.1 Desgaste diametral do rebolo – Relação G.....	82
2.7.2 Rugosidade	84
2.7.3 Microscopia confocal.....	85
2.7.4 Circularidade.....	86
2.8 Análises de custo	87
2.9 Análises de emissão de carbono equivalente	89
3. MATERIAL E MÉTODOS	90
3.1 Retificadora / configurações dos experimentos.....	91
3.2 Corpos de prova, rebolo e cilindro de impressão do desgaste do rebolo	93
3.3 Dressador	95
3.4 Sistemas de lubri-refrigeração.....	95
3.4.1 Convencional (abundante)	96
3.4.2 Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)	96
3.4.3 MQL + Jato de Limpeza do Rebolo (WCJ).....	98
3.5 Potência (equipamento de aquisição de dados).....	98
3.6 Desgaste diametral do rebolo	98

3.7 Rugosidade e microscopia confocal	99
3.8 Desvio de circularidade	101
3.9 Parâmetros de processo	102
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
4.1 Desgaste diametral do rebolo	104
4.2 Rugosidade e microscopia confocal	107
4.3 Desvio de circularidade	111
4.4 Potência	113
4.5 Análises de custos	114
4.6 Análises de emissão de carbono	116
5. CONCLUSÕES	118
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	120
REFERÊNCIAS	121

Lista de Figuras

Figura 1. Custos acumulados para a fabricação de um produto e seu valor agregado (ROWE, 2014 - adaptado).	24
Figura 2. Ilustração da interação entre o rebolo e a peça (KHARAGPUR, 2008 - adaptado) 25	25
Figura 3. Variação do ângulo de saída de acordo com a geometria do grão. (KHARAGPUR, 2008 - adaptado)	26
Figura 4. Grãos realizando corte, riscamento e escorregando sobre a peça. (KHARAGPUR, 2008)	27
Figura 5. Fluxo de ar através e ao redor do rebolo (ROWE, 2014 – adaptado).	28
Figura 6. Distribuição da camada barreira de ar ao redor do rebolo (MAO et al., 2013 apud DOGRA <i>et al.</i> , 2018 - adaptado).	28
Figura 7. Impactos do contato do fluido de corte convencional com a pele (RAHIMOV & AKGÜN, 2022).	32
Figura 8. Impactos do fluido de corte no seu ciclo de vida (SANKARANARAYANAN <i>et al.</i> , 2021 – adaptado).	33
Figura 9. Efeito da utilização do bocal de limpeza na remoção dos aglomerados de materiais aderidos à superfície do rebolo (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2012 – adaptado).	38
Figura 10. Esquema do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho (YAN <i>et al.</i> 2015 - adaptado).	39
Figura 11. Representação de um ciclo de retificação cilíndrica externa de mergulho (SOARES & OLIVEIRA, 2002 - adaptado)	41
Figura 12. Grandezas físicas do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho (HOLZ & SAUREN, 1988).	42
Figura 13. Representação da área de contato do rebolo com a peça (MALKIN & GUO, 2008).	43
Figura 14. Ilustração de operação de retificação cilíndrica externa de mergulho (ROWE, 2014).	46
Figura 15. Efeito do aumento da velocidade de corte. (a) Sob taxa de remoção de material constante e (b) Sob taxa de remoção de material crescente (ROWE, 2014 - adaptado).....	48
Figura 16. Modelo de retificação de superfície (MALKIN & GUO, 2008).	51
Figura 17. Representação das etapas ou regiões da formação do cavaco na retificação (KLOCKE, 2009 - adaptado).	52
Figura 18. Representação da retificação cilíndrica externa de mergulho com ilustração da decomposição das forças (ROWE, 2014).	54
Figura 19. Materiais dúctil e frágil em um ensaio de tração (ROWE, 2014 – adaptado).....	56
Figura 20. Fenômenos de deformações superficiais por diamante na cerâmica (UHLMANN, 1998 apud MARINESCU <i>et al.</i> , 2007 – adaptado).	57
Figura 21. Fenômenos envolvidos na abrasão de material frágil (MALKIN & HWANG, 1996 – adaptado).	58
Figura 22. Estrutura do rebolo (WINTER(b) <i>et al.</i> , 2015)	59
Figura 23. Valores típicos de dureza dos diferentes tipos de grão abrasivo em função da temperatura (ROWE, 2014 - adaptado).	62
Figura 24. Modos de quebra do grão/ligante no rebolo (JACKSON & DAVIM, 2011 - adaptado).	64

Figura 25. Tamanho de mercado das cerâmicas avançadas, sendo o resultado de 2022 e previsão até 2032, em bilhões de dólares (PRECEDENCE RESEARCH, 2023 - adaptado).	78
Figura 26. Representação de localização do radome no míssil teleguiado, modelo Sparrow III.	82
Figura 27. Representação do erro de circularidade de uma peça (NETO <i>et al.</i> , 2011).	87
Figura 28. Retificadora cilíndrica utilizada para a realização dos ensaios.	91
Figura 29. Configuração para ensaios com método convencional (abundante) de lubri-refrigeração.	92
Figura 30. Configuração para ensaios com método de mínima quantidade de lubrificante (MQL).	92
Figura 31. Configuração para ensaios com método de mínima quantidade de lubrificante (MQL) + jato de limpeza do rebolo (WCJ).	92
Figura 32. Ilustração de geometria dos corpos de prova de alumina que foram utilizados.	93
Figura 33. Cilindro que será utilizado para impressão do desgaste do rebolo.	94
Figura 34. Cilindro após a impressão, com indicação das regiões do rebolo que sofreram ou não desgaste.	95
Figura 35. Óleo solúvel semi-sintético ME-1 utilizado nos ensaios.	96
Figura 36. Fotografia dos elementos que formam o sistema de MQL.	97
Figura 37. Ilustração do perfil gerado do desgaste do rebolo com medição da diferença de profundidade entre o trecho em que o rebolo desgastou em relação ao trecho que o rebolo não desgastou.	99
Figura 38. Montagem do rugosímetro para a medição de rugosidades dos corpos de prova retificados.	100
Figura 39. Apresentação de alguns componentes do circularímetro.	101
Figura 40. Desgaste diametral do rebolo coletado em função do método de lubri-refrigeração lubri-refrigeração e velocidade de avanço utilizados durante o processo.	104
Figura 41. Relações-G do rebolo calculadas em função dos valores de desgaste diametral do rebolo.	105
Figura 42. Rugosidades média obtida das superfícies das peças retificadas em função do método de lubri-refrigeração lubri-refrigeração e velocidade de avanço utilizados durante o processo.	108
Figura 43. Análise de microscopia confocal para superfícies de peças de alumina 96% retificadas com rebolo diamantado nas condições de lubri-refrigeração: (a) Convencional (abundante); (b) MQL; (c) MQL + WCJ.	110
Figura 44. Desvios de circularidade obtidos das superfícies das peças retificadas em função do método de lubri-refrigeração lubri-refrigeração e velocidade de avanço utilizados durante o processo.	111
Figura 45. Potência média obtida em função do método de lubri-refrigeração e velocidade de avanço utilizados durante o processo.	113
Figura 46. Custo em dólares por peça calculados para cada método de lubri-refrigeração e velocidade de avanço, usando de base as variáveis coletadas durante e após o processo.	115
Figura 47. Cálculo de emissão de kgCO ₂ equivalente por peça retificada para cada método de lubri-refrigeração e velocidade de avanço.	117

Lista de Tabelas

Tabela 1. Características dos principais tipos de fluidos, sendo 1–ruim; 2-bom; 3-ótimo; 4-excelente (WEBSTER, 1995).	30
Tabela 2. Propriedades de alguns abrasivos (MALKIN & GUO, 2008 - adaptado)	62
Tabela 3. Comparação dos impactos no processo de retificação na variação da friabilidade dos grãos. (BIANCHI <i>et al.</i> , 1999 – adaptado)	66
Tabela 4. Parâmetros de entrada ou constantes consideradas.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Coeficiente de retificação	[-]
a	Profundidade de corte teórica	[mm]
a_d	Profundidade de dressagem no diâmetro do rebolo	[mm]
a_e	Profundidade de corte real	[mm]
a_s	Desgaste do rebolo	[mm]
b	Largura de contato peça-rebolo	[mm]
b_d	Largura do dressador	[mm]
b_s	Largura do rebolo	[mm]
C	Densidade de grãos abrasivos ativos	[mm ²]
C_e	Custo de energia elétrica	[US\$/kWh]
C_f	Custo do fluido de corte	[US\$/L]
C_{fluid}	Custos referentes sistema lubri-refrigerante	[US\$]
C_{method}	Custos referentes ao método em análise	[US\$]
C_s	Custo por mm ³ do rebolo	[US\$/mm ³]
C_{time}	Custo do tempo de usinagem	[US\$]
C_w	Custo de descarte do fluido de corte	[US\$/L]
C_{wheel}	Custos referentes ao ferramental	[US\$]
CE_e	Emissão de carbono referente à energia elétrica	[kgCO ₂ /MJ]
CE_{energy}	Emissão de carbono referente ao consumo energético	[kgCO ₂]
CE_{fluid}	Emissão de carbono referente ao sistema de lubri-refrigeração	[kgCO ₂]
CE_{oil}	Emissão de carbono referente ciclo de vida do fluido	[kgCO ₂ /L]
d_e	Diâmetro equivalente do rebolo	[mm]
d_s	Diâmetro do rebolo	[mm]
d_w	Diâmetro da peça	[mm]
F_a	Força axial	[N]
F_n	Força normal	[N]
F_t	Força tangencial	[N]
G	Relação G	[-]

h_{eq}	Espessura equivalente de corte	[μm]
k_p	Porcentagem de diluição do fluido em água	[-]
l_c	Comprimento de contato	[mm]
M	Custo de mão-de-obra	[US\$/h]
N_c	Quantidade de recirculações do fluido	[-]
N_d	Quantidade de peças entre dressagens	[-]
n_s	Rotação do rebolo	[rpm]
n_w	Rotação da peça	[rpm]
P	Potência de corte	[W]
P_{air}	Potência para uso de ar comprimido	[W]
P_{bo}	Potência da bomba de lubri-refrigeração convencional	[W]
P_c	Potência média durante retificação	[W]
Q_w	Taxa de remoção de material	[mm^3/s]
Q'_w	Taxa específica de remoção de material	[$\text{mm}^3/\text{mm.s}$]
R	Distância em avanço rápido	[mm]
r	Velocidade em avanço rápido	[mm/min]
R_a	Rugosidade média aritmética	[μm]
R_z	Rugosidade total	[μm]
s_d	Largura do dressador	[mm]
t_{so}	Tempo de spark-out	[min]
U_d	Grau de recobrimento	[-]
V	Volume de material removido por peça	[mm^3]
V_{jet}	Vazão de fluido de corte	[L/min]
v_f	Velocidade de avanço	[mm/min]
v_s	Velocidade tangencial do rebolo ou velocidade de corte	[m/s]
v_w	Velocidade tangencial da peça	[m/s]
x	Deflexão do sistema	[mm]
x_{exp}	Dilatação térmica da peça ou máquina	[mm]
Z_s	Volume desgastado do rebolo	[mm^3]
Z_w	Volume de material removido	[mm^3]

Resumo

As cerâmicas avançadas tornaram possíveis diversas aplicações que eram inconcebíveis anos atrás. A utilização atual na indústria aeroespacial é um dos exemplos de sucesso de aplicação, sendo ainda o material altamente desejado em diversos tipos de indústria, tais como de defesa, automotiva e biomédica, devido às suas ótimas propriedades de elevada força específica, resistência à corrosão, estabilidade em elevadas temperaturas, baixa dilatação térmica, entre outras propriedades, entretanto, o alto custo de manufatura atrapalha o crescimento deste mercado. Para estes materiais, a maneira mais usual de obter a geometria final de uma peça nas tolerâncias desejadas é por meio de retificação com rebolos diamantados, visto que a retificação costuma ser o processo selecionado quando são necessárias superfícies ou geometrias de elevada qualidade ou se materiais frágeis precisam ser usinados. Um dos sistemas que representa elevado custo na operação de retificação é o de lubri-refrigeração, que, de acordo com diversos estudos feitos por outros autores, representa entre 16 – 20% do custo total, enquanto a ferramenta costuma entre 4 – 7%. Além destes fatos, o uso de fluido convencional é ainda responsável por uma grande quantidade de emissão de dióxido de carbono equivalente, considerando desde fabricação até descarte do material, por este motivo, sendo importante encontrar caminhos mais sustentáveis, ao mesmo tempo que visando obter viabilidade econômica. Assim, este trabalho explora a retificação cilíndrica externa de mergulho em peças do material alumina 96%, utilizando rebolo diamantado e com algumas variações de método de lubri-refrigeração (convencional, MQL e MQL + WCJ) e de velocidade de avanço (0,25; 0,5 e 0,75 mm/min), visando análise do desempenho dos métodos em diferentes condições de taxa de remoção de material, sendo feita a ponderação de três aspectos relacionados à ecoeficiência: qualidade da peça (nos parâmetros desvio de circularidade e rugosidade, junto à análise em microscópio confocal), custos da operação (para o qual foram coletados parâmetros tais como desgaste diametral do rebolo; relação G; potência demandada) e emissão de carbono equivalente, temas de grande relevância no mundo atual e para futuros de curto e longo prazo. Os resultados obtidos indicaram ótimo desempenho da condição MQL + WCJ nos quesitos custo total e emissão de dióxido de carbono equivalente, enquanto tendo menor desempenho que o sistema convencional no quesito qualidade da peça, sendo uma escolha interessante quando não é necessária alta taxa de remoção de material, visando as vantagens dos quesitos ambiental e custo. O uso de apenas MQL mostrou resultados ambientais consideravelmente melhores do que o sistema convencional, entretanto, nos critérios qualidade da peça e custos, não teve bons resultados, sendo possivelmente viável em condição de baixa taxa de remoção de material, enquanto a lubri-refrigeração convencional apresentou os melhores resultados de qualidade de peça e em elevadas taxas de remoção de material, tendo em detrimento o maior nível de emissão de dióxido de carbono equivalente, independente da velocidade de avanço analisada, e riscos de saúde aos operadores, assim como ambientais.

Palavras-chave: Retificação, Cerâmica Avançada, Rebolo Diamantado, MQL, WCJ, Ecoeficiência.

Abstract

Advanced ceramics have made possible various applications which were virtually inconceivable years ago. Current application on the aerospace industries is a successful example of use of the material. Some other fields in which the material is highly desired are defense, automotive and biomedical industries owing to their excellent properties such as high specific strength, corrosion resistance, wear resistance, high-temperature stability, low thermal expansion, among others, however, the high manufacturing cost has hampered the growth of advanced ceramics' market. For these materials, the most usual way to obtain the final geometry of a piece is grinding with grinding wheel using diamond grits, since grinding is usually the selected process when high quality surface / geometry or brittle material machining is required. The coolant-lubricant system plays a major role on the grinding process costs, which, according to studies of different authors, represents generally 16 – 20% of the total operation costs, while the tool costs are usually on the range of 4 – 7%. Besides these facts, the conventional fluid usage is also responsible for a considerable share of the carbon dioxide equivalent emissions, considering operations required from the oil production until its disposal. For this reason, it's important the achievement of more sustainable ways, along with economic feasibility. Therefore, this work explores the plunge cylindrical external grinding process on alumina 96% workpieces using diamond grinding wheel and applying some coolant-lubricant methods (conventional, MQL and MQL + WCJ) and different feed rates (0.25, 0.50 and 0.75 mm/min), aiming performance analysis of each method on different material removal rates conditions, in which three aspects are weighted: workpiece quality (surface roughness and roundness error parameters, along with confocal microscopy analysis), operation costs (which considered some parameters such as wheel diametral wear, G-ratio and consumed power) and carbon dioxide equivalent emission, topics which present great relevance in the current world and for short and long term futures. The results obtained presented great performance of the MQL + WCJ condition regarding total cost and carbon dioxide equivalent emission, while had worse performance than conventional method on workpiece quality, which is an interesting choice when high material removal rates are not required, aiming the good environmental and lower cost benefits. The MQL condition showed environmental results considerably better than conventional system, however, had the worst performance regarding workpiece quality and total costs, which may be feasible on low material removal rate conditions, while the conventional system had the best performance in terms of workpiece quality and for high material removal rates, but the worst performance (for all feed rates analyzed) in carbon dioxide equivalent emission, besides the risks that this products presents to the machine operators and to the environment.

Keywords: Grinding, Advanced Ceramics, Diamond Grinding Wheel, MQL, WCJ, Eco-efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Cerâmicas avançadas são altamente desejadas em diversos tipos de indústria, tais como de defesa, aeroespacial, automotiva e biomédica, devido às suas ótimas propriedades de elevada força específica, resistência à corrosão, estabilidade em elevadas temperaturas, baixa dilatação térmica, entre outras propriedades, entretanto, o alto custo de manufatura atrapalha o crescimento deste mercado (MARK. RES. REP., 2017).

Para usinagem de cerâmicas avançadas (alta dureza), após uma manufatura primária para obtenção da peça na geometria inicial, a maneira mais usual de obter a geometria final nas tolerâncias desejadas é por meio de retificação com rebolos diamantados (MARINESCU *et al.* 2017).

A retificação pode ser definida como um processo de usinagem que emprega um reboło (ferramenta) em alta rotação para remover material de um material mais macio. (MARINESCU *et al.* 2007). É também um dos mais importantes processos de fabricação, especialmente quando são necessárias superfícies de alta qualidade ou se materiais frágeis precisam ser usinados, sendo geralmente uma das operações finais pela qual a peça passa (DENKENA *et al.* 2015).

O método de lubri-refrigeração no processo de retificação tem um papel de extrema importância no que diz respeito à taxa e mecanismos de desgaste do reboło (SHEN *et al.*, 2009), que é amplificado no processo de retificação, visto que dispõe de partículas abrasivas de ângulo de ataque negativo e a energia consumida pela remoção de uma unidade de volume do material é geralmente muito maior do que a necessária em outros processos. Apenas uma pequena fração do calor gerado na zona de contato é removida por meio dos cavacos e dos fluidos. A maior parte do calor gerado acumula na zona de contato, gerando uma alta temperatura no local. Com isto, certos danos térmicos podem vir a ocorrer na superfície do material, como por exemplo oxidação, queima, trincas e tensão residual, prejudicando assim a qualidade e precisão da superfície das peças. Altas temperaturas também agravam o desgaste do reboło e diminuem a resistência à fadiga, reduzindo assim a precisão do processo e a vida da ferramenta (GUO *et al.*, 2017).

De maneira convencional, a técnica de lubri-refrigeração consiste de utilização em abundância de fluido de corte na interface reboło-peça, o que garante bons resultados nos aspectos de lubrificação, refrigeração e limpeza (RODRIGUEZ *et al.*, 2019). Entretanto, tais partículas podem desencadear diversas doenças ocupacionais, tais como dermatites alérgicas e

câncer (WANG *et al.*, 2016). He *et al.* (2023) complementam que estudos apontaram que 80% das doenças ocupacionais são causadas por conta do contato da pele com fluido de corte.

Além das questões de saúde relacionadas ao uso de fluidos de corte, há também questões ambientais. Emissões de carbono (C) são as principais causas de problemas globais tais como derretimento das geleiras do Ártico e da Antártida, elevação do nível dos oceanos e aquecimento global. Para neutralizar ou aliviar a pressão ambiental da emissão de carbono e para alcançar desenvolvimento sustentável da economia, sociedade e de futuras gerações, países ao redor do mundo têm conjuntamente formulado uma série de leis ambientais, regulações e protocolos (JIANG *et al.*, 2019).

Considerando a relevância da lubri-refrigeração no processo de retificação, até os dias de hoje, o método predominante é o convencional, com uso de fluido de corte em abundância, porém, temos que, após certo tempo em circuito fechado, o fluido passa a conter certa quantidade de materiais indesejados, tais como fragmentos do rebolo, cavacos, assim como variações de próprias propriedades do fluido, resultando na necessidade de que todo o volume do fluido seja trocado para manter a produtividade e a qualidade do processo e o fluido usado seja descartado, de modo que, se o descarte for feito de forma inadequada, é prejudicial ao meio ambiente. Além do método de descarte, a ocorrência de contaminação do solo, água e ar pode ainda ser oriunda de vazamentos e emissões (IRANI *et al.*, 2005).

Surgindo como uma possível solução, a aplicação de uma pequena quantidade de lubri-refrigeração na forma de névoa, conhecido como mínima quantidade de lubrificação (MQL) tem recebido uma atenção muito grande da comunidade científica nos últimos anos devido ao crescimento da consciência ambiental (CHOUDHARY & PAUL, 2020) A técnica pode ser definida como uma pulverização de pequenas gotículas de óleo em um jato de ar comprimido diretamente na zona de corte, não necessitando das grandes vazões que são utilizadas no método convencional (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Além de possível melhora no desempenho do processo em função das partículas de óleo terem melhor acesso à zona de contato na retificação em função do uso de alta pressão (PATRA *et al.*, 2022) e redução de custo por meio da eliminação dos custos associados à compra e descarte do óleo, o MQL vem também como uma alternativa ecologicamente amigável (SAID *et al.*, 2019).

Na usinagem, a ecoeficiência está relacionada à obtenção de uma definida produtividade, atingindo as propriedades desejadas na peça, ao mesmo tempo que buscando menos impactos ambientais, sendo assim uma possível maneira de quantificar por meio de ponderação de três aspectos: rugosidade média da superfície da peça, custos e pegada de carbono (WINTER(a) *et al.* 2014). Este trabalho também será apresentado no sentido de ponderação desses três aspectos, entretanto, para a qualidade da peça, será considerado também o parâmetro de circularidade além da rugosidade, sendo analisado diversos itens relacionados à emissão de carbono e custos envolvidos no processo.

1.1 Motivações

Cerâmicas avançadas são altamente desejadas em diversos tipos de indústria, tais como de defesa, aeroespacial, automotiva e biomédica, devido às suas ótimas propriedades de elevada força específica, resistência à corrosão, estabilidade em elevadas temperaturas, baixa dilatação térmica, entre outras propriedades, entretanto, o alto custo de manufatura atrapalha o crescimento deste mercado.

Dados da Precedence Research (2023) comprovam a relevância do material a partir de estudo em que indicam que o mercado global de cerâmicas avançadas, avaliado em US\$ 59.09 bilhões em 2022, antecipa-se que chegue a US\$ 95.79 bilhões em 2032, com taxa de crescimento anual composta de 5% durante período de 2023 a 2032, sendo o material alumina o líder na fatia de mercado, representando 35% do total. Assim, com a demanda existente do material e expectativas de crescimento composto, é de extrema importância o conhecimento de métodos de usinagem e obtenção cada vez de melhores custo-benefício,

Ao mesmo tempo, a busca por maior eficiência tem recentemente sido o principal direcionamento das indústrias. Diante das instabilidades econômicas e políticas do mundo inteiro nos últimos anos, tendo como eventos relevantes a pandemia do novo Corona Vírus (COVID-19); situações de conflitos e divergências entre países, em que ocorre escassez de recursos e redução do poder de compra da população, entre outras situações, apenas empresas que conseguem se adaptar e se tornarem mais inteligentes conseguem crescer e se manter no mercado.

Um dos sistemas que representa maior custo na operação de retificação é o de lubri-refrigeração convencional, que, de acordo com Sharma et al. (2016), representa entre 16 – 20% do custo total, enquanto a ferramenta costuma representar menos da metade ou até um quarto deste valor.

Complementando o fato acima, Rowe (2014) afirma que a seleção do fluido adequado é um campo de estudo complexo, visto que a seleção do conceito e produto apropriados dependem do material da peça, do material abrasivo e ligante do rebolo, assim como das condições de processo e características do ambiente em que será realizada a operação de retificação. Ainda há possíveis problemas de saúde dos operadores e ambientais que devem ser levados em conta, sendo que Guo (2008) adverte que a seleção inadequada do fluido pode causar um desgaste mais acentuado do rebolo e ocorrer a obstrução de seus poros pelo excesso de cavaco alojado, entre outros diversos problemas relacionados à qualidade da peça. Assim, é muito importante o estudo de métodos de lubri-refrigeração visando otimização.

No tangente ao quesito ambiental da manufatura, nos últimos anos, o rápido desenvolvimento industrial tem excessivamente utilizado recursos e causado danos ao meio-ambiente. Problemas ambientais globais tais como efeito estufa, chuva ácida, perda da camada de ozônio, poluição do ar, poluição de recursos aquáticos, poluição do solo, seca de rios, desertificação e erosão do solo têm ameaçado a sobrevivência da humanidade. Assim, a conquista de uma coexistência harmoniosa entre seres humanos e a natureza se tornou um problema urgente que deve ser resolvido em ordem para manter um desenvolvimento sustentável. Desenvolvimento verde é um novo conceito proposto em resposta ao gargalo de recursos e problemas ambientais criados em função dos métodos tradicionais de desenvolvimento e racionalidade econômica (XIAO *et al.* 2022).

Os métodos de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) e MQL + jato de limpeza do rebolo (WCJ) surgem como possível solução tanto para o quesito custo, visto que elimina a necessidade de compra e descarte de óleo de corte, assim como energia elétrica consumida para manter o sistema de bombeamento de fluido na máquina funcionando, ao mesmo tempo que aparecem como solução para o quesito ambiental, visto que eliminam potenciais problemas de vazamento ou descarte inadequado do óleo, que podem contaminar o ambiente, além de grande redução no impacto de emissão de carbono equivalente (referenciado pela equivalência em

CO_2) em função da fabricação e descarte do óleo de corte para operações de usinagem (SAID *et al.*, 2019).

Neste sentido, este trabalho vem com a proposta de trazer informações acerca do desempenho dos métodos de lubri-refrigeração MQL e MQL + WCJ, em substituição ao convencional, na retificação cilíndrica externa de mergulho de alumina 96% com rebolo diamantado, sendo nas análises ponderados os quesitos qualidade da peça, custo total envolvido e ambiental, sendo este último mensurado pela emissão de carbono equivalente, sendo sua importância justificada também pelo fato que a seleção do método de lubri-refrigeração mais apropriado e com melhor custo-benefício tem se tornado cada vez mais complexa, devido à disponibilidade de uma maior gama de possibilidades que surgiram ao longo dos anos. Dessa maneira, tendo em vista a existência de fatores de elevada relevância além do desempenho do processo, principalmente no mundo atual, tais como pegada de carbono (emissão equivalente de CO_2) e custos, em uma visão holística, é importante conhecer os parâmetros e ter fórmulas para ter uma visão quantitativa e possibilitar ponderação dos fatores envolvidos, contribuindo no direcionamento na tomada de decisão

1.2 Objetivos

Analisar o desempenho das técnicas de lubri-refrigeração convencional, MQL e MQL + WCJ na retificação cilíndrica externa de mergulho de corpos de prova em formato anelar feitos de material alumina 96% e utilizando rebolo diamantado como ferramenta e utilizando diferentes velocidades de avanço, simulando condições de maior e menor taxa de remoção de material, de modo a ponderar quesitos de qualidade da peça, custos e emissão de carbono equivalente referentes à cada método de lubri-refrigeração.

5. CONCLUSÕES

- Para todas as velocidades de avanço analisadas (0,25; 0,50 e 0,75 mm/min), a solução MQL + WCJ apresenta um resultado geral de qualidade da peça inferior à condição de refrigeração convencional, enquanto sendo sempre superior à condição de aplicação de apenas MQL, sendo tal fato explicado pela eficiência de lubri-refrigeração que foi maior no método tradicional, em que garantiu menores temperaturas na zona de contato, assim como uma superfície do rebolo mais limpa, ou seja, com menos empastamento;
- O fenômeno de empastamento observado em maior incidência na condição de uso de apenas MQL associado às maiores temperaturas durante o processo, foram os principais contribuintes para a maioria dos resultados verificados, desde aumento dos níveis de desvio de circularidade e de rugosidade, este último provavelmente tendo grande impacto do fato de a peça ter tido excessivos contatos com os materiais aderidos à superfície do rebolo por meio de fenômenos sem remoção de material, tais como atrito (escorregamento) e riscamento (sulcamento), ou ainda em casos de remoção de material, que houve cisalhamento, por ter ocorrido de maneira descontrolada, resulta em maiores picos e vales na topografia da peça. Os fenômenos acima explicados também estão relacionados aos maiores níveis de potência observados na condição MQL;
- Comparando o sistema MQL com o conceito MQL + WCJ, foi possível observar melhoria de todos os resultados e em todas as velocidades de avanço analisadas, sendo a explicação dada pelo fato de o sistema de jato de limpeza contribuir com a limpeza da superfície ativa do rebolo, assim como ter uma contribuição na refrigeração da ferramenta, de modo a garantir um contato adequado dos grãos abrasivos com a peça, predominando maior porcentagem de cisalhamento no contato em relação à condição de apenas MQL, assim como garante uma superfície da peça mais homogênea (de melhor qualidade), visto que também maior porcentagem de remoção de material é feita pelos grãos abrasivos ao invés de ser feito pelo material aderido, além de geometria da peça também mais uniforme em função das menores temperaturas e forças envolvidas durante a operação;

- O sistema MQL + WCJ apresentou os melhores resultados no tópico emissão de dióxido de carbono equivalente (para as 3 velocidades de avanço analisadas: 0,25; 0,50 e 0,75 mm/min), com desempenho similar ao MQL apenas, tendo algumas vantagens apenas que foram mais impactantes de menor consumo de rebolo e menor demanda de energia elétrica, representando reduções de 55 a 65% em relação ao método convencional, o qual tem seu nível de emissão de dióxido de carbono equivalente bastante impactado em função do ciclo de vida do fluido propriamente, desde a fabricação até o descarte, junto à necessidade de reposição de grandes volumes com definida frequência;
- Para a emissão de dióxido de carbono equivalente, com o aumento da velocidade de avanço, foi possível observar uma considerável queda dos níveis de emissão, que é explicada pelo fato de que, para um mesmo intervalo de tempo, tendo vazão de fluido constante, uma quantidade de peças produzidas maior é mais relevante do que um incremento de consumo energético existente em função das maiores potências demandadas na máquina durante a operação. Tal redução chega a ser de 67% para a lubri-refrigeração convencional comparando os avanços de 0,25 e 0,75 mm/min;
- Quanto à análise de custos, o sistema MQL + WCJ apresentou ótimos resultados no quesito custo total, sendo o menor de todos nas condições 0,25 e 0,5 mm/min, mas ligeiramente maior que o método convencional apenas para a condição 0,75 mm/min, sendo que nas situações 0,25 e 0,5 mm/min o custo com a compra e energéticos para funcionamento do sistema de lubri-refrigeração convencional é mais impactante no sentido de resultar em custos menores para o MQL + WCJ, porém, para maior taxa de remoção de material, o consumo energético maior em função das potências envolvidas para realizar remoção de material acaba sendo mais impactante, de modo que o método convencional passa a apresentar um custo ligeiramente menor do que o MQL + WCJ. Já o sistema com apenas MQL apresenta menor custo apenas para a situação de baixa taxa de remoção de material (no caso, sendo o avanço de 0,25 mm/min);
- Assim, o sistema MQL + WCJ aparece como uma solução interessante do ponto de vista de ponderação dos quesitos qualidade da peça / custos / emissão de carbono equivalente, visto que, independentemente da velocidade de avanço analisada, teve desempenho praticamente igual ou melhor em relação aos tópicos custo total e emissão

de dióxido de carbono equivalente, enquanto tendo menor desempenho que o sistema convencional no quesito qualidade da peça, sendo uma escolha interessante quando os requisitos de qualidade de peça atingidos são suficientes, visando as vantagens dos quesitos ambiental e custo, sendo apenas importante avaliação com cuidado do sistema na aplicação em elevadas taxas de remoção de material;

- O uso de apenas MQL mostrou resultados ambientais consideravelmente melhores do que o método de lubri-refrigeração convencional, entretanto, nos critérios qualidade da peça e custos, não teve bons resultados, sendo possivelmente viável em condição de baixa taxa de remoção de material;
- A lubri-refrigeração convencional apresentou os melhores resultados de qualidade de peça e em elevadas taxas de remoção de material, tendo em detrimento o maior nível de emissão de dióxido de carbono equivalente, independente da velocidade de avanço analisada, e riscos de saúde aos operadores, assim como ambientais.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Por meio da realização deste projeto, houve diversas lições aprendidas a respeito do trabalho de retificação de materiais frágeis com rebolo diamantado. Tendo em vista o grande crescimento do mercado de vidros planos sodo-cálcico e vidros especiais, tais como vidros refletivos e vidros condutivos, assim como necessidade de melhor entendimento dos fenômenos envolvidos no processo de retificação de borda do vidro com rebolo de ligante metálico e grãos diamantados utilizando apenas água tratada em circuito fechado como método de refrigeração, propõe-se realização dos seguintes trabalhos:

- Utilização de rebolos diamantados com ligantes metálicos de diferentes graus de dureza, sendo coletados parâmetros de comprimento total de metros lineares usinados em função do desgaste diametral do rebolo, realizando avaliação do acabamento da peça envolvendo níveis de lascas e microlascas encontrados, rugosidade da superfície, etc.;
- Avaliar o desempenho de rebolos de diferentes granulometrias (D76 e D91) na retificação de vidros de espessura 6 mm, coletando comprimento total de

metros lineares usinados em função do desgaste diametral do rebolo e realizando avaliação do acabamento da peça, envolvendo níveis de lascas e microlascas encontrados, rugosidade da superfície, etc.

- Realização de avaliações dos rebolos antes e após utilização no processo de retificação, buscando entender o comportamento de desgaste do rebolo após uma corrida de produção de peças, analisando protrusão dos grãos abrasivos, nível de empastamento, etc.
- Utilização de equipamentos tais como microscopia confocal, microscopia eletrônica de varredura (MEV), Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDX);
- Utilização de equipamento de monitoramento de potência (FIS – Field Instrumentation System) para avaliar estabilidade do processo de usinagem e níveis de consumo de potência ao longo do tempo com cada tipo de rebolo;
- Avaliar impacto da rotação do rebolo, mantendo uma mesma velocidade de avanço, no acabamento da borda do vidro retificado, visando entender nível de acabamento e relacionando com comportamentos de fratura frágil / dúctil;
- Para todas as condições de teste, realizar avaliação holística do impacto no custo do processo e na emissão de carbono equivalente.

REFERÊNCIAS

ABELLAN-NEBOT, J.V.; ROGERO, M.O. Sustainable machining of molds for tile industry by minimum quantity lubrication. **Journal of Cleaner Production**, vol. 240, p. 118082, 2019.

ASLAN, D.; BUDAK, E. Surface roughness and thermo-mechanical force modeling for grinding operations with regular and circumferentially grooved wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 223, p. 75–90, 2015.

AZARHOUSHANG, B.; DANESHI, A.; LEE, D.H. Evaluation of thermal damages and residual stresses in dry grinding by structured wheels. **Journal of Cleaner Production**, vol. 142, p. 1922-1930, 2017.

AZIZI, A., REZAEI, S.M., RAHIMI, A. Study on the rotary cup dressing of CBN grinding wheel and the grinding performance. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 47, p. 1053-1063, 2009.

BADGER, J. Factors affecting wheel collapse in grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, p. 307-310, 2009.

BARMOUZ, M.; AZARHOUSHANG, B.; ZAHEDI, A.; RABIEI, F.; STEINHÄUSER, F. Progress in grinding performance by additive manufacturing of grinding wheels integrated with internal venturi cooling channels and surface slots. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 99, p. 485 – 500, 2023.

BARSOUM, M.W. Fundamentals of Ceramics, **Institute of Physics publishing, Bristol and Philadelphia**, 2003.

BENEDICTO, E.; CAROU, D.; RUBIO, E.M. Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems used in Machining Processes. **Procedia Engineering**, vol. 184, p. 99-116, 2017.

BIANCHI, E.C. **Ação das condições de dressagem na vida de rebolos na retificação de precisão**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1990.

BIANCHI, E.C.; FERNANDES, O.C.; VALARELLI, I.D.D.; SILVA, E.J.; XAVIER, A.P.; SPINELLI, J.E.; NEVES, R.C.; MONICI, R.D.; CAGNIN, A.R.; SOUZA, G.F.; ALVES, A.S. A contribuição dos rebolos superabrasivos com ligante resinoide e vitrificado. **Máquinas e Metais**, nº 398, p. 88-113, 1999.

BIANCHI, E.C.; MONICI, R.D.; NETO, L.D.; AGUIAR, A.R.; GUERMANDI, L.G. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxidos de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado. **Cerâmica**, vol. 57, p. 431-437, 2011.

BIFANO, T.G.; DOW, T.A.; SCATTERGOOD, R.O. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials. **Journal of Engineering for Industry**, vol. 113, p. 184–189, 1991.

CAI, R.; ROWE, W.B. Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 44, p. 1391-1402, 2004.

CATAI, R.E.; BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R. Formas Otimizadas Para A Aplicação De Fluidos De Corte Na Retificação Dos Metais. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT)**, Natal, novembro, 2002.

CEARSOLO, X.; CABANES, I.; SANCHEZ, J.A.; POMBO, I.; PORTILLO, E. Dry-dressing for ecological grinding. **Journal of Cleaner Production**, vol. 135, p. 633-643, 2016.

CHICOT, D.; MERCIER, D.; ROUDET, F.; SILVA, K.; STAIA, M.H.; LESAGE, J. Comparison of instrumented Knoop and Vickers hardness measurements on various soft materials and hard ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, vol. 27, p. 1905-1911, 2007.

CHOUDHARY, A; NASKAR, A; PAUL, S. The wear mechanisms of diamond grits in grinding of alumina and yttria-stabilized zirconia under different cooling-lubrication schemes. **Ceramics International**, vol. 44, p. 17013-17021, 2018.

CHOUDHARY, A; PAUL, S. The wear mechanisms of diamond grits in grinding of alumina and yttria-stabilized zirconia under different cooling-lubrication schemes. **Wear**, vol. 454-455, 203315, 2020.

CRONE, G.A.E.; RUDGE, A.W.; TAYLOR, G.N. Design and performance of airborne radomes: a review, **IEE proceedings F (Communications, Radar Signal Processing)**, vol. 128, p. 451–464, 1981.

DE MORAES, D.L.; LOPES, J.C.; ANDRIOLI, B.V., MORETTI, G.B.; SILVA, A.E.; SILVA, J.M.M.; RIBEIRO, F.S.F.; AGUIAR, P.R.; BIANCHI, E.C. Advances in precision manufacturing towards eco-friendly grinding process by applying MQL with cold air compared

with cooled wheel cleaning jet. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 113, p. 3329–3342, 2021.

DEMIRBAS, E.; KOBYA, M. Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. **Process Safety and Environmental Protection**, vol. 105, p. 79–90, 2017.

DEMIRCI, I.; MEZGHANI, S.; MANSORI, N. E. On Material Removal Regimes for the Shaping of Glass Edges: Force Analysis, Surface Topography and Damage Mechanisms. **Tribology Letters**, vol. 30, p. 141-150, 2008.

DENKENA, B.; GROVE, T.; GÖTTSCHING, T. Grinding with patterned grinding wheels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, vol. 8, p. 12-21, 2015.

DENKENA, B.; GROVE, T.; BREMER, I.; BEHRENS, L. Design of bronze-bonded grinding wheel properties. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 65, p. 333-336, 2016.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais (7ª Ed.)**. Artliber Editora Ltda., 2010.

DOGRA, M.; SHARMA, V.S.; DUREJA, J.S.; GILL, S.S. Environment-friendly technological advancements to enhance the sustainability in surface grinding- A review. **Journal of Cleaner Production**, vol. 197, pp. 218-231, 2018.

EBBRELL, S.; WOOLLEY, N.H.; TRIDIMAS, Y.D. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 40, p. 209-223, 2000.

Electricity prices. https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/ (2020).

EMAMI, M.; SADEGHI, M.H.; SARHAN, A.A.D.; HASANI, F. Investigating the minimum quantity lubrication in grinding of Al₂O₃ engineering ceramic. **Journal of Cleaner Production**, vol. 66, p. 632–643, 2014.

FUJITA, H.; BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R.; SANCHEZ, L.E.A.; SILVA, C.E. Contribuição ao estudo da retificação abrasiva de materiais cerâmicos. **Cerâmica**, vol. 52, p. 269-275, 2006.

FUSSE, R.Y.; BIANCHI, E.C.; FRANÇA, T.V.; CATAI, R.E.; SILVA, L.R.; AGUIAR, P.R. Erros geométricos na retificação do aço SAE HVN-3. **Revista Máquinas & Metais**, nº464, p. 150-163, 2004.

GANESH, I.; SUNDARARAJAN, G.; OLHERO, S.M.; TORRES, P.M.C.; FERREIRA, J.M.F. A novel colloidal processing route to alumina ceramics. **Ceramics International**, vol. 36, p. 1357–1364, 2010.

GARCIA, M. V.; CLAUDIO, J.C.; DINIZ, A.E.; RODRIGUES A.R.; VOLPATO, R.S.; SANCHEZ, L.E.A.; MELLO, H.J.; AGUIAR P.R.; BIANCHI, E.C. Grinding performance of bearing steel using MQL under different dilutions and wheel cleaning for green manufacture. **Journal of Cleaner Production**, vol. 257, p. 120376, 2020.

GARDINIER, C.F. Physical properties of superabrasives. **American Ceramic Society Bulletin**, vol. 67, p. 1006, 1988.

GRAF, W. **Handbook Cylindrical Grinding**. Winterthur Schleiftechnik AG, 2010.

GUERRINI, G.; LANDI, E.; PEIFFER, K.; FORTUNATO, A. Dry grinding of gears for sustainable automotive transmission production. **Journal of Cleaner Production**, vol. 176, p. 76-78, 2018.

GUO, C.; WU, Y.; VARGHESE, V.; MALKIN, S. Temperatures and Energy Partition for Grinding with Vitrified CBN Wheels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 48, p. 247-250, 1999.

GUO, C.; RANGANATH, S.; MCINTOSH, D.; ELFIZY, A. Virtual high performance grinding with CBN wheels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 57, p. 325-328, 2008.

GUO, S.M.; LI, C.H.; ZHANG, Y.B.; WANG, Y.G.; LI, B.K.; YANG, M.; ZHANG, X.P.; LIU, G.T. Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy. **Journal of Cleaner Production**, vol. 140, pp. 1060-1076, 2017.

HADAD, M.; SHARBATI, A. Thermal Aspects of Environmentally Friendly-MQL grinding Process. **Procedia CIRP**, vol. 40, p. 509 – 515, 2016.

HASSUI, A. **Estudo da Vibração Durante o Corte e Centelhamento na Retificação Cilíndrica de Mergulho**. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2002.

HE, T.; LIU, N.; XIA, H.; WU, L.; ZHANG, Y.; LI, D.; CHEN, Y. Progress and trend of minimum quantity lubrication (MQL): A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, vol. 386, p. 135809, 2023.

HECKER, R. L.; LIANG S. Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 43, p. 755–761, 2003.

HITCHCOX, A. **Determine the Cost of Compressed Air for Your Plant**. <https://www.hydraulicspneumatics.com/technologies/aircompressors/article/21884932/determine-the-cost-of-compressed-air-for-your-plant> (2015).

HOLZ, R.; SAUREN, J. Schleifen mit Diamant und CBN (1st ed.). **Winter Diamantwerkzeuge Bornitridwerkzeuge**, p. 172, 1988.

HUANG, X.; REN, Y.; LI, T.; ZHOU, Z.; ZHANG, G. Influence of minimum quantity lubrication parameters on grind-hardening process. **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 33, p. 69–76, 2018.

HUANG, H.; LI, X.; MU, D.; LAWN, B. Science and Art of Ductile Grinding of Brittle Solids. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 161, p. 103675, 2021.

ICERI, D.M.; SOUSA, R.M.; DESTRO, R.S.; OIKAWA, M.H.; BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R.; FORTULAN, C.A. Comparação entre os métodos de aplicação de fluido de corte convencional e otimizado na retificação plana de cerâmicas. **Cerâmica**, vol. 58, p. 84-89, 2012.

INASAKI, I. Fluid Film in the Grinding Arc of Contact. **CIRP Meeting, Paris**, p. 27–31, 1998.

IRANI, R.A.; BAUER, R.J.; WARKENTIN, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 45, pp. 1696-1705, 2005.

JACKSON, M.J.; DAVIM, J.P. **Machining with abrasives**. Springer, 2011.

JAVARONI, R.L.; LOPES, J.C.; GARCIA, M.V. *et al.* Grinding hardened steel using MQL associated with cleaning system and cBN wheel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 107, p. 2065–2080, 2020.

JIANG, Z.; GAO, D.; LU, Y.; LIU, X. Optimization of Cutting Parameters for Trade-off Among Carbon Emissions, Surface Roughness, and Processing Time. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, vol. 32, p. 94, 2019.

KHARAGPUR, IIT Version 2 ME. **Lesson 27: Basic principle, purpose and application of grinding; Module 5: Abrasive processes (Grinding)**. Manufacturing Processes II, 2008.

KING, R. I.; HAHN, R. S. **Handbook of modern technology (3^a Ed.)**, p.119-167, 1992.

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability profile of hard cutting and grinding processes. **Annals of the CIRP**, vol. 54, p. 557-580, 2005.

KLOCKE, F. **Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping**. Springer, p. 433, 2009.

KOPAC, J.; KRAJNIK, P. Review of high-performance grinding in precision manufacturing processes. **12^a Conferência Científica Internacional, Achievements in Mechanical & Materials Engineering**, 2003.

KOPAC, J.; KRAJNIK, P. High-performance grinding—A review. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 175, p.278-284, 2006.

KOVACH, J.A.; BLAU, P.J.; MALKIN, S.; SRINIVASAN, S.; BANDYOPADHYAY, B.; ZIEGLER, K. A feasibility investigation of high speed, low damage grinding process for advanced Ceramics. **Proceedings of the 5th International Grinding Conference**, vol. I, SME, 1993.

KRUEGER, M.K.; YOON, S.C.; GONG, D. New Technology in Metalworking Fluids and Grinding Wheels Achieves Tenfold Improvement in Grinding Performance. **Coolants/Lubricants for Metal Cutting and Grinding Conference**, 2000.

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**, vol. 18, p. 53–59, 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**, vol. 41, p. 210-221, 2013.

LI, Z.C; LIN, B.; XU, Y.S.; HU, J. Experimental studies on grinding forces and force ratio of the unsteady-state technique. **Journal of Material Processing Technology**, vol. 129, p. 76-80, 2002.

LIANG, S.X. **Grinding of ceramics: mechanisms, forces and coolant evaluation**. Dissertação de Mestrado – University of Connecticut, 1992.

LINKE, B. A review on properties of abrasive grits and grit selection. **International Journal of Abrasive Technology**, vol. 7, p. 46–58, 2015.

LINKE, B. **Life Cycle and Sustainability of Abrasive Tools**. RWTHedition, 2016.

LIAO, T. W.; LI, K.; MCSPADDEN, S. B. Wear mechanisms of diamond abrasives during transition and steady stages in creep-feed grinding of structural ceramics. **Wear**, vol. 242, p. 28–37, 2000.

LIU, G.; XIE, Z.; WU, Y. Effectively inhibiting abnormal grain growth of alumina in ZTA with low-content fine-sized ZrO₂ inclusions introduced by Infiltration and In Situ Precipitation. **Journal of the American Ceramic Society**, vol. 93, p. 4001–4004, 2010.

LOPES, J.C.; GARCIA, M.V.; VALENTIM, M. *et al.* Grinding performance using variants of the MQL technique: MQL with cooled air and MQL simultaneous to the wheel cleaning jet. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 105, p. 4429–4442, 2019.

MALKIN, S.; RITTER, J.E. Grinding mechanisms and strength degradation for ceramics. **Journal of Engineering for Industry**, vol. 111, p. 167–174, 1989.

MALKIN, S.; HWANG, T.W. Grinding mechanisms for ceramics. **CIRP Annals**, vol. 45, p. 569-580, 1996.

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

MAO, C.; ZOU, H.; HUANG, X.; ZHANG, J.; ZHOU, Z. The influence of spraying parameters on grinding performance for nanofluid minimum quantity lubrication. **The**

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 64, p. 1791-1799, 2013.

MARINESCU, I.; TOENSHOFF, H.; INASAKI, I. **Handbook of Ceramic Grinding and Polishing**. Noyes, 2001.

MARINESCU, I.D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels (1st ed.)**. CRC Press, 2007.

MARINESCU, I.D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. **Tribology of Abrasive Machining Processes**. Elsevier, 2013.

MARINESCU, I.D.; HITCHINER, M.P.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. CRC Press, 2016.

MARKET RESEARCH REPORT, **Advanced Ceramics Market by Material (Titanate, Alumina, Zirconia, Silicon Carbide), Class (Monolithic Ceramics, Ceramic Coatings, Ceramic Matrix Composites), End-Use Industry (Medical, Electrical & Electronics), and Region - Global Forecast to 2021**, 2017.

MIA, M.; GUPTA, M.K.; SINGH, G.; KRÓLCZYK, G.; PIMENOV, D.Y. An approach to cleaner production for machining hardened steel using different cooling-lubrication conditions. **Journal of Cleaner Production**, vol. 187, p. 1069-1081, 2018.

MONICI, R.D.; BIANCHI, E.C.; FREITAS, J.R.; AGUIAR, P.R. Estudo Do Método De Aplicação De Fluidos De Corte No Processo De Retificação. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (1º COBEF)**, Curitiba, 2001.

NEAUPORT, J.; CORMONT, P.; LEGROS, P.; AMBARD, C.; DESTRIEATS, J. Imaging subsurface damage of grinded fused silica optics by confocal fluorescence microscopy. **Optics Express**, vol. 17, p. 3545 – 3554, 2009.

NETO, L.M.G.; FUNES, H.; GONÇALVES, R.M.; BIANCHI, E.C. Análise Do Erro De Circularidade De Peças Submetidas A Rotações Críticas Durante O Processo De Retificação Centerless. **6º Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação (6º COBEF)**, Caxias do Sul, 2011.

NOVASKI, O.; RIOS, M. Vantagens do uso de fluidos sintéticos na usinagem. **Revista Metal Mecânica**, abril/maio, p 56-62, 2002.

NOWAK, P.; KUCHARSKA, K.; KAMIŃSKI, M. Ecological and Health Effects of Lubricant Oils Emitted into the Environment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, vol. 16, p. 3002, 2019.

NUSSBAUM, G.C. **Rebolos e Abrasivos Tecnologia Básica**. Ícone, 2017.

OIKAWA, M.H.; BIANCHI, E.C.; DESTRO, R.S.; SOUSA, R.M.; CANARIM R.C.; ALVES, M.C.S.; AGUIAR, P.R. Cerâmicas avançadas no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho utilizando a técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL) com rebolos diamantados. **Revista Matéria**, vol. 16, p. 560-573, 2011.

OLIVEIRA, J.F.G.; BIANCHI, E.C.; SOUZA, G.F. O desempenho de rebolos pode ser controlado pela dressagem. **Máquinas e Metais**, nº 317, junho, p. 12-28, 1992.

OLIVEIRA, D.J.; GUERMANDI, L.G.; BIANCHI, E.C.; DINIZ, A.E.; AGUIAR, P.R.; CANARIM, R.C. Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 212, pp. 2559-2568, 2012.

ÖZTÜRK, S.; KAHRAMAN, M.F. Modeling and optimization of machining parameters during grinding of flat glass using response surface methodology and probabilistic uncertainty analysis based on Monte Carlo simulation. **Measurement**, vol. 145, p. 274-291, 2019.

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

PRECEDENCE RESEARCH. **Advanced Ceramics Market**. Report 1143, Categoria Química e Material, 2023. <https://www.precedenceresearch.com/advanced-ceramics-market>.

PUERTO, P.; FERNÁNDEZ, R.; MADARIAGA, J.; ARANA, J.; GALLEGO, I. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **The Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC)**, vol. 63, p. 174-182, 2013.

PUSAVEC(a), F.; KRAJNIK, P.; KOPAC, J. Transitioning to sustainable production Part I: application on machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, vol. 18, p. 174-184, 2010.

PUSAVEC(b), F.; KRAMAR, D.; KRAJNIK, P.; KOPAC, J. Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, vol. 18, p. 1211–1221, 2010.

REN, Y.H., ZHANG, B., ZHOU, Z.X. Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 58, p. 299–302, 2009.

RIBEIRO, F.S.F.; LOPES, J.C.; GARCIA, M.V. *et al.* New knowledge about grinding using MQL simultaneous to cooled air and MQL combined to wheel cleaning jet technique. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 109, p. 905-917, 2020.

RODRIGUEZ, R. L.; CLAUDIO, J.C.; GARCIA, M.V.; SABINO, F.S.F.; DINIZ, A.E.; SANCHEZ, L.E.A.; MELLO, H.J.; AGUIAR P.R.; BIANCHI, E.C. Application of hybrid eco-friendly MQL+WCL technique in AISI 4340 steel grinding for cleaner and greener production. **Journal of Cleaner Production**, p. 124670, 2020.

ROWE, W.B. **Principles of Modern Grinding Technology (2nd ed.)**. William Andrew, 2014.

SAID, Z.; GUPTA, M.; HEGAB, H.; ARORA, N.; KHAN, A.M.; JAMIL, M.; BELLOS, E. A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 105, p. 2057–2086, 2019.

SALMON, S. C. **Modern Grinding Process Technology**. MacGraw-Hill, 1992.

SANCHEZ, J.; POMBO, I.; ALBERDI, R.; IZQUIERDO, B.; ORTEGA, N.; PLAZA, S.; MARTINEZ-TOLEDANO, J. Machining evaluation of a hybrid MQLCO₂ grinding technology, **Journal of Cleaner Production**, vol. 18, p. 1840–1849, 2010.

SANKARANARAYANAN, R.; RAJESH, J.H.N.; SENTHIL, K.J.; KROLCZYK, G.M. A comprehensive review on research developments of vegetable-oil based cutting fluids for sustainable machining challenges. **Journal of Manufacturing Processes**, 2021.

SATO, B.K.; LOPES, J.C.; RODRIGUEZ, R.L.; GARCIA, M.V.; MIA, M.; RIBEIRO, F.S.F.; SANCHEZ, L.E.A.; AGUIAR, P.R.; BIANCHI, E.C. Novel comparison concept between CBN and Al₂O₃ grinding process for eco-friendly production. **Journal of Cleaner Production**, vol. 330, p. 129673, 2022.

SHAMRAY, S.; AZARHOUSHANG, B.; PAKNEJAD, M.; BUECHLER, A. Ductile-brittle transition mechanisms in micro-grinding of silicon nitride. **Ceramics International**, vol. 48, p. 34987 – 34988, 2022.

SHARMA, A.K.; TIWARI, A.K.; DIXIT, A.R. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, vol. 127, p. 1-18, 2016.

SHEN, B.; SHIH, A.J. Minimum Quantity Lubrication (MQL) Grinding Using Vitrified cBN Wheels. **Transactions of NAMRI/SME**, vol. 37, p. 129-136, 2009.

SILVA, R.S.; CORRÊA, E.C.S.; BRANDÃO, J.R.; ÁVILA, F. Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **Journal of Cleaner Production**, 2013.

SILVA, L.R.; CORRÊA, E.C.S.; BRANDÃO, J.R.; DE ÁVILA, R.F. Environmentally friendly manufacturing: behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **Journal of Cleaner Production**, vol. 256, p. 103287, 2020.

SKERLOS, S.J. **Cutting Fluids and Their Environmental Impact**. In: WANG, Q.J.; CHUNG, YW. *Encyclopedia of Tribology*. Springer, 2013.

SOARES, D. D.; OLIVEIRA, J.F.G. Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais. **Revista Máquina & Metais**, 436, p. 140-157, 2002.

SOUZA, A.G.O. MONITORAMENTO DA DRESSAGEM NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica**, Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, Bauru, 2009.

SRIVASTAVA, U.M. Review of Dressing and Truing Operations for Grinding Wheels. **International Journal of Engineering Science and Technology**, vol .5, p. 8-19, 2013.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de Corte I. (6ª Ed.)**. Editora UFSC, 2005.

STEPHENSON, D.A.; AGAPIOU, J.S. **Metal Cutting Theory and Practice (2ª Ed.)**. **CRC Press**, 2006.

SUZDAL'TSEV, E.I. Radio-transparent ceramics: yesterday, today, tomorrow. **Refractories and Industrial Ceramics**, vol. 55, p. 377–390, 2015.

TABORGA, J.D.M. **Análise E Monitoramento Da Retificação Do Ferro Fundido Nodular Com Rebolos De Nitreto De Boro Cúbico (CBN)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

TABORGA, A.R.M.; TABORGA, J.D.M.; WEINGAERTNER, W.L. Análise Da Rugosidade Obtida Na Retificação De Ferro Fundido Nodular Utilizando Rebolos De SiC E Al₂O₃. **2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (2º COBEF)**, 2003.

THAVILIAN, A.M.; LIU, Z.; CHAMPLAUD, H.; HAZEL, B.; LAGACÉ, M. Characterization of grinding wheel grain topography under different robotic grinding conditions using confocal microscope. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 80, p. 1159 – 1171, 2015.

THOMAZELLA, I.H.; AGUIAR, P.R.; BIANCHI, E.C.; SOUZA, A.G.O.; CANARIM, R. C.; BOUJU, M. Study of the cutting fluid influence on acoustic emission signal during the dressing operation. **2nd International Researchers Symposium on Innovative Production Machines and Systems**, Ischia, 2009.

TIAN, L.; FU, Y.; XU, J.; LI, H.; DING, W. The influence of speed on material removal mechanism in high speed grinding with single grit. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 89, p. 192-201, 2015.

TOLOSA, L.F. **O desenvolvimento do míssil de médio alcance com guiagem radar (BVR): a continuidade de uma parceria de sucesso com a África do Sul**. Trabalho de Conclusão de Curso - Altos Estudos de Política e Estratégia, 2017.

TÖNSHOFF, H.K.; LIERSE, T.J.A.R.K.; INASAKI, I. Grinding of advanced ceramics, em: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. **Machining of Ceramics and Composites**, Marcel Dekker Inc, New York, 1998.

TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. **Sensors in manufacturing**. Wiley-VCH publisher, 2001.

UHLMANN, E. Technological and Ecological Aspects of Cooling Lubrication during Grinding of Ultra-hard Materials. **Ultrahard Materials Technical Conference**, Conference Papers, 1998.

VALENTE, C.M.O. **Implementação de sistema para eliminação automática de rebarbas resultantes de processos de usinagem**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

WANG, Y.; LI, C.; ZHANG, Y.; YANG, M.; LI, B.; JIA, D.; HOU, Y.; MAO, C. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 487–499, 2016.

WANG, J.P. **Avaliação da retificação com rebolo de CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho**. Dissertação de Mestrado, USP, São Carlos, 2008.

WANG, Y.; LI, C.; ZHANG, Y.; YANG, M.; LI, B.; JIA, D.; HOU, Y.; MAO, C. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils. **Journal of Cleaner Production**, vol. 127, p. 487–499, 2016.

WANG, Z.; ZHANG, T.; YU, T.; ZHAO, J. Assessment and optimization of grinding process on AISI 1045 steel in terms of green manufacturing using orthogonal experimental design and grey relational analysis. **Journal of Cleaner Production**, vol. 253, p. 119896, 2020.

RAHIMOV, M.; AKGÜN, M. Treatment of metal cutting fluid wastewater over Pt/Al₂O₃ and Ru/Al₂O₃ in supercritical water medium. **Journal of Water Process Engineering**, vol. 45, p. 102571, 2022.

WEBSTER, J. Selection of coolant type and application technique in grinding. **Supergrind**, novembro 2-3, p. 205-220, 1995.

WEBSTER, J.; TRICARD, M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 53, 2004.

WEGENER, K.; HOFFMEISTER, H.W.; KARPUSCHEWIKSI, B.; KUSTER, F.; HAHMANN, W.C.; RABIEY, M. Conditioning and monitoring of grinding wheels. **CIRP Annals**, vol. 60, p. 757-777, 2011.

WEIMER, A.W. **Carbide, nitride and boride materials synthesis and processing**. Chapman & Hall, London, 1997.

WESSEL, J.K. **Handbook of Advanced Ceramics and Composites**. Wiley-Interscience, 2004.

WINTER(a), M.; LI, W.; KARA, S.; HERRMANN, C. Determining optimal process parameters to increase the eco-efficiency of grinding processes. **Journal of Cleaner Production**, vol. 66, p. 644–654, 2014.

WINTER(b), M.; HERRMANN, C. Eco-Efficiency of alternative and conventional cutting fluids in external cylindrical grinding. **Procedia CIRP**, vol 15, p. 68-73, 2014.

WINTER(a). **Catálogo geral de produtos da Winter** (Precision grinding solutions), 2015.

WINTER(b), M.; IBBOTSON, S.; KARA, S.; HERRMANN, C. Life cycle assessment of cubic boron nitride grinding wheels. **Journal of Cleaner Production**, vol. 107, p. 707-721, 2015.

XIAO Y.; ZHAO, R.; YAN, W.; ZHU, X. Analysis and Evaluation of Energy Consumption and Carbon Emission Levels of Products Produced by Different Kinds of Equipment Based on Green Development Concept. **Sustainability**, vol. 14, p. 7631, 2022.

YAN, Y.; XU, J.; WIERCIGROCH, M. Non-linear analysis and quench control of chatter in plunge grinding. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, vol. 70, p. 134-144, 2015.

YANG, X.; BAI, J.; JING, W.; WANG, B.; YANG, J. Strengthening of low-temperature sintered vitrified bond cBN grinding wheels by pre-oxidation of cBN abrasives. **Ceramics International**, vol. 42, p. 9283-9286, 2016.

YIN, L.W.; ZOU, Z.D.; LI, M.S.; LIU, Y.X.; CUI, J.J.; HAO, Z.Y. Characteristics of some inclusions contained in synthetic diamond single crystals. **Materials Science and Engineering: A**, vol. 293, p. 107–111, 2000.

YOUSSEF, H.A.; EL-HOFY, H. **Machining Technology: Machine Tools and Operations (1st Ed.)**, CRC Press, 2008.

ZHANG, J.; LI, C.; ZHANG, Y.; YANG, M.; JIA, D.; LIU, G.; HOU, Y.; LI, R.; ZHANG, N.; W.U.; Q.; CAO, H. Experimental assessment of an environmentally friendly grinding process using nanofluid minimum quantity lubrication with cryogenic air. **Journal of Cleaner Production**, vol. 193, p. 236-248, 2018.