



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
FACULDADE DE ENGENHARIA – Campus de Bauru

DANILO DE JESUS OLIVEIRA

CONTRIBUIÇÕES AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS NO PROCESSO
DE RETIFICAÇÃO COM MQL

BAURU

2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



DANILO DE JESUS OLIVEIRA

CONTRIBUIÇÕES AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO COM MQL

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

Área de concentração: Processos de fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Claudio Lopes

BAURU

2024

O48c	Oliveira, Danilo de Jesus Contribuições ambientais e tecnológicas no processo de retificação com MQL / Danilo de Jesus Oliveira. -- Bauru, 2024 112 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru Orientador: José Claudio Lopes 1. Retificação. 2. Mínima quantidade de lubrificante (MQL). 3. Produção mais limpa. 4. Cerâmicas avançadas. 5. Emissões de CO2. I. Título.
------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE DANILO DE JESUS OLIVEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 12 dias do mês de dezembro do ano de 2024, às 10h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de DANILO DE JESUS OLIVEIRA, intitulada **APRIMORAMENTO DA TÉCNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL) NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO DE CERÂMICAS AVANÇADAS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual Paulista UNESP Faculdade de Engenharia Câmpus de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia - Unesp/Câmpus de Bauru, Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual Paulista UNESP Faculdade de Engenharia Câmpus de Bauru, Prof. Dr. FERNANDO SABINO FONTEQUE RIBEIRO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Centro Universitário Unifio, Prof. Dr. GILSON EDUARDO TARRENTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Processos Industriais / FATEC . Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES

Documento assinado digitalmente



JOSÉ CLAUDIO LOPES

Data: 13/12/2024 09:29:00-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Bauru

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
DANILO DE JESUS OLIVEIRA

DE: "APRIMORAMENTO DA TÉCNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL) NO
PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO DE CERÂMICAS AVANÇADAS"

PARA:

CONTRIBUIÇÕES AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO COM MQL

Bauru, 12 de dezembro de 2024.

Documento assinado digitalmente
 JOSE CLAUDIO LOPES
Data: 13/12/2024 09:29:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Claudio Lopes
Orientador

Aos meus pais Francisco e Rita (*In Memoriam*),
minha esposa Débora e nossos filhos Daniel e
Dante.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a DEUS pelo dom da vida, pela saúde, força, paciência para resolver as adversidades e por todas as bênçãos.

Aos meus pais Francisco e Rita (*In Memoriam*), aos quais devo minha vida, por me ensinarem valores e sempre me incentivarem a buscar novas conquistas.

À minha esposa Débora e a meus filhos, pela paciência pelo carinho, apoio e dedicação.

Expresso profunda gratidão ao meu orientador Professor Doutor José Claudio Lopes e ao Professor Titular Eduardo Carlos Bianchi, por todas as oportunidades que me foram concedidas, constante apoio, confiança e compreensão nos momentos de dificuldade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq, por ter nos concedido recursos para realizar esta pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Bauru, e a todos os professores que contribuíram para minha formação e neste trabalho.

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.

Aos demais amigos discentes pesquisadores do LUA, Benício Nacif Ávila, Matheus de Souza Rodrigues, Guilherme Guerra de Souza, Anthony Gaspar Talon e Fernando Sabino Fontequê Ribeiro.

Aos professores Alessandro Roger Rodrigues e Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, pelo suporte para a pesquisa e publicação de artigo.

Aos professores da FEM UNICAMP, Amauri Hassui e Anselmo Eduardo Diniz, pelos inúmeros aprendizados na área de usinagem

Às empresas Nikkon Ferramentas de Corte LTDA do Grupo Saint Gobain e Quimatic Tapmatic LTDA pelas doações dos rebolos e fluidos de corte respectivamente.

A todos os amigos e familiares que contribuíram mesmo que de forma indireta para realização deste trabalho.

"A verdadeira sabedoria consiste em saber como aumentar o bem-estar do mundo."

Benjamin Franklin

RESUMO

A aplicação da mínima quantidade de lubrificante (MQL) na usinagem surgiu como uma alternativa para reduzir o uso em abundância de fluidos de corte e, com isso, atingir uma produção mais sustentável e ambientalmente limpa. Essa ação está relacionada ao alerta global sobre a geração de gases de efeito estufa, como o CO₂. Na retificação, apesar de ser considerada uma técnica inovadora no aspecto ambiental, sua aplicação é restrita devido à geração excessiva de calor e ao entupimento dos poros do rebolo causado pelos cavacos, prejudicando a qualidade final do produto e aumentando o desgaste da ferramenta. Técnicas auxiliares, como o uso de jato de limpeza de rebolos, direcionam um jato de ar comprimido no sentido oposto à superfície de corte do rebolo, auxiliando na remoção do entupimento e possibilitando a aplicação eficiente do MQL. Este estudo analisou a influência de três diferentes técnicas de aplicação de fluido de corte no processo avançado de retificação de cerâmica (Al₂O₃) usando quatro diferentes ângulos de aplicação do jato de limpeza de rebolo (MQL+JLR 0°; MQL+JLR 30°; MQL+JLR 60°; e MQL+JLR 90°); combinados com três diferentes velocidades de avanços (0,25mm/min; 0,50 mm/min e 0,75 mm/min). Consideraram-se as variáveis de saída do processo: rugosidade, circularidade, desgaste diametral, relação G, potência de retificação, análise de custos do processo e a emissão de CO₂ para cada aplicação. Como resultado, a aplicação do fluido de corte pela técnica MQL combinada com jato de limpeza a 30° apresentou resultados de rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, relação G e potência de retificação maiores em comparação à técnica convencional, porém menores que os resultados obtidos com o uso exclusivo de MQL e as outras condições com uso de jato de limpeza do rebolo em diferentes posicionamentos. Já nos resultados de custo e emissão de poluentes, os valores foram 35% menor em custo para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min, e 77% menor na emissão de CO₂, o que reduz significativamente o impacto ambiental pela diminuição da pegada de carbono gerada pelo processo.

Palavras chaves: retificação, mínima quantidade de lubrificante (MQL), produção mais limpa, jato de limpeza do rebolo (JLR), cerâmicas avançadas, sustentabilidade na usinagem, emissões de CO₂.

ABSTRACT

The application of Minimum Quantity Lubricant (MQL) in machining has emerged as an alternative to reduce the excessive use of cutting fluids, thereby achieving a more sustainable and environmentally friendly production. This approach is aligned with global concerns about greenhouse gas emissions, such as CO₂. In grinding, although considered an innovative technique in terms of environmental impact, its application is restricted due to excessive heat generation and clogging of grinding wheel pores caused by chips, which compromises the final product quality and increases tool wear. Auxiliary techniques, such as the use of a grinding wheel cleaning jet, direct a stream of compressed air in the opposite direction to the grinding wheel's cutting surface, helping to remove clogging and enabling the efficient application of MQL. This study analyzed the influence of three different cutting fluid application techniques in the advanced grinding process of ceramics (Al₂O₃) using four distinct grinding wheel cleaning jet angles (MQL+WCL 0°, MQL+WCL 30°, MQL+WCL 60°, and MQL+WCL 90°) combined with three different feed rates (0.25 mm/min, 0.50 mm/min, and 0.75 mm/min). The output variables considered in the process were surface roughness, roundness, wheel wear, G-ratio, grinding power, process cost analysis, and CO₂ emissions for each application. As a result, the cutting fluid application using the MQL technique combined with a 30° cleaning jet angle showed better results for surface roughness, roundness, grinding wheel wear, G-ratio, and grinding power when compared to the conventional technique, but inferior to the results obtained with the exclusive use of MQL and other conditions using different cleaning jet angles. In terms of cost and pollutant emissions, the values were 35% lower in cost at a feed rate of 0.25 mm/min and 77% lower in CO₂ emissions, significantly reducing the environmental impact by decreasing the carbon footprint of the process.

Keywords: grinding, minimum quantity lubricant (MQL), clean production, grinding wheel cleaning jet (WCL), advanced ceramics, sustainability in machining, CO₂ emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Retificação cilíndrica externa de mergulho, adaptado (MALKIN & GUO, 2008).	25
Figura 2: Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho, adaptado (SOARES & OLIVEIRA, 2002).	26
Figura 3: - Formação do cavaco por um grão abrasivo, adaptado. (KLOCKE, 2009).	33
Figura 4: Processo de formação de trincas, (MALKIN & GUO, 2008).	33
Figura 5: Processo de formação de cavacos em cerâmicas (MAMALIS <i>et al.</i> , 2002).	34
Figura 6: Principais constituintes do rebolo (WEBSTER & TRICARD, 2004).	35
Figura 7: Características dos abrasivos (MALKIN & GUO, 2008).	37
Figura 8: Fenômeno do empastamento do rebolo (OLIVEIRA, <i>et al.</i> , 2012).	49
Figura 9: Rebolo empastado com cavacos aderidos (aumento de 100X) (OLIVEIRA, <i>et al.</i> , 2012).	50
Figura 10: Limpeza do rebolo com jato de ar, adaptado (OLIVEIRA, <i>et al.</i> , 2012).	51
Figura 11: Efeito do jato de ar comprimido na limpeza do rebolo. (OLIVEIRA, <i>et al.</i> , 2012)	52
Figura 12: (a) fixação e da peça no dispositivo. (b) dimensões da peça.	57
Figura 13: Sistema de lubrificação convencional.	58
Figura 14: Aplicador ITW Accu-lube 76053D.	59
Figura 15: Projeto do bocal para experimentação com MQL (SILVA, <i>et al.</i> , 2007).	60
Figura 16: Sistema de lubrificação MQL.	60
Figura 17: Bocal de limpeza.	61
Figura 18: Fixação do bocal de limpeza.	61
Figura 19: Detalhe dos ângulos de incidência do jato de ar comprimido.	63
Figura 20: Matriz de ensaios.	63
Figura 21: Operação de dressagem do rebolo.	65
Figura 22: Medição da rugosidade.	67
Figura 23: Processo de marcação do rebolo.	68
Figura 24: Medição do desgaste diametral do rebolo.	68
Figura 25: Esquema da medição do desgaste do rebolo.	69
Figura 26: Rugosidades (Ra) nas diferentes técnicas.	77
Figura 27: Microscopia confocal: (a) convencional; (b) MQL; (c) MQL + JLR 30°.	80
Figura 28: Circularidade nas diferentes técnicas.	81
Figura 29: Desgaste diametral do rebolo nas diferentes técnicas.	83
Figura 30: Relação G nas diferentes técnicas.	85
Figura 31: Potência de retificação nas diferentes técnicas.	87
Figura 32: Custos nas diferentes técnicas.	89
Figura 33: Emissão de Poluentes nas diferentes técnicas.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características físicas e mecânicas de algumas cerâmicas avançadas (adaptado de Mamalis, <i>et al.</i> , 2002)	40
Tabela 2: Parâmetros de retificação	64
Tabela 3: Parâmetros fixos para o cálculo de custo	71
Tabela 4: Parâmetros variáveis para o cálculo de custo	72
Tabela 5: Parâmetros fixos para o cálculo de emissão de poluentes	74
Tabela 6: Parâmetros variáveis para o cálculo de emissão de poluentes	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a - profundidade de retificação	[mm]
a_d - profundidade de dressagem	[μm]
a_{sw} - profundidade desgastada do rebolo a cada volta	[mm]
a_t - a expansão térmica do rebolo e da peça	[mm]
b - largura de retificação	[mm]
C_{ar} - custo de ar comprimido por volume	[US\$/m ³]
CBN – nitreto cúbico de boro	
C_e - custo de energia	[US\$/kWh]
CE_e - emissão de carbono por energia desprendida	[kgCO ₂ /MJ]
CE_{oil} - emissão de carbono por volume de óleo	[kgCO ₂ /l]
C_f - custo de fluido em uso	[US\$/l]
CNC - comando numérico computadorizado	
C_r - custo total do rebolo	[US\$]
C_s - custo por volume útil do rebolo	[US\$/mm ³]
C_w - custo de descarte de óleo	[US\$/l]
d_e – diâmetro equivalente	[mm]
d_s – diâmetro do rebolo	[mm]
d_w – diâmetro da peça	[mm]
F_n - força normal	[N]
F_t - força tangencial	[N]
G - relação G	[-]
h_{eq} - espessura equivalente de corte	[mm]
h_{max} - espessura teórica máxima do cavaco	[mm]
k_p - diluição de óleo	[-]
L - espaçamento médio entre grãos abrasivos	[mm]
l_c - comprimento de contato	[mm]
MQL - mínima quantidade de lubrificante	
N_c - número de recirculações de fluido	[-]
N_d - quantidade de peças entre dressagens	[-]
n_s - rotação do rebolo	[rpm]
n_w - rotação da peça	[rpm]
P - potência de retificação	[W]
P_{ar} - potência do compressor de ar	[W]

P_{bo} - potência da bomba de óleo	[W]
P_c - potência de retificação	[W]
Q_w - taxa de remoção de material	[mm ³ /s]
Q'_w - taxa específica de remoção de material	[mm ² /s]
R - distância percorrida pela ferramenta até o contato	[mm]
r - avanço de retração e aproximação da ferramenta	[mm/min]
R_a - rugosidade média	[μm]
RPM - rotações por minuto	[rpm]
t_s – tempo de centelhamento (<i>spark-out</i>)	[s]
V_{ar} - Vazão de ar comprimido	[m ³ /min]
v_f - velocidade de avanço ou mergulho	[m/min]
V_{jet} - Vazão de fluido de corte	[l/min]
v_s - velocidade tangencial (ou periférica) do rebolo	[m/s]
V_s - volume de rebolo gasto	[mm ³]
v_w - velocidade tangencial (ou periférica) da peça	[m/s]
V_w - volume de material removido	[mm ³]
δ - deflexões do sistema	[mm]
Ω - velocidade de rotação da ferramenta	[rad/s]

Sumário

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	22
1.2 OBJETIVO GERAL	23
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 A RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO.....	24
2.1.1 O ciclo de retificação cilíndrica externa de mergulho.....	25
2.1.2 Parâmetros de corte do processo de retificação.....	26
2.1.2.1 Velocidade de Corte (v_s).....	27
2.1.2.2 Velocidade da Peça (v_w)	27
2.1.2.3 Velocidade de mergulho ou velocidade de avanço (v_f)	28
2.1.2.4 Profundidade de corte (a)	28
2.1.2.5 Comprimento de contato (l_c).....	29
2.1.2.6 Taxa de remoção de material	30
2.1.2.7 Espessura equivalente de corte.....	31
2.2 MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO	32
2.3 O REBOLO DIAMANTE.....	35
2.3.1 Materiais abrasivos	35
2.3.2 Propriedades dos abrasivos	36
2.3.3 Grãos abrasivos convencionais.....	37
2.3.4 Grãos superabrasivos	38
2.3.5 Diamante	39
2.4 CERÂMICAS AVANÇADAS	39
2.5 OS PROBLEMAS DOS FLUIDOS DE CORTE.....	41
2.5.1 Custos dos fluidos de corte.....	43
2.5.2 Manutenção e descarte.....	43

2.6	FORMAS ALTERNATIVAS DE LUBRIFRIGERAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	45
2.7	A TÉCNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL).....	46
2.8	FENÔMENO DO EMPASTAMENTO DAS POROSIDADES DO REBOLO	48
2.9	LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO COM AR COMPRIMIDO	50
2.10	AS VARIÁVEIS DE SAÍDA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	52
2.10.1	Rugosidade	52
2.10.2	Erro de Circularidade	53
2.10.3	Desgaste diametral do rebolo	53
2.10.4	Potência de retificação.....	55
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS	56
3.1.1	Retificadora cilíndrica externa.....	56
3.1.2	Corpo de prova	56
3.1.3	Rebolo Utilizado.....	57
3.1.4	O sistema de refrigeração convencional	57
3.1.5	O sistema MQL.....	58
3.1.6	O sistema de limpeza do rebolo	60
3.1.7	Sistema de aquisição de dados de potência elétrica consumida	61
3.2	CLASSIFICAÇÃO E PARÂMETROS DOS ENSAIOS	62
3.3	SEQUÊNCIA DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	65
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA.....	66
3.4.1	Medição da Rugosidade	66
3.4.2	Medição da Circularidade	67
3.4.3	Medição do desgaste diametral do rebolo	67
3.4.4	Potência elétrica do motor	69

3.4.5	Custo de fabricação	69
3.4.6	Emissão de Poluentes	73
3.4.7	Microscopia confocal.....	76
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
4.1	RUGOSIDADE	77
4.2	CIRCULARIDADE.....	80
4.3	DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO.....	82
4.4	RELAÇÃO G	84
4.5	POTÊNCIA DE RETIFICAÇÃO	86
4.6	ANÁLISE DE CUSTOS E POLUIÇÃO.....	88
5.	CONCLUSÕES.....	92
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
7.	RELATO	95
	REFERÊNCIAS	96

1. INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento sustentável afirma que as dimensões econômica, social e ambiental devem ser harmoniosamente integradas. A ideia de sustentabilidade deu origem uma série de políticas, métodos e práticas para promover avanços e quebrar paradigmas em diversas áreas. Por outro lado, conciliando as dimensões do tripé da sustentabilidade (lucro, pessoas e planeta), como também são conhecidos, ainda é um problema global, especialmente em termos ambientais. Por exemplo, consumo global de energia e emissões de CO₂ per capita aumentaram drasticamente (NA, *et al.*, 2021; KHAN, *et al.*, 2021).

Neste contexto, as produções mais limpas tornaram-se uma tendência mundial. Na indústria, a competitividade, a produtividade e a segurança estão diretamente relacionadas, garantindo a sobrevivência e o sucesso do mercado (DUAN, *et al.*, 2023). Portanto, os processos de fabricação devem ser realizados com o menor impacto ambiental e máxima eficiência de produção.

Na indústria de transformação, existem vários desafios a serem superados. Hoje em dia, os fluidos de corte representam uma parcela significativa dos problemas relacionados à usinagem, devido ao seu alto custo e toxicidade. Nesta perspectiva, o processo de retificação é altamente complexo e caro devido as muitas variáveis envolvidas (entradas) e as perdas ambientais, sociais e econômicas associadas. Portanto, soluções alternativas devem ser buscadas (LOPES, *et al.*, 2023; WINTER, *et al.*, 2014).

O processo de retificação é responsável por garantir alta precisão dimensional e excelente acabamento das peças. Nesse processo, a remoção de material da superfície da peça é realizada por um rebolo composto por numerosos abrasivos grãos, poros e o ligante (LOPES, *et al.*, 2019a; MARINESCU, *et al.*, 2016).

Na retificação, a remoção de material da superfície da peça ocorre sob altas tensões e temperaturas na interface de corte. (MALKIN & GUO, 2008). Durante este processo, o calor gerado deve ser removido de forma mais eficiente para evitar danos a peça e ao rebolo. Caso contrário, alterações microestruturais, tensões residuais e danos térmicos a peça pode surgir, enquanto o rebolo pode sofrer a perda de suas características, como diminuição da dureza e desgaste excessivo (JAVARONI, *et al.*, 2019; LOPES, *et al.*, 2021; LOPES, *et al.*, 2019c; MARINESCU, *et al.*, 2016; NOURREDINE, 2010). Queimas superficiais durante processos de retificação de metais são danos induzidos termicamente que criam alterações microestruturais indesejadas, especialmente na retificação de metais, e devem ser evitadas. Isto é atribuído principalmente à substancial energia específica necessária para remoção de material,

com parcela significativa sendo convertida em calor (JAMSHIDI & BUDAK; 2021a). Porém, os fluidos de corte são responsáveis por resfriar, lubrificar e remover cavacos da interface da peça de ferramenta (DAVIM, 2013; MATHIYAZHAGAN, *et al.*, 2022). Assim, os fluidos de corte minimizam estes problemas, melhorando as condições de retificação, embora possam potencialmente causar impactos ambientais prejudiciais (LOPES, *et al.*, 2023b; RODRIGUEZ, *et al.*, 2020; SATO, *et al.*, 2022). Além disso, esses fluidos são altamente prejudiciais à saúde e ambiente devido à sua composição química. Nisso sentido, estão diretamente associados a problemas respiratórios e dermatológicos (dermatites, câncer de pele e de pulmão) causados pela inalação de névoas e vapores ou pelo contato direto dessas substâncias com a pele, assim, representando cerca de 80% de doenças ocupacionais (SHASHIDHARA & JAYARAM, 2010).

Neste cenário, os fluidos de corte podem causar diversos impactos ambientais (BAI, 2023). De acordo com a agência americana de proteção ambiental (EPA), mais de 10 ppm de óleo na água podem matar as plantas marinhas e 300 ppm de óleo podem matar os peixes de água doce. Além disso, os aditivos que melhoram o desempenho do fluido de corte, podem causar sérios problemas de poluição da água, como a eutrofização e a contaminação prolongada das nascentes, enfatizando o quão prejudicial pode ser o uso indiscriminado de fluidos de corte e (WU, *et al.*, 2021).

Atualmente, a técnica de lubrificação convencional (fluido emulsionável aplicado em abundância) é a mais usada na indústria. Esta técnica consiste na aplicação de uma emulsão, formada por água e óleo mineral, aplicada em abundância em região de corte, melhorando o desempenho do processo (LOPES, *et al.*, 2022). Desta forma, o atrito, as temperaturas e o entupimento do rebolo são significativamente reduzidos, aumentando a eficiência da produção. Por outro lado, a técnica de lubrificação convencional enfrenta desafios devido ao seu alto potencial de poluição ambiental e custo, exigindo a busca por alternativas (HAGEDORN, *et al.*, 2022; WOOD, *et al.*, 2022).

Devido a esses problemas, a técnica mínima quantidade de lubrificante (MQL) é uma alternativa que tem conseguido bons resultados na retificação. Esta técnica consiste em uma mistura formada por uma pequena quantidade de óleo e um jato de ar comprimido pulverizado a área de corte em alta pressão (LIU, *et al.*, 2023; LIU, *et al.*, 2023b; CUI, *et al.*, 2023). No MQL, a vazão de fluido de corte utilizada é em torno de 30–100 ml/h, enquanto no método convencional, esse valor pode chegar a 60 l/h (TAWAKOLI, *et al.*, 2010; WANG, *et al.*, 2016).

Segundo Moretti, *et al.* 2021, em seu trabalho foi avaliado o desempenho da técnica MQL em comparação com a lubrificação convencional no processo de retificação de aço para moldes VP50. Neste estudo, os autores concluíram que o MQL alcançou resultados

significativamente próximos a lubrificação convencional, principalmente com avanço de 0,25 mm/min. Além disso, no MQL, a mistura ar-óleo, penetra mais facilmente na barreira aerodinâmica formada no rebolo, pois a velocidade de aplicação do fluido coincide com a velocidade periférica da ferramenta (SILVA, *et al.*, 2020; ZHANG, *et al.*, 2015). Desta forma, MQL é uma técnica ecologicamente correta com desempenho comparável ao convencional sob certas condições (DAVIM, 2013; MARINESCU, *et al.*, 2016; TALON, *et al.*, 2022)

Domingues, *et al.* (2022) investigaram a retificação de cerâmica avançada sob várias condições de lubrificação, incluindo as técnicas convencional e MQL. No final, foi notou-se que o MQL apresentou pior desempenho em alguns parâmetros avaliados em comparação a lubrificação convencional, como por exemplo na análise de potência de retificação e desgaste diametral do rebolo. Além disso, o MQL apresentou baixo poder de refrigeração e limpeza da região de corte devido ao menor volume de fluido de corte utilizado, reduzindo a eficiência desta técnica (LOPES, *et al.*, 2020; LOPES, *et al.*, 2019d).

Ainda assim, Ribeiro, *et al.* (2020), mostraram que o MQL associado a técnicas alternativas de resfriamento e lubrificação podem aumentar significativamente a sua eficiência. Entre eles, o jato de limpeza de rebolos (JLR – Jato de limpeza do rebolo) apresentou excelente desempenho quando associado ao MQL, melhorando o poder de limpeza do MQL durante a usinagem já que a quantidade de fluido utilizada é mínima. Esta técnica envolve a aplicação de um jato de ar comprimido direcionado à superfície de corte do rebolo. Desta forma, o jato de ar remove os cavacos presos no rebolo e reduz o atrito peça-rebolo (GARCIA, *et al.*, 2020; SATO, *et al.*, 2020).

O ângulo de inclinação do bocal para aplicação do jato de limpeza do rebolo está diretamente relacionado aos resultados durante o processo de retificação. Lopes, *et al.* (2019d), analisando diferentes inclinações do bocal, concluíram que o ângulo de 30° promove uma limpeza mais eficiente do rebolo, melhorando os resultados de rugosidade e potência de corte. Nesse sentido, o MQL combinado com o sistema de jato de limpeza de rebolo, pode ser uma alternativa melhor que a técnica convencional, apresentando-se como uma solução promissora e mais ecológica para a indústria, sociedade e meio ambiente (DOMINGUES, *et al.*, 2022; LOPES, *et al.*, 2023).

Além disso, o avanço é fator determinante na qualificação do desempenho do processo de retificação. Esta variável corresponde à velocidade de penetração dos grãos do rebolo na superfície da peça, contribuindo para um processo mais ou menos severo. Está diretamente associado produtividade da usinagem, pois taxas de avanço mais altas aumentam a remoção de material da peça e reduzem o tempo de fabricação, e o inverso também ocorre o (DANIEL, *et*

al., 2020; TALON, *et al.*, 2021). Portanto, a técnica de lubrificação e a taxa de avanço são fundamentais para os mecanismos e fenômenos do processo de retificação. Nesta perspectiva, o processo de retificação de alguns materiais pode ser ainda mais complexo e oneroso. Por exemplo, cerâmicas avançadas, tornam ineficiente o uso de grãos abrasivos convencionais e requerem grãos abrasivos de diamante (JAVARONI, *et al.*, 2019). De acordo com Irani, *et al.* (2005), a retificação de peças de cerâmicas avançadas, pode representar cerca de 50% do custo total do processo. Em contrapartida, estes materiais apresentam alta estabilidade térmica e química, resistência ao desgaste e à corrosão e boa durabilidade, assim são amplamente utilizadas nas áreas aeroespacial, biomecânica e militar (TALON, *et al.*, 2022).

Além disso, o mecanismo de formação de cavacos, difere dos materiais metálicos, pois a cerâmica não permite deformação elástica ou plástica. Nesse sentido, aparecem trincas que mais tarde resultam em crateras na superfície do material. Podemos resumir o processo de formação do cavaco em trincas e lascamento (DOMINGUES, *et al.*, 2022; TALON, *et al.*, 2022; ZHONG, *et al.*, 2021). Consequentemente, a integridade e a qualidade da superfície retificada, pode ser comprometida devido às tensões superficiais e fraturas. Assim, é necessário pesquisar formas de garantir produtividade e qualidade na retificação cerâmica, aliadas a menores impactos ambientais (MARINESCU, *et al.*, 2015).

Embora a cerâmica avançada seja um material essencial para ser explorado, há também o fato de que o processo de retificação deste material gerar muito calor, necessitando de uma lubrificação eficiente. Assim, a aplicação de técnicas alternativas de lubrificação mais eficientes e sustentáveis corrobora para um melhor desempenho na retificação de cerâmicas e expande o campo de aplicação para outros materiais que requerem menos energia para a usinagem (LAKHDAR, *et al.*, 2021; LOPES, *et al.*, 2018; LOPES, *et al.*, 2019d).

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar alternativas, métodos e condições de retificação através de uma perspectiva de produção mais limpa. Para avaliar o desempenho do MQL e MQL com jato de limpeza do rebolo em quatro diferentes posicionamentos, foram comparados com a técnica convencional de lubrificação na retificação de cerâmica avançada com rebolo de diamante, combinado com velocidades de avanço de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min. Essas técnicas de lubrificação foram escolhidas porque a técnica convencional apresentou melhores resultados em estudos anteriores. Porém, sendo a técnica mais poluente, o MQL apresenta-se como uma alternativa ambientalmente mais viável. No entanto, é improvável que o MQL sozinho alcance resultados tão bons quanto a técnica convencional. Nesse contexto, a limpeza de rebolos surge como uma possibilidade para tentar melhorar os resultados obtidos pelo MQL. No final, espera-se integrar as dimensões econômica, social e ambiental, dadas as

exigências tecnológicas deste processo de retificação e contribuir para a avanços tecnológicos na indústria e na sociedade.

1.1 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Analisando algumas pesquisas realizadas nos últimos anos no laboratório de usinagem por abrasão da UNESP (FERNANDES, *et al.*; 2018; TALON, *et al.*, 2022; JAVARONI, *et al.*, 2019; DOMINGUES, *et al.*, 2022), e através de estudos bibliométricos realizados em bancos de dados internacionais como Scopus, Google Scholar, Science Direct e outros, comprovaram que o ainda há inúmeros estudos que podem ser realizados acerca do tema de retificação, especialmente nos materiais cerâmicos.

A aplicação das cerâmicas avançadas na indústria, cresce por suas diversas aplicações em função das suas propriedades específicas, como a resistência à corrosão, resistência ao calor, dureza etc. Entretanto, por estas mesmas propriedades favoráveis para a aplicação, nos processos de fabricação inúmeros desafios são encontrados para que seja mantida a integridade mecânica e geométrica da peça.

Considerando a sua elevada dureza, as cerâmicas avançadas normalmente são retificadas com rebolos de diamante, ferramentas de alto custo que encarecem substancialmente esse processo. Pelas propriedades térmicas dos rebolos de diamante a lubrificação eficiente é essencial para garantir a qualidade do processo, assim os melhores resultados são alcançados pelo uso do método de lubrificação convencional.

Os problemas apresentados como o uso e o elevado custo dos fluidos de corte levam as empresas e instituições de pesquisa buscar formas de reduzir estes inconvenientes, gerados tanto nos aspectos econômicos, mas essencialmente nas questões ambientais. (FRATILA & CAIZAR, 2011). A técnica, MQL é um excelente meio para minimizar esses problemas propiciando benefícios econômicos e ambientais, contudo nos processos de retificação, sua menor capacidade de refrigeração gera inconvenientes e ineficiência nos processos, assim esta técnica deve ser aprimorada tecnologicamente para se produzir peças com a mesma qualidade obtida com o uso dos fluidos de corte em abundância nos processos de retificação, devido ao fenômeno do empastamento do rebolo relatado por Sadeghi, *et al.* (2009).

Muitos avanços foram alcançados, especialmente com a aplicação de jato de ar comprimido para a limpeza da superfície de corte do Rebolo combinada ao MQL proposto no trabalho de Oliveira, *et al.* (2012).

Baseando nestes resultados o presente trabalho busca avaliar o desempenho da retificação cilíndrica externa de mergulho em cerâmicas avançadas, sob diferentes condições de lubrificação, trazendo como resultado adicional e contribuição para os avanços neste campo de estudo, análise dos custos para cada condição e as emissões de carbono.

1.2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo estudar os impactos, tecnológicos, econômicos e ambientais na retificação cilíndrica externa de mergulho da cerâmica avançada a base de Al_2O_3 , usando um rebolo de diamantado, comparando os parâmetros de saída, os custos, e a emissão de carbono, obtidos com a lubrificação convencional (fluido em abundância), apenas com o MQL e MQL com Jato de Limpeza do Rebolo sob diferentes velocidades de avanço.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Analisar os efeitos das condições de retificação e lubrificação e da taxa de remoção de material sobre as características da integridade da peça (rugosidade R_a , circularidade).
- ✓ Analisar os efeitos das condições de retificação e lubrificação e da taxa de remoção de material sobre o rebolo e processo e sob (desgaste diametral, relação G , potência de retificação)
- ✓ Analisar os impactos econômicos e ambientais e (custos e a emissão de carbono).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica elaborada aborda os principais conceitos relativos ao tema que foi desenvolvido: a retificação cilíndrica externa de mergulho, os parâmetros e variáveis de saída, o rebolo de diamante, retificação de cerâmicas, fluidos de corte, MQL limpeza da superfície de corte dos rebolos, entre outros assuntos pertinentes.

2.1 A RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO

Nos processos de retificação, diferentemente da usinagem com geometria de corte indefinida, torneamento e fresamento, por exemplo, são empregados os rebolos cuja aresta de corte é composta por inúmeros grãos abrasivos com geometria irregular (RASIM; *et al.*, 2015).

A remoção de material ocorre por fricção, deformação e cisalhamento, sendo este último estágio, responsável pela formação do cavaco, enquanto a fricção e a deformação consomem parcela considerável de energia sem remover material efetivamente, trazendo ao processo grande geração de calor na interface rebolo peça (SINHA, *et al.*, 2016).

A retificação é um dos últimos processo em uma peça, normalmente realizado após o tratamento térmico, destinado a dar acabamento e tolerâncias, tendo então muito valor agregado, pois um erro nesta etapa incorre em desperdiçar todos os custos já agregados a peça pelos processos antecedentes. Assim a retificação possui elevado valor agregado, podendo representar entre 20% e 25% do custo total da peça.

Dada esta natureza complexa da formação do cavaco e demais particularidades da retificação, é um processo muito sensível a alteração dos parâmetros de corte e principalmente as condições de lubrificação (ANDERSON, *et al.*, 2008).

Dentre as variações da operação de retificação, destaca-se a retificação cilíndrica externa de mergulho, pois é um processo rápido e econômico. Na retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo executa movimento de avanço numa direção perpendicular a superfície da peça a ser retificada. O rebolo normalmente é mais largo que o comprimento da peça, há possibilidade de se fazer a retificação de várias superfícies simultaneamente através da montagem de diversos rebolos ou a retificação de perfis, através da afiação do rebolo no perfil adequado (DINIZ, *et al.* 2014).

A retificação cilíndrica externa de mergulho é representada na figura 1.

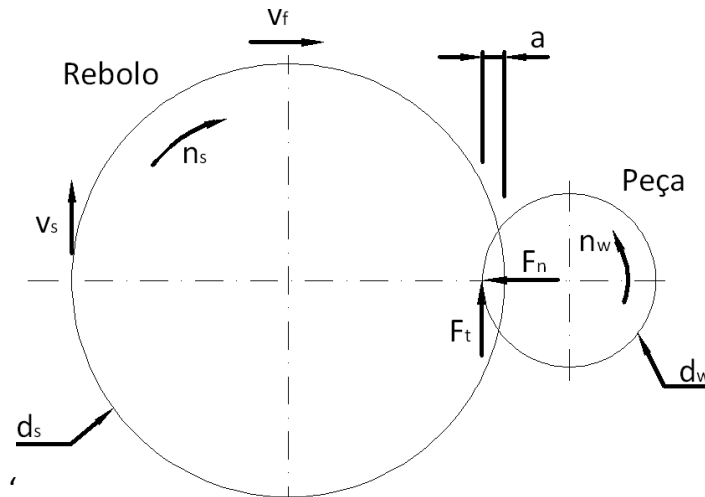


Figura 1: Retificação cilíndrica externa de mergulho, adaptado (MALKIN & GUO, 2008).

Onde: v_s - velocidade periférica; v_f - velocidade de avanço; d_s - diâmetro do rebolo; d_w - diâmetro da peça; n_s - rotação do rebolo; n_w - rotação da peça; a - profundidade de corte; F_t - força tangencial; F_n - força normal.

2.1.1 O ciclo de retificação cilíndrica externa de mergulho

Pode-se definir como ciclo de retificação o conjunto de etapas necessárias à realização da operação, compreendendo desde a aproximação do rebolo até sua saída da peça. Para cada uma destas etapas é associado um tempo, e a somatória de todos os tempos resulta no tempo total da retificação. (MALKIN & GUO, 2008)

Segundo Diniz, *et al.* (2014), quando o rebolo toca a peça e começa seu avanço radial, o conjunto peça/rebolo se deforma elasticamente, ocasionando um avanço efetivo diferente do real. Assim, a posição real do rebolo está atrasada em relação à teórica. Depois de algumas rotações, o avanço real se iguala ao avanço estabelecido, porém, a diferença entre a profundidade de corte real e a teórica continua.

Então, com o intuito de garantir a dimensão desejada da peça, é necessário que, ao fim da usinagem, o rebolo pare seu movimento de avanço radial por alguns instantes até que o eixo porta-rebolo e a peça se recuperem da deformação; este período recebe o nome de tempo de centelhamento ou tempo de spark-out.

Soares & Oliveira (2002) demonstram, na figura 2, o ciclo de retificação e as respectivas etapas.

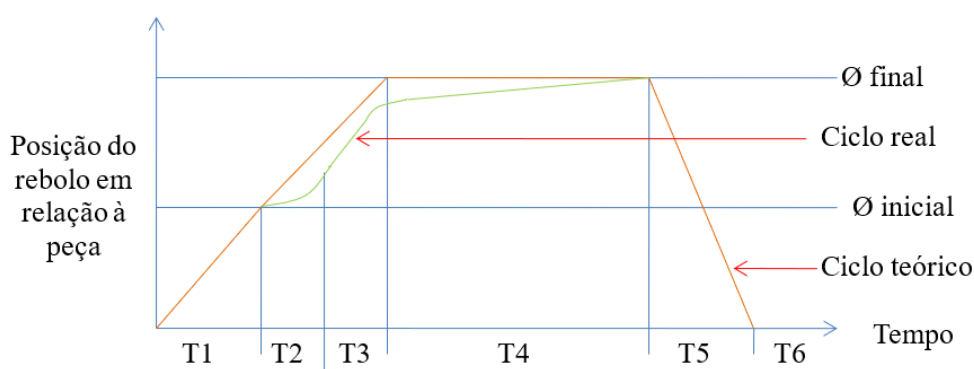


Figura 2: Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho, adaptado (SOARES & OLIVEIRA, 2002).

Abaixo é apresentada uma descrição dos intervalos de tempo indicados na figura 2:

- ✓ T1: deslocamento do rebolo em direção à peça, sem remoção de material;
- ✓ T2: início do contato entre o rebolo e a peça, proporcionando deformações elásticas em ambos e na retificadora. Deformações estas responsáveis pela diferença entre a posição real do rebolo e a posição indicada pelo comando da retificadora. Também nesta fase inicia-se o processo de formação do cavaco.
- ✓ T3: atinge-se a profundidade de corte estabelecida para um ciclo;
- ✓ T4: período de centelhamento (*spark-out*), onde não há avanço do rebolo, permitindo, desta forma, eliminar as deformações adquiridas durante o período T2. O tempo de centelhamento é de fundamental importância dentro de um ciclo de retificação, pois é neste momento que se atingem as tolerâncias dimensionais e geométricas com reduzidos valores de rugosidade superficial, característicos do processo de retificação;
- ✓ T5: afastamento do rebolo, permitindo a retirada da peça usinada e a colocação de outra peça a ser retificada;
- ✓ T6: realização de uma possível operação de dressagem, a qual é composta pelo movimento do rebolo até o dressador, pela dressagem propriamente dita e pelo retorno do rebolo até a posição de trabalho.

2.1.2 Parâmetros de corte do processo de retificação

Os parâmetros de corte na retificação são definidos com a finalidade de facilitar a compreensão de alguns fenômenos que ocorrem durante o processo, bem como fazer os ajustes

necessários para uma boa usinagem, a fim de se alcançar as dimensões e tolerâncias geométricas estipuladas no projeto da peça a ser retificada.

O ajuste dos parâmetros de corte ocorre na etapa antes do início do processo e estes podem ser reajustados para maior conveniência e atingimento das dimensões desejadas na peça.

A seguir são apresentados os principais parâmetros de corte a serem ajustados no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.

2.1.2.1 Velocidade de Corte (v_s)

Velocidade de corte, também conhecida como velocidade periférica, é representada pelo deslocamento de um ponto qualquer na superfície do rebolo, num determinado intervalo de tempo. Hwang, *et al.* (2000) relatam que um aumento na velocidade de corte diminui a severidade do processo de corte pelo aumento da dureza dinâmica do rebolo. Ademais Jackson, *et al.* (2001) afirmam que um aumento na velocidade do rebolo, melhora a qualidade final da peça, diminuindo o desgaste da ferramenta abrasiva.

Um ponto positivo da velocidade de corte é sua conexão direta com o acabamento superficial, contudo, quanto maior for a velocidade de corte, maior a geração de calor, além de maior o consumo de potência.

Em altas velocidades, para garantir que os grãos abrasivos continuem aderidos no rebolo costuma-se usar rebolos de ligante metálico ou eletro-depositado.

Graf (2004) define essa velocidade como a equação (1).

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (1)$$

Onde: v_s = velocidade de corte (m/s); n_s = rotação do rebolo (RPM); d_s = diâmetro do rebolo.

2.1.2.2 Velocidade da Peça (v_w)

Na retificação cilíndrica, a peça também permanece girando em torno do próprio eixo e por isso também possui velocidade periférica, essa velocidade representa a velocidade da peça. De acordo com Graf (2004), a velocidade da peça v_w pode ser determinada em função do diâmetro e rotação da mesma, conforme equação (2). Ainda segundo esse autor, pode-se afirmar

que o aumento da velocidade da peça acarreta uma elevação da taxa de remoção de material, gerando cavacos mais grossos e maior carga sobre cada grão abrasivo do rebolo.

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (2)$$

Onde: v_w = velocidade da peça (m/s); n_w = rotação da peça (RPM); d_w = diâmetro da peça.

2.1.2.3 Velocidade de mergulho ou velocidade de avanço (v_f)

A velocidade de mergulho v_f também definida como a velocidade de avanço do rebolo, corresponde a velocidade do movimento normal ou tangencial à superfície retificada; esta afeta o acabamento pretendido e a força tangencial de corte, que se eleva com o aumento da mesma (MARINESCU, *et al.* 2016).

Segundo Baldo (1994), no início do processo de retificação ou desbaste, remove-se cerca de 95% do material da peça, sendo que a velocidade de mergulho deve estar entre 0,4 e 2,0mm/min. Já para o acabamento, a velocidade de mergulho deve estar entre 0,1 e 0,3mm/min.

Ao iniciar o ciclo de retificação cilíndrica de mergulho deve-se atentar para o estágio de centelhamento, pois ocupa um tempo relevante se considerado todo tempo de processo (BARCZAK, *et al.*, 2010b).

2.1.2.4 Profundidade de corte (a)

Marinescu, *et al.* (2016) definem a profundidade de corte como a profundidade de material removido, no sentido radial para cada revolução da peça. Segundo Malkin (1989), a profundidade de corte é a profundidade que o rebolo entra na peça, estando a certa velocidade durante uma revolução completa da peça. Logo, a profundidade de corte pode ser expressa matematicamente pela seguinte equação (3).

$$a = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \quad (3)$$

Onde: a = profundidade de corte v_f = velocidade de avanço (mm/min) e v_w = velocidade da peça (mm/min).

Marinescu, *et al.* (2016) relatam que a peça, o rebolo e a estrutura da máquina deformam quando se estabelece o contato entre o rebolo e a peça. Dessa forma, o real valor do parâmetro “a” é menor do que o calculado baseado na velocidade de avanço v_f . Isso ocorre devido às deflexões mecânicas e térmicas e o desgaste do rebolo. Entretanto, depois de certo tempo de avanço, as deflexões se estabilizam e se tornam constantes.

Por conseguinte, os mesmos autores definem que a profundidade de corte real a_e é representada pela diferença entre a profundidade de corte programada, deflexões e o desgaste do rebolo mais a expansão térmica. Portanto, pode-se definir a profundidade de corte real pela seguinte equação:

$$a_e = a - \delta - a_{sw} + a_t \quad (4)$$

Onde: a = profundidade de corte programada; δ = deflexões do sistema; a_{sw} = profundidade desgastada do rebolo a cada volta; a_t é a expansão térmica do rebolo e da peça.

A profundidade de corte real também pode ser determinada medindo a peça antes e depois da retificação.

A profundidade de corte está amplamente relacionada com o parâmetro espessura equivalente de corte (h_{eq}) que será definido adiante, onde, aumentando “a” ocorre aumento dessa espessura e, com isso, maiores são os esforços de corte, o desgaste do rebolo e rugosidade (DINIZ, *et al.* 2014).

2.1.2.5 Comprimento de contato (l_c)

De acordo com Marinescu, *et al.* (2016); o comprimento de contato l_c é definido como a extensão de contato entre a peça e o rebolo. Pode ser calculado considerando apenas a geometria dos elementos em contato. O comprimento de contato pode ser expresso conforme a equação (5):

$$l_c = \sqrt{a \cdot d_e} \quad (5)$$

Onde: l_c = comprimento de contato (mm); a = profundidade de corte (mm) e d_e = diâmetro equivalente (mm).

Segundo Malkin & Guo (2008), a equação (5) não considera os movimentos e deformações envolvidas e por isso ela descreve uma área aparente de contato entre a peça e o rebolo e, com isso, esse parâmetro pode ser descrito como comprimento de contato estático.

King & Hahn (2012) afirmam que a diferença de curvatura entre a peça e o rebolo influencia no comprimento de contato. Além do mais, a diferença de curvatura entre a retificação cilíndrica externa e interna pode ser relacionada, segundo Malkin & Guo (2008), com a retificação plana através do diâmetro equivalente (d_e), conforme a equação (6):

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \frac{d_s}{d_w}} \quad (6)$$

Onde: d_s = diâmetro do rebolo (mm) e d_w = diâmetro da peça (mm).

Malkin & Guo (2008) ainda relata que para a equação (6) adota-se o sinal negativo quando se trata da retificação cilíndrica interna e o sinal positivo referindo-se à externa. Para a plana, o diâmetro da peça (d_w) deve ser considerado infinito e, então, $d_e = d_s$. Ainda, segundo esse autor, a curvatura oposta do rebolo e da peça diminui l_c na retificação cilíndrica externa e, na interna, aumenta. Considerando a equação acima, a retificação cilíndrica externa de mergulho apresenta o menor comprimento de contato comparado às outras variações de processo.

Anderson, *et al.* (2008) afirmam que a remoção de cavaco e a subsequente geração de calor ocorrem ao longo do comprimento de contato.

2.1.2.6 Taxa de remoção de material

De acordo com Klocke (2009), durante a retificação a taxa de remoção de material (Q_w) é um parâmetro determinado pela profundidade de corte (a), pela velocidade da peça e pela largura de retificação (b). Dessa forma, Demirci, *et al.* (2008) utilizam em seu trabalho a seguinte relação, segundo a equação (7), onde v_f é a velocidade de avanço e d_w é o diâmetro da peça:

$$Q_w = a \cdot v_w \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b \quad (7)$$

Onde: Q_w = taxa de remoção de material (mm³/min); e b = largura de retificação (mm).

Ainda segundo Malkin & Guo (2008) pode-se obter a taxa específica de remoção de material (Q_w'), dividindo a taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de retificação (b) e, com base nesta taxa específica, pode-se avaliar a produtividade de um processo de retificação:

$$Q'_w = a \cdot v_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (8)$$

Onde: Q'_w = taxa de remoção de material (mm³/mm.min).

2.1.2.7 Espessura equivalente de corte

Segundo Malkin & Guo (2008), a espessura da camada de material removida pelo rebolo com a velocidade periférica deste denomina-se espessura equivalente de corte h_{eq} , e é um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho. Este parâmetro é definido na retificação cilíndrica como a razão entre a taxa de remoção específica do material Q'_w e a velocidade de corte v_s , conforme a equação (9):

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{v_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{60 \cdot 1000 \cdot v_s} \quad (9)$$

Onde: h_{eq} = espessura equivalente de corte (mm).

Tal parâmetro é o que melhor caracteriza o processo de retificação, uma vez que está englobando três importantes características do processo (v_s , v_f , d_w) (SILVA NETO, 2012).

Marinescu, *et al.* (2016) afirmam que esse parâmetro não considera o espaçamento dos grãos do rebolo, ficando evidente que o comportamento da retificação está intimamente relacionado com a combinação da espessura equivalente de corte e a densidade das arestas de corte.

Além disso, segundo Malkin e Guo (2008), a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada a variáveis envolvidas no processo de retificação, como a rugosidade e desgaste do rebolo, Marinescu, *et al.* (2016) afirmam que a espessura equivalente é um fator importante já que determina a espessura dos cavacos na retificação.

Ainda de acordo com Malkin e Guo (2008), além da força de corte, a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada ao comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas tais como: rugosidade, topografia do rebolo, etc.

Segundo Marinescu, *et al.* (2016), esse parâmetro não leva em conta o espaçamento dos grãos do rebolo e para que também sejam consideradas as características do rebolo é possível calcular a espessura teórica máxima do cavaco h_{max} que é apresentada na equação (10):

$$h_{max} = 2L \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a}{d_s}} \quad (10)$$

Onde: $h_{\max}$ = espessura teórica máxima do cavaco (mm); L = espaçamento médio entre grãos abrasivos (mm).

2.2 MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO

Com base no trabalho de Nguyen & Butler (2005), dependendo das condições de retificação, somente um pequeno número de grãos abrasivos do rebolo entram em contato com a superfície da peça. Dentre os grãos ativos, somente uma pequena parte corta e produz cavaco, sendo que o restante dos grãos é apenas gera atrito e conseqüentemente calor. Na retificação de materiais, três fases distintas de interação do grão com peça são percebidas: região elástica, plástica e de corte. Quando a profundidade de corte é muito pequena o grão desliza na superfície, causando deformações elásticas sem remoção de material (fase elástica). A fase plástica ocorre quando a deformação se torna permanente na direção do escorregamento, com o material sendo escoado e “quebrado”. Os modos de remoção dependem das propriedades mecânicas do material, lubrificação, entre outros.

Na retificação, o corte não é a única situação que produz forças no grão. Em adição, há uma força de escorregamento do grão quando este e a peça se deformam elasticamente. Então, quando a tensão entre o grão e a peça aumenta, ocorre a deformação plástica e, assim, o escoamento do material. Se o material deformado na frente da aresta de corte entra em contato com esta, então há a formação do cavaco. Esses três estágios aumentam a força e energia no processo (ALFARES & ELSHARKAWY, 2009).

Um entendimento dos mecanismos de remoção de material e da natureza dos problemas associados são pré-requisitos que podem ajudar no desenvolvimento do processo de retificação (NGUYEN & BUTLER, 2005). Conforme a figura 3, Klocke (2009) descreve as três fases do mecanismo de remoção do material durante a retificação:

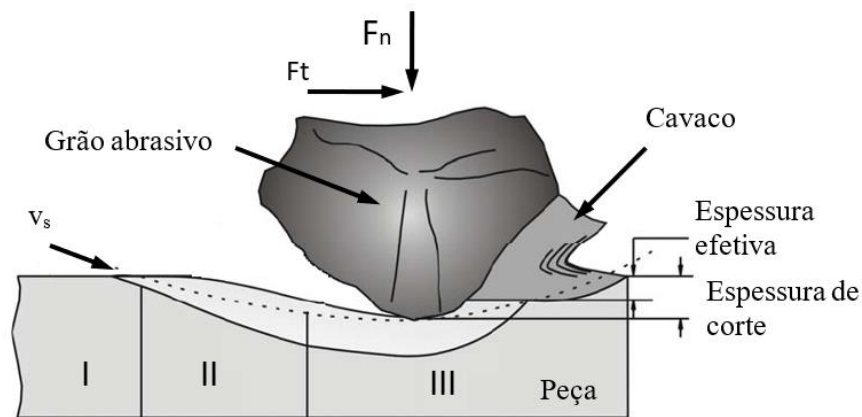


Figura 3: - Formação do cavaco por um grão abrasivo, adaptado. (KLOCKE, 2009).

- ✓ *Região I* – ocorre apenas deformação elástica e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- ✓ *Região II* – ocorrem deformações: elástica e plástica e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- ✓ *Região III* – ocorrem deformações: elástica e plástica, o atrito entre grão abrasivo e peça e o sulcamento associado à formação de cavacos, nesta região é atingida a espessura de corte, contudo devido às deformações elásticas a espessura efetiva é ligeiramente menor.

Na retificação de cerâmicas avançadas, existem algumas particularidades. Enquanto nos metais, o processo de formação do cavaco feita em 3 etapas (região de deformação elástica, elastoplástica e plástica), o processo de formação de cavacos em materiais cerâmicos é caracterizado predominantemente pelo mecanismo de fratura frágil, pela propagação de trincas ao longo dos planos cristalinos. A figura 4 representa a formação de trincas na indentação, em 6 etapas.

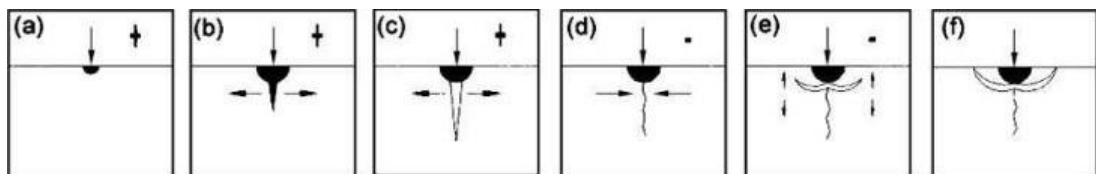


Figura 4: Processo de formação de trincas, (MALKIN & GUO, 2008).

Conforme Malkin & Guo (2008), o processo pode ser sementado como:

- ✓ Figura a: Inicialmente, uma zona plástica de pequeno diâmetro é gerada próxima à superfície;
- ✓ Figura b: Em seguida, uma pequena trinca longitudinal (trinca média) inicia-se devido ao campo de tensão desenvolvido;

- ✓ Figura c: A trinca se propaga à medida que a indentação prossegue e aumenta de tamanho;
- ✓ Figura d: O decréscimo da carga resulta na redução do tamanho ou no fechamento da trinca longitudinal devido às tensões de compressão;
- ✓ Figura e: A redução subsequente da carga promove a formação de trincas transversais devido às tensões laterais;
- ✓ Figura f: Após a liberação da carga, devido ao campo de tensão residual desenvolvido, o tamanho da trinca lateral aumenta, conduzindo à separação do material na forma de cavacos.

O mecanismo de remoção de material na retificação de cerâmicas depende da densidade de defeitos cristalinos e da pressão exercida pelo grão abrasivo. Quando a pressão exercida é muito alta, o material é pulverizado em partículas finas. Nesse caso, não há formação de cavaco contínuo, mas sim remoção por fragmentação. Caso contrário, o modo frágil é predominante através da propagação de trincas. Esta representação pode ser observada na figura 5, que representa a condição da peça usinada no processo de retificação de cerâmicas.

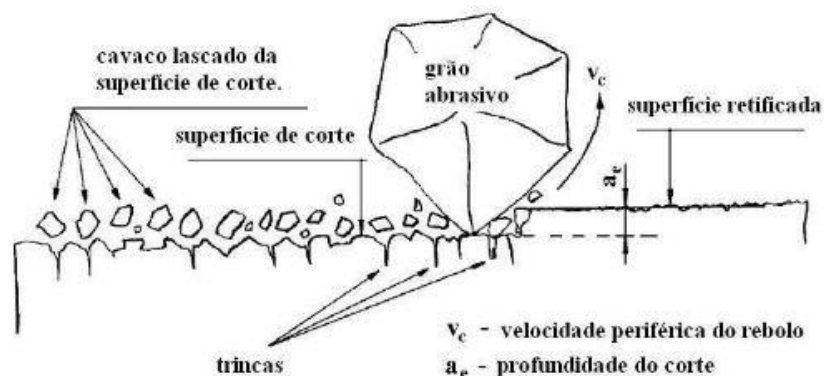


Figura 5: Processo de formação de cavacos em cerâmicas (MAMALIS *et al.*, 2002).

É crucial o controle de avanços na remoção de material cerâmico, pois os movimentos dos grãos abrasivos são capazes de produzir um efeito de lascamento que proporciona um aumento na remoção de material, conforme apresentado na figura 5 acima. Estes lascamentos são capazes de produzir trincas que comprometerão a integridade estrutural e a qualidade superficial da peça, sendo até necessária descartá-la. Segundo Irani, *et al.*, (2005) uma peça de material cerâmico pode ter até 50% de seu custo relacionado ao seu processo de usinagem.

2.3 O REBOLO DIAMANTE

Segundo Webster & Tricard (2004) o rebolo engloba quatro partes fundamentais: Grãos abrasivos (responsáveis pela usinagem); ligantes ou aglomerantes (permitem a união dos grãos abrasivos); porosidades (acomodam os cavacos gerados e transportam os fluidos) e design (perfil do rebolo, camada de abrasivo, material do corpo, etc.) conforme mostra a figura 6.

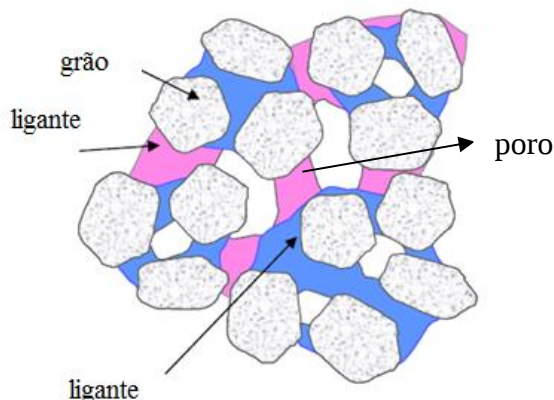


Figura 6: Principais constituintes do rebolo (WEBSTER & TRICARD, 2004).

Malkin & Guo (2008) cita em sua obra que o desempenho do rebolo está relacionado ao tipo e ao tamanho do grão abrasivo, as propriedades do material aglomerante e ainda a porosidade do conjunto. A porosidade é de vital importância no desempenho do rebolo por ser responsável pela acomodação e posterior expulsão do cavaco da zona de corte.

Os constituintes do rebolo estão interligados e devem atender à necessidade da peça a ser usinada, à quantidade de material a remover, à qualidade a ser obtida, precisão entre outros.

Segundo Badger (2009) o desgaste do rebolo ocorre pela falha desses seus componentes sob certas condições. Assim, esse desgaste está dividido em três regimes: atrito que é devido à força normal e tangencial e ao aumento de energia, fratura do grão e fratura do ligante que estão relacionados à auto afiação da ferramenta abrasiva.

2.3.1 Materiais abrasivos

As características dos abrasivos que determinam sua eficácia na remoção de material são dureza e estrutura do cristal, forma do grão, friabilidade ou durabilidade do grão e também a estabilidade química do abrasivo. As diferenças nas propriedades de um mesmo tipo de

abrasivo são decorrentes de variações químicas e/ou características estruturais intrínsecas ao processo de manufatura (MALKIN & GUO, 2008).

A seleção do tipo de grão abrasivo irá depender da economia do processo de usinagem, tipo do material usinado, qualidade requerida, tolerância, entre outros fatores (SALMON, 1992).

Os grãos abrasivos podem ser classificados em duas categorias de acordo com sua dureza, sendo elas convencionais e superabrasivos. Grãos convencionais têm dureza próxima à 2000kgf/mm^2 , enquanto os superabrasivos possuem dureza na faixa de 4500kgf/mm^2 , valores são obtidos por testes de dureza KNOOP (SHAW, 1996).

Malkin & Guo, 2008, afirmam que os abrasivos mais comuns são o óxido de alumínio (Al_2O_3), carbeto de silício (SiC), estes classificados como convencionais; e nitreto cúbico de boro (CBN) e diamante, sendo esses dois últimos superabrasivos.

Segundo Webster & Tricard (2004), o desempenho dos grãos abrasivos está em função das propriedades dos mesmos e das condições de retificação (força, espessura de cavaco, entre outras). A força por grão e a espessura de cavaco são cruciais. Esses autores ainda citam, em seu trabalho, que os métodos para caracterizar os grãos abrasivos dizem respeito à friabilidade (capacidade do grão abrasivo em gerar arestas de corte durante o processo de retificação), dureza e tenacidade.

2.3.2 Propriedades dos abrasivos

Os abrasivos de modo geral possuem duas propriedades fundamentais que refletem diretamente no desempenho do rebolo durante o processo de usinagem: tenacidade e friabilidade. A tenacidade é um parâmetro relacionado diretamente à quantidade de trabalho (energia) necessária para fraturar o grão abrasivo.

Segundo Marinescu *et al.* (2016), a friabilidade é definida como sendo a tendência do grão em se fraturar em fragmentos menores sob pressão. A friabilidade é uma função da forma, integridade e pureza do cristal, o que faz essa propriedade ser uma consequência do crescimento das características dos cristais durante a síntese.

Um grão duro com pouca friabilidade se tornará cego rapidamente. Ao dresser esse rebolo com um dressador de ponta única, o grão será arrancado da superfície de corte do rebolo, ao invés de se fraturar e criar novas arestas de corte. Entretanto, um grão friável com alguma tenacidade é agressivo naturalmente e irá se fraturar e criar novas arestas, revelando uma nova

superfície de grão com arestas de corte afiadas. Isso resulta em uma usinagem com menor geração de calor (SALMON, 1992).

Salmon (1992) ainda afirma que o grão deve ser suficientemente duro e afiado para penetrar no material. Entretanto, ele deve resistir às solicitações térmicas e mecânicas e, ao mesmo tempo, ser friável o suficiente para se fraturar e gerar novas arestas de corte afiadas, como já dito. Além disso, quanto maior for o cristal, maior a friabilidade (MARINESCU, *et al.*, 2016).

Com relação à resistência ao desgaste, a propriedade associada é a dureza que, segundo Marinescu, *et al.* (2016), é definida como a resistência à penetração de outro material. As escalas de dureza mais utilizadas são Rockwell e Knoop. A figura 7 descreve as características de alguns materiais abrasivos (resistência relativa à abrasão, dureza, condutividade térmica e resistência à compressão) comparados entre si e com o aço.

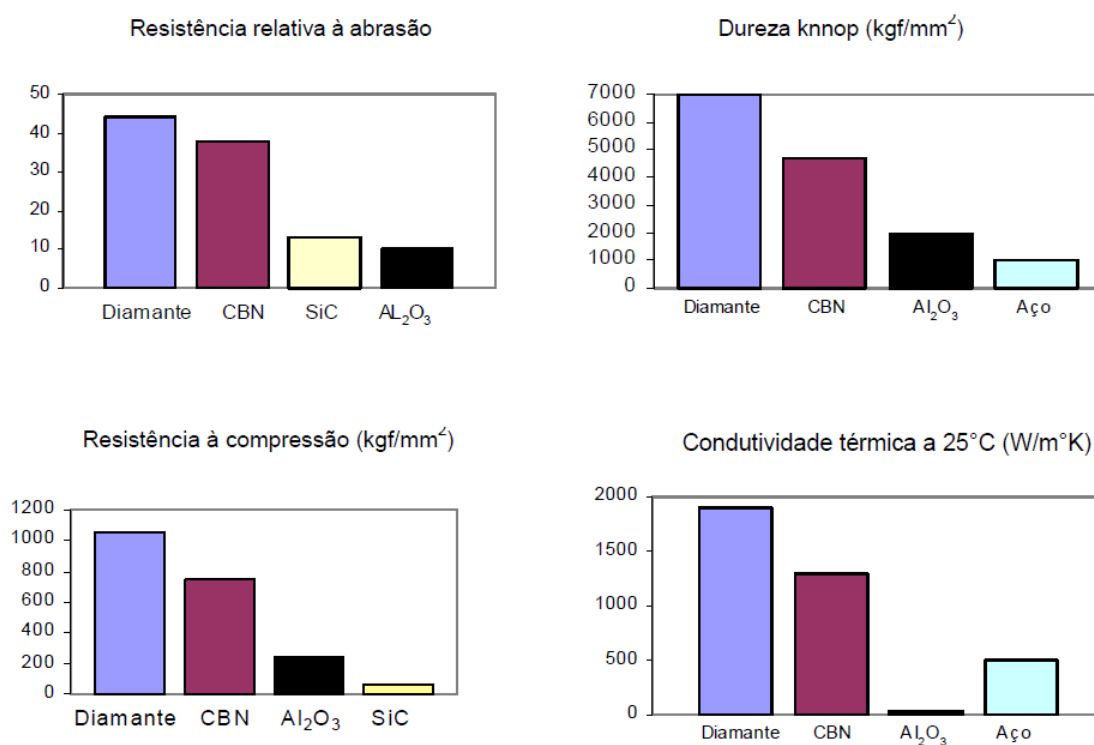


Figura 7: Características dos abrasivos (MALKIN & GUO, 2008).

2.3.3 Grãos abrasivos convencionais

No grupo dos abrasivos convencionais, destacam-se os grãos de óxido de alumínio (Al_2O_3) fundido ou sol-gel e os de carboneto de silício - SiC. O primeiro caracteriza-se por apresentar a menor dureza dentre todos os abrasivos, todavia tem a vantagem de ser relativamente resistente ao impacto. É empregado na retificação de metais ferrosos. Os

abrasivos de SiC são recomendados para retificação de aços com elevado teor de carbono em sua composição, porém quando empregados na retificação de aços de baixo teor de carbono, reagem quimicamente com o elemento ferro, ocasionando um desgaste acentuado dos grãos (MARINESCU, *et al.*, 2016).

2.3.4 Grãos superabrasivos

Os grãos superabrasivos são representados principalmente pelo diamante e pelo Nitreto Cúbico de Boro (CBN). São denominados desta forma pelo fato de apresentarem dureza bem mais elevada que abrasivos convencionais, propiciando sua aplicação em velocidades de corte mais elevadas. Rebolos compostos por estes tipos de grão são empregados na retificação de materiais de difícil usinabilidade, tais como aços rápidos, aços alta liga e aços ligados ao Ni, Cr, Ti e outros (MARINESCU, *et al.*, 2016).

Rebolos superabrasivos além de elevada dureza devem possuir características de amortecimento, alta rigidez e boa condutibilidade térmica. Estas ferramentas, normalmente consistem em um corpo de alta resistência mecânica e em uma camada abrasiva relativamente fina, ligada ao corpo por um adesivo de alta resistência. (JACKSON, *et al.* 2001).

Um fator limitante para o emprego de rebolos superabrasivos é o seu elevado custo. No entanto quando se faz uma análise global dos custos, observa-se que utilizando-se rebolos de CBN tem-se uma redução do tempo de retificação, além de um menor número de trocas de ferramentas e paradas para ajuste visando compensar o desgaste do rebolo. Todos estes fatores são responsáveis por uma redução de 40% dos custos totais do processo de retificação (MARINESCU, *et al.*, 2016).

Aurich, *et al.* (2008) afirmam que vem crescendo constantemente o emprego dos superabrasivos, CBN e diamante, no que se diz respeito ao aumento da performance de usinagem e maior qualidade da peça acabada.

Os rebolos de CBN e diamante são complementar um ao outro. O diamante é aplicado na retificação de materiais duros e frágeis como os não ferrosos, vidros, cerâmicas, joias e o CBN em todos os metais, como aço endurecido, ligas de alta resistência, entre outros.

Aurich, *et al.* (2008) relatam que o CBN tem sido amplamente empregado na indústria por muitas décadas. Mas muito deve ser estudado para a eficiência ainda maior. Eles são mais resistentes que os Al_2O_3 , SiC e, por isso, se desgastam menos e possuem longa vida antes da dressagem. Sua grande condutividade térmica permite uma usinagem com menor geração de

calor, comparada aos abrasivos convencionais. São mais caros, mas proporcionam maior taxa de remoção.

2.3.5 Diamante

Segundo Marinescu, *et al.* (2016), o diamante é o único abrasivo que pode ser obtido naturalmente e apresenta a forma alotrópica do carbono com uma estrutura octaédrica, no caso dos diamantes naturais. Tal estrutura é propícia para aplicações em ferramentas de ponta única. O diamante também possui elevada dureza, baixa friabilidade, elevada condutividade térmica e baixa condutividade elétrica, como propriedades principais.

Entretanto, ainda segundo esses autores, o diamante, uma forma metaestável do grafite em pressões normais, tende a transformar-se em grafite a temperaturas relativamente baixas: 700°C no ar e 1500°C em meio a uma atmosfera inerte. Com base nisso, Sreyith & Ngoi (2000) relatam que, apesar do diamante e CBN terem estruturas cristalinas semelhantes, o diamante sofre grafitação na usinagem de aço.

Salmon (1992) descreve o processo industrial para a manufatura do diamante sintético. Segundo o autor, utilizam-se pressões na casa de 55000 a 130000 bar e temperaturas de 1400°C a 2500° C. A interface catalítica de metal é um ponto muito importante nesse processo. Primeiramente, foi usado o ferro e depois cromo-cobalto, magnésio, níquel, platina, entre outros. Diferentes temperaturas, solventes e pressões produzem os tipos de diamantes sintéticos. Em certos casos, o revestimento metálico do diamante com cobre ou níquel proporciona melhor ligação mecânica e também caminho para o fluxo de calor gerado durante a retificação, particularmente em usinagem a seco. Dessa forma, o diamante é usado na usinagem de carbetos de tungstênio, pedras naturais, granito, concreto, cerâmicas e cermet.

O diamante sintético domina na fabricação de rebolos, mas o diamante natural ainda é o preferido para as ferramentas de dressagem e perfilamento. (MARINESCU, *et al.* 2016).

2.4 CERÂMICAS AVANÇADAS

Segundo Taylor (2001), as cerâmicas são classificadas em dois grandes grupos: as cerâmicas tradicionais e as cerâmicas avançadas. Cerâmicas tradicionais são aquelas com base, quase que em sua totalidade, composta de minerais filossilicáticos hidratados, popularmente chamadas de argila. Cerâmicas dessa classe são empregadas na produção de artefatos como potes, vasos, louças, tijolos, telhas e outros objetos comumente fabricados com acabamento de

baixa qualidade dimensional, se comparados com as cerâmicas avançadas. Já as cerâmicas avançadas são compósitos sintéticos, com alto grau de pureza, que podem ter diversas bases diferentes. As bases mais comuns são óxidos, carbetos, nitretos e oxi-nitretos.

O estudo das estruturas químicas e cristalinas das cerâmicas avançadas, aliado aos novos processos de caracterização de materiais, permitiu a aplicação das cerâmicas avançadas em indústrias de alto potencial tecnológico, como a indústria aeroespacial, de comunicações, eletrônica, médica, entre outras. Tal potencialidade é justificada pelas características diferenciadas dos materiais cerâmicos, como elevada resistência mecânica, alta dureza, elevado ponto de fusão e baixa condutividade elétrica, além da inércia química (HUBERTUS, 2007).

Segundo Fujita, *et al.* (2006), os materiais cerâmicos normalmente não apresentam deformação plástica apreciável e sua resistência ao impacto é reduzida, ou seja, apresentam baixa tenacidade. A baixa deformabilidade do seu retículo cristalino resulta em elevada rigidez e dureza. Em comparação com os metais, a energia de ativação é tão elevada que o limite de resistência à fratura é atingido antes do movimento de discordâncias.

É importante mencionar que, diferentemente dos metais, as propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos se preservam mesmo em temperaturas elevadas. De acordo com Marinescu, *et al.* (2016), isso se explica pelo fato da estrutura cristalina da cerâmica ser menos simétrica que a estrutura dos metais, e assim sendo, mesmo com o aumento de temperatura até valores próximos ao ponto de fusão, não há ativação de mais do que dois ou três sistemas de deslizamento de discordâncias.

A Tabela 1, elaborada por Mamalis, *et al.* (2002), apresenta características físicas e mecânicas de algumas das cerâmicas avançadas mais populares na atualidade. Para comparação, foram inseridas as características do aço carbono SAE 1045.

Tabela 1: Características físicas e mecânicas de algumas cerâmicas avançadas
(adaptado de Mamalis, *et al.*, 2002)

Cerâmica	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Flexão (Mpa)	Condutividade Térmica (W/(m.K))
Al₂O₃	3,8 - 4,2	344	304	25
ZrO₂	5,9	206	980	28
SiC	3,1 - 3,2	392	490	59
B₄C	2,5	300	700	29
Si₃N₄	3,2	294	588	30
SAE 1045	7,87	200	565 - 630	50

As cerâmicas avançadas, por suas propriedades tem seu uso cada vez mais ampliado em diversas aplicações no meio industrial. Alguns exemplos de utilização são em motores e turbinas, que contém peças que possam suportar elevadas temperaturas (cerca de 2000° C), com alta segurança e resistência ao desgaste (MAMALIS, *et al.*, 2002). Atualmente, o escopo de utilização destes materiais engloba os meios automobilísticos e aeroespaciais.

Ainda segundo os autores, a retificação é a mais favorável operação de acabamento dos materiais cerâmicos. Por seus atributos, é claro que o processo de remoção no material em cerâmicas difere consideravelmente da teoria clássica. No último caso, há o chamado “processo de remoção dúctil”, onde a remoção do cavaco é feita por uma mudança elastoplástica que consiste na deformação do material. Já no chamado “processo de remoção frágil” da retificação em cerâmicas, o material é retirado a partir de trincas produzidas como identações, separação e remoção do material.

2.5 OS PROBLEMAS DOS FLUIDOS DE CORTE

Os fluidos de corte são aplicados na usinagem dos materiais com o propósito de reduzir, através da lubrificação, as características dos processos tribológicos que estão sempre presentes na superfície de contato entre a peça e a ferramenta e também reduzir o calor na região de corte através da refrigeração (PAWLAK, *et al.* 2004).

Stanford, *et al.* (2007) e Tawakoli, *et al.* (2007) afirmam que os fluidos de corte também dificultam a corrosão da peça e da máquina ferramenta, transportam os cavacos gerados e promovem a limpeza do rebolo.

Devido à natureza do processo de retificação grandes quantidades de fluido de corte são aplicadas com o objetivo de reduzir as altas temperaturas oriundas do processo. Quando se aplica fluido de corte no processo de retificação, o tipo de refrigerante, sua composição, a posição do bocal e seu design e vazão são parâmetros que influenciam na produtividade, qualidade da peça e desgaste do rebolo (BRINKSMEIER, *et al.* 1999).

Segundo Irani *et al.* (2005), uma vez usado, o fluido de corte contém pequenas partículas de materiais, como pedaços do rebolo, cavacos e outras impurezas. Em função disso, depois de certo tempo, por causa da contaminação, todo fluido deve ser trocado e descartado. Entretanto, esse descarte feito de forma indevida é prejudicial ao meio ambiente.

O principal problema decorrente do processo da usinagem, em particular da retificação, está relacionado com o uso de fluidos de corte. Isso se deve aos grandes danos que essas substâncias provocam à saúde das pessoas e ao meio-ambiente (BARTZ, 1998).

A causa maior desses problemas é a composição química dos fluidos de corte. Dessa forma, alguns componentes de sua composição são anticorrosivos, antiespumantes e biocidas. Os biocidas são uns dos aditivos mais perigosos aos operadores das máquinas (HONG & BROOMER, 2000).

Dessa forma, os principais problemas à saúde humana, decorrentes dos fluidos de corte são relatados no trabalho de Howell, *et al.* (2006). Assim pode haver danos na pele, aparelho respiratório e até mesmo digestivo, devido aos metais pesados. O contato pela pele pode ocasionar alergias e dermatites dependendo do tipo de pele da pessoa e o tempo de exposição. Já os danos respiratórios e digestivos ocorrem, respectivamente, pela inspiração da névoa de fluido e por engolir pequenas partículas. Entretanto, Howes, *et al.* (1996) averiguou que os principais problemas registrados são respiratórios e dermatológicos.

Além dos problemas ecológicos, existe a preocupação com o fator econômico, pois, conforme Byrne (1993), a utilização dos fluidos de corte representa uma porção significativa dos gastos no processo de manufatura de uma peça, ou seja, em torno de 15 - 17%. Isso ocorre, porque é necessária, além da compra, a preocupação com a manutenção do fluido para que ele não perca suas propriedades. Com isso, é conveniente monitorar sua temperatura, tratar a água que é adicionada, gastar energia com sistemas que o faça circular na máquina evitando ficar parado, controlar o pH entre outros.

Ainda segundo Ebrell *et al.* (2000), apesar de os fluidos de corte trazerem muitos benefícios ao processo produtivo, às vezes são utilizados, tecnologicamente, de forma errônea com um índice muito alto de desperdício. Para que a lubrificação e refrigeração sejam eficientes, é importante que o fluido entre efetivamente na região de corte entre a peça e a ferramenta, reduzindo assim os gastos excessivos e os problemas que implicam em ofender o bem-estar humano e ambiental.

Assim, Dhar, *et al.* (2006) afirmam que, apesar das vantagens tecnológicas que os fluidos de corte promovem, ultimamente vêm sendo questionados os efeitos negativos que eles causam, ou seja, além das agressões ambientais, também problemas relacionados à saúde do trabalhador. Dessa forma, Sokovic & Mijanovic (2001) relataram que as empresas estão sendo forçadas a programar estratégias de refrigeração menos nocivas no processo de usinagem.

Tawakoli, *et al.* (2007) mostram que uma das estratégias para promover diminuição do uso de fluidos de corte é otimizar o fluxo de fluido, situação que ocorre com o uso da mínima quantidade de lubrificante.

2.5.1 Custos dos fluidos de corte

Os custos totais da usinagem dependem do custo da máquina (desgaste, funcionários, fluidos de corte e manutenção), do local e da energia (WINTER; HERRMANN, 2014).

Assim como afirma Walker (2013), o custo com fluido de corte utilizando o método convencional é alto se comparado a outras despesas. Deve-se levar em conta, que o valor gasto com esses refrigerantes se dá na aquisição, na manutenção e também no descarte dos mesmos. Estima-se que essas despesas variem entre 8% e 16% dos custos totais de produção, chegando a ser maior do que os gastos relacionados a ferramentas de corte (DHAR, *et al.* 2006). Logo, torna-se justificável a redução do uso de fluidos de corte (WALKER, 2013).

Segundo Alberdi, *et al.* (2011), não só os fatores mencionados anteriormente, mas também a reciclagem, medidas de segurança e outros aspectos acarretam custos na utilização de fluido de corte. A indústria automobilística gasta de 15 a 30% dos custos de fabricação em fluidos refrigerantes (RABIEI, *et al.*, 2015).

2.5.2 Manutenção e descarte

Ao se utilizar fluidos de corte em operações de usinagem é evidente que os mesmos comecem a acumular pequenas quantidades de materiais (como pedaços de rebolo e cavacos). Em função disso, inicia-se a proliferação de microrganismos devido à elevada quantidade de compostos orgânicos em sua composição. Assim, há mudança na composição química, a qual altera as propriedades base do fluido, ocasionando um aumento do desgaste da ferramenta e a produção de peças defeituosas (OLIVEIRA, *et al.*, 2012).

O monitoramento e a manutenção da qualidade do fluido são dois elementos de extrema importância para o êxito do processo de redução do consumo de fluidos de corte na fonte. Os aspectos mais relevantes que envolvem o monitoramento são: inspeções do sistema, medidas e ajustes periódicos dos parâmetros (como a concentração, o pH e o crescimento microbológico), a correção apropriada de biocidas, a remoção de óleo contaminante e dos cavacos.

No que diz respeito a sua estocagem, o controle de qualidade dos fluidos de corte se inicia com boas condições de estocagem, tendo como parâmetro a ser observado, a temperatura. Deve-se evitar temperaturas extremas. Ademais, os fluidos de corte solúveis em água requerem mais cuidados na estocagem se comparados aos óleos integrais em razão da complexidade da

composição química dos fluidos emulsificáveis, os quais são mais suscetíveis às mudanças físicas resultantes das temperaturas extremas de estocagem.

Existem normas para o manuseio correto de fluidos de corte. A portaria MT 204/97 regulariza o transporte de fluidos contaminados enquanto a Resolução ANTT N° 420, de 12 de fevereiro de 2004 apresenta instruções complementares ao Regulamento de transporte terrestre de produtos perigosos.

O descarte de fluidos de corte tem ganhado uma importância crescente no meio industrial. Isso se deve a fortes pressões exercidas pelas leis ecológicas, as quais exigem procedimentos específicos para o descarte de diferentes tipos de fluido. Sokovic & Mijanovic (2001) apresentam alguns desses procedimentos, os quais serão mencionados a seguir.

Em relação aos óleos integrais, os mesmos podem ser vendidos para uma nova refinação ou reciclados pelo fabricante do fluido, assim como por empresas especializadas. Ainda assim, esse tipo de óleo refrigerante pode ser incinerado em caldeiras, desde que respeitando a legislação ambiental, ou seja, isento de impurezas, no estado seco, apresentando baixa concentração de enxofre e cloro.

Nos fluidos de corte solúveis em água deve ser realizada a separação do óleo e de outros produtos químicos dissolvidos na água. Mesmo após essa separação, esses fluidos não podem ser descartados diretamente no sistema de esgoto.

Já os processos de descarte de emulsões podem ser divididos em: químicos, físicos e físico-químicos. A seleção do procedimento dependerá do estado da emulsão, de sua composição e do custo associado ao processo. Todos esses procedimentos possuem em comum os seguintes estágios: quebra da emulsão, separação do óleo e tratamento da água. A fase aquosa resultante deve estar de acordo com a legislação para seu descarte posterior.

Dentre os processos físicos mais utilizados encontram-se a ultra filtração e a quebra térmica. No primeiro, a emulsão circula através de permeadores, os quais possuem membranas tubulares cujos poros impedem a passagem de moléculas de óleo, efetuando, portanto, a quebra da emulsão. Já no segundo processo, a separação da fase oleosa da aquosa ocorre por meio do aquecimento da emulsão e, dessa forma, pela evaporação da mesma.

Portanto, a reciclagem pode ser uma boa alternativa para um fluido refrigerante, pois os resíduos poluentes são separados e retirados do mesmo, e então, esse fluido pode voltar a ser utilizado juntamente com um refrigerante limpo. Isso reduz a frequência de descarte, impactando diretamente nos custos do processo.

Por fim, compreende-se que processos necessários ao se utilizar de óleos de corte tornam seu uso extremamente oneroso. Isso se deve principalmente aos produtos que não são

biodegradáveis, gerando, portanto, custos com tratamentos e descarte (SHOKRANI, *et al.*, 2012). Além disso, o descarte incorreto de fluidos de corte a base de óleo é problemático, pode causar contaminação da água superficial e subterrânea, poluição no ar e no solo (HADAD 2015).

Levando em conta que o descarte do fluido de corte é um fator que eleva muito o custo do processo, utilizar técnicas alternativas de lubrificação se faz extremamente interessante.

2.6 FORMAS ALTERNATIVAS DE LUBRIFICAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Uma crescente atenção tem sido voltada para a cuidadosa seleção do fluido com o intuito de preservar o meio ambiente. Dessa forma, além dos requisitos tribológicos, os fluidos de corte devem satisfazer os critérios de proteção ambiental regidos pela norma internacional ISO 14000. Em função disso, os custos crescentes com o descarte desses fluidos, forçam as empresas a programarem novas estratégias de refrigeração no processo de usinagem (SOKOVIC & MIJANOVIC, 2001).

Tecnologias para reduzir o consumo de fluido de corte estão disponíveis nos processos convencionais, como por exemplo: torneamento, fresamento e furação, envolvendo a mínima quantidade de lubrificante ou até mesmo a usinagem à seco devido aos novos materiais das ferramentas e as condições de usinagem. Comparando-se aos processos de retificação, normalmente os processos convencionais apresentam uma região menor de contato entre a peça e a ferramenta (DINIZ, *et al.* 2014).

Na retificação, entretanto, com o maior atrito e maior região de contato, altas temperaturas são alcançadas e grandes quantidades de calor devem ser retiradas, caso contrário danos térmicos ocorrem na peça, os quais aceleram o desgaste do rebolo e deformações são induzidas na peça pela alta elevação da temperatura, resultando em pobre qualidade final das peças retificadas. Dessa forma grandes quantidades de fluido são usadas para remover grande parte do calor gerado (SHILLOR, *et al.* 2004)

Assim as técnicas de retificação que busquem a eliminação ou ao menos a minimização do uso dos fluidos de retificação, devem manter a eficiência do processo (SANCHEZ, *et al.* 2010).

Dineshi, *et al.* (2010), definem uma pirâmide das tecnologias em lubrificantes nos processos de usinagem. Em seu artigo a tecnologia atual disponível em grande escala são os

fluidos de corte convencionais, usados em abundância. Já o MQL e a usinagem à seco são as condições mais favoráveis e desejáveis para reduzir custos e impactos ambientais.

Tawakoli, *et al.* (2007) afirmam que as estratégias para diminuição do uso de fluidos de corte e a busca por formas mais eficientes de lubrificação são: usar bocais especiais, otimizar o fluxo de fluido, usar a mínima quantidade de lubrificante, aumentar a vida do fluido, usar grafite, resfriamento criogênico, bio-fluidos e usinagem à seco.

2.7 A TÉCNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL)

A mínima quantidade de lubrificante (MQL) é definida como uma pequena quantidade de óleo misturada com ar comprimido e direcionada à região de corte, evitando as inundações de óleo observadas na refrigeração convencional (OBIKAWA, *et al.* 2006).

No MQL, o aerosol corresponde a inúmeras gotículas de óleo dispersas em um jato de ar que as carrega diretamente à zona de corte, proporcionando eficiente lubrificação. Os fluidos de corte convencionais, devido ao uso de aditivos, não conseguem entrar diretamente na zona de corte, sendo o MQL mais eficiente, nesse aspecto.

Uma das vantagens do MQL é o fato de que ao fim da retificação, o cavaco, peça e ferramenta apresentam menor resíduo de fluido, sendo mais fácil e econômica a limpeza dos mesmos. Além do mais, durante a usinagem, como a peça não é totalmente coberta com fluido, é fácil de ser observada. Na mínima quantidade de lubrificante é usado baixo volume de fluido, ou seja, ao invés da ordem de litros são usados milésimos de litro, aproximadamente de 10 – 100 ml/h e pressão de 4 - 6,5 bar (ATTANASIO, *et al.* 2006).

Apesar de o MQL promover lubrificação eficiente, redução da energia de retificação e da energia específica comparado com processos utilizando fluidos de corte (óleos solúveis) em abundância em situações não muito severas de usinagem, os valores de rugosidade alcançados não são relativamente bons (HAFENBRAEDEL & MALKIN, 2001).

Brinksmeier, *et al.* (1999) afirma que um grande desafio da técnica da mínima quantidade de lubrificação está na refrigeração, sendo problemática sua aplicação em situações em que se necessita alta refrigeração.

Choi *et al.* (2008), estudaram o efeito da aplicação de ar comprimido refrigerado para atuar como refrigerante no processo de retificação cilíndrica de aços endurecidos. Observou-se que a eficiência do ar em reduzir os danos térmicos foi igual à dos fluidos convencionais quando a profundidade de corte era pequena. Entretanto, a tensão superficial apareceu e a rugosidade subiu com o aumento da profundidade de corte. Eles concluíram que isso ocorria devido à

quantidade reduzida de lubrificante. Dessa forma, aumentou-se o desgaste do rebolo, conforme aumentaram os passes, mas a força e energia foram menores em relação aos fluidos de corte.

Silva, *et al.* (2007) estudaram os parâmetros de retificação do aço ABNT 4340 usando a técnica do MQL. Concluiu-se que a rugosidade, desgaste diametral do rebolo, as forças e tensão residual foram melhoradas usando o MQL devido ao maior escorregamento do grão na zona de contato.

Já com relação ao fluido usado no sistema de MQL, Suda, *et al.* (2002) afirmam que o óleo sintético de éster tem grande propriedade como, biodegradável, antidesgaste da ferramenta, anticorrosão e estabilidade ao ser armazenado. Brinksmeier, *et al.* (1999) afirmam que o tipo de fluido usado na retificação com MQL influencia no processo.

Além disso, existem restrições a certos fluidos no processo do MQL. Os fluidos de corte a base de água com cloro orgânico, aditivos de zinco e óleos minerais não podem ser usados junto ao MQL (STÄBLER, *et al.* 2003). Segundo Skerlos & Hayes (2003), óleos de base vegetal estão sendo vistos como uma ótima alternativa também no processo de usinagem perante os tradicionais fluidos de corte.

Heisel, *et al.* (1998) e Klocke, *et al.* (2000) listaram as vantagens do MQL comparado aos fluidos de corte convencionais no processo de retificação:

- ✓ Reduzida quantidade de fluido é utilizada, onde não há a necessidade de equipamentos adicionais para a circulação dos fluidos;
- ✓ Não é necessário sistema de filtragem e reciclagem;
- ✓ Menor manutenção do fluido;
- ✓ As peças saem mais limpas no final da operação;
- ✓ Reduz o volume de fluido impregnado no cavaco;
- ✓ Reduz o uso de biocidas e fungicidas.

Segundo Machado & Diniz (2000), comparada com a técnica tradicional dos fluidos de corte, o MQL apresenta custos adicionais para pressurizar o ar. Devem-se ter, também, sistemas adicionais para o transporte dos cavacos. Adicionalmente a produtividade deve decrescer devido aos danos térmicos aos componentes das máquinas. Deve-se ter um bom sistema de exaustão além de proteções para evitar que a névoa saia da máquina. O ruído do sistema de ar comprimido também excede o normalizado.

Apesar de o MQL promover lubrificação eficiente, redução da energia de retificação, da energia específica e do desgaste do rebolo para um nível de comparação com os fluidos de

corte (óleos solúveis) em situações não muito severas de usinagem, os valores de rugosidade alcançados não são relativamente satisfatórios. (HAFENBRAEDEL & MALKIN, 2001).

Tawakoli, *et al.* (2009) relatam que, para o uso eficiente do MQL, é preciso avaliar o efeito dos parâmetros do sistema e das diferentes peças no desempenho do processo de retificação. Eficiência na lubrificação faz com que o cavaco deslize mais facilmente na superfície da ferramenta e promova melhor acabamento superficial.

2.8 FENÔMENO DO EMPASTAMENTO DAS POROSIDADES DO REBOLO

Wang, *et al.* (2000) afirma que quando a energia na interface rebolo/peça gera um aumento na temperatura, ocorre uma maior tendência de aderência de partículas metálicas nos poros da ferramenta abrasiva. Com isso, ocorrerá uma elevação ainda maior de temperatura, causando danos térmicos como a queima superficial da peça, além de piorar o acabamento da peça e aumentar o desgaste do rebolo. Portanto, quanto menor a energia específica associada ao processo, menor a chance de danos ao trabalho (SALMON, 1992).

Cameron, *et al.* (2010) explicam a fenomenologia do empastamento do rebolo da seguinte forma: quando o cavaco gerado no processo de retificação não é totalmente removido da zona de corte por meio do fluido refrigerante, esses cavacos alojam-se nos poros do rebolo, não deixando os fluidos entrarem perfeitamente na zona de corte e, dessa forma, dificultando ainda mais a limpeza. Esses cavacos alojados na superfície de corte do rebolo afetam a eficiência e qualidade da operação de retificação, pois aumentam a contribuição das deformações elástica e plástica na energia total de retificação. Assim, a energia inicial do processo irá subir e o calor na zona de corte também.

Detalhando um pouco mais este fenômeno, quando o processo de retificação se inicia, os cavacos vão sendo gerados e não são eliminados da zona de corte, mas sim, quando da utilização de MQL, misturam-se ao óleo do MQL e alojam-se nos poros do rebolo como mostra a figura 8. À medida que a usinagem ocorre, essa proporção de cavacos vai aumentando até o momento em que ocorre o contato entre a peça e os cavacos alojados. Assim, haverá atrito entre eles, ocasionando apenas deformação elástica e plástica da peça, além do atrito maior, o que aumentará a potência de corte, a rugosidade e circularidade da peça e o desgaste do rebolo. O cavaco no poro do rebolo irá gerar reações nos grãos abrasivos e na peça. Com isso, desgaste do rebolo se acentuará pelo desprendimento dos grãos. Adicionalmente, a peça será riscada pelo cavaco, piorando sua rugosidade.

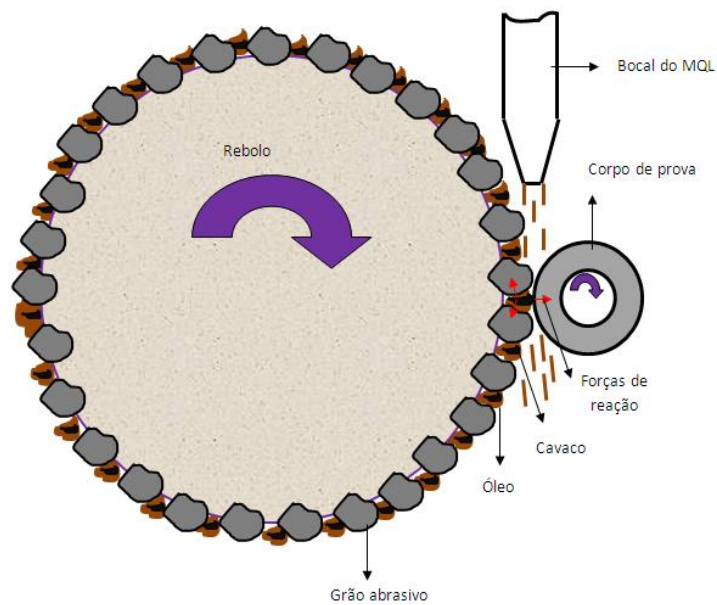


Figura 8: Fenômeno do empastamento do rebolo (OLIVEIRA, *et al.*,2012).

Conforme Sinot, *et al.* (2006), certas ligas são caracterizadas de difícil usinabilidade, como ligas de titânio, por exemplo, entopem os poros do rebolo facilmente quando partículas metálicas são comprimidas e aderidas nos espaços entre os grãos. Com altas taxas de remoção, o fenômeno é mais acentuado e alguns rebolos estão sujeitos a entupir mais e outros menos.

Sinot, *et al.* (2006) ainda descrevem duas maneiras de evitar o empastamento: usar um rebolo com uma estrutura aberta, o que pode aumentar a probabilidade da fratura do ligante; ou redressá-lo, o que aumenta o custo do processo.

A figura 9 apresenta uma pasta com tom cinza uma pasta com tom cinza perceptível a olho nu na superfície de corte do rebolo, além da imagem feita no microscópio da superfície de corte de um rebolo entupido com cavacos (aumento de 100 X).

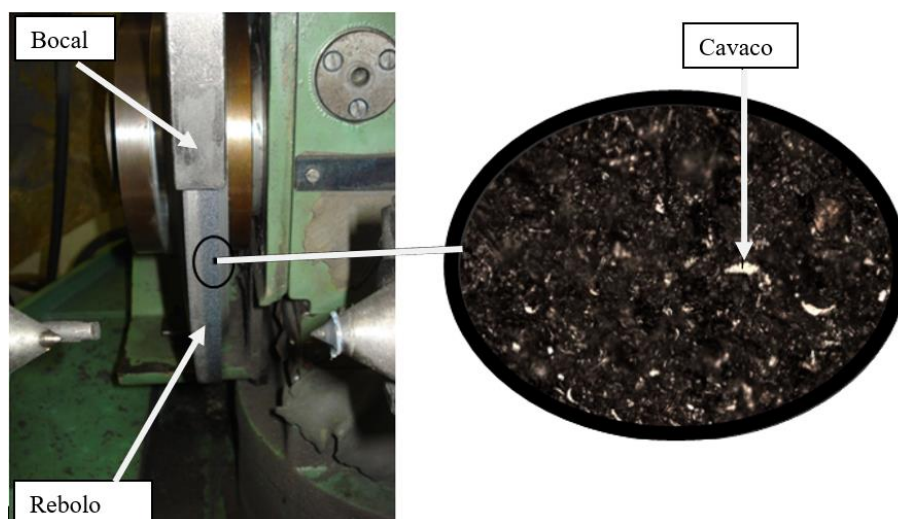


Figura 9: Rebolo empastado com cavacos aderidos (aumento de 100X) (OLIVEIRA, *et al.*, 2012).

2.9 LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO COM AR COMPRIMIDO

Conforme Oliveira, *et al.* (2012) o uso da técnica de lubrificação MQL associada a um jato de ar comprimido para limpeza da superfície de corte do rebolo com ângulo de incidência de 30° proporcionou uma limpeza com melhor resultado entre os ângulos analisados e com isto, melhores resultados em todas as variáveis analisadas, quando comparados a lubrificação convencional e especialmente o MQL sem o uso de jato de ar na retificação do aço SAE 4340.

De acordo com Marinescu, *et al.* (2015), os rebolos de CBN (nitreto cúbico de boro) e diamantado são boas ferramentas abrasivas que mantêm a forma superficial quando submetidas a pequenos desgastes. Entretanto, por causa do fenômeno do entupimento dos poros desses rebolos, torna-se complicado manter a forma final da ferramenta.

Em função disso, ocorre a queima na superfície da peça trabalhada e baixa qualidade superficial.

Conforme o trabalho realizado por Lee, *et al.* (2002) na retificação de canais em peças, o jato de ar comprimido é uma alternativa para impedir o fenômeno descrito anteriormente, pois o ar incide no rebolo e retira todas as impurezas que aderiram à ferramenta. Além disso, destaca que o ar comprimido promove certo efeito lubrificante que não deixa as impurezas direcionarem-se e aderirem à ferramenta, de acordo com a Figura 10. Dessa forma, quanto menor for a pressão do ar, menor será seu efeito de limpeza.

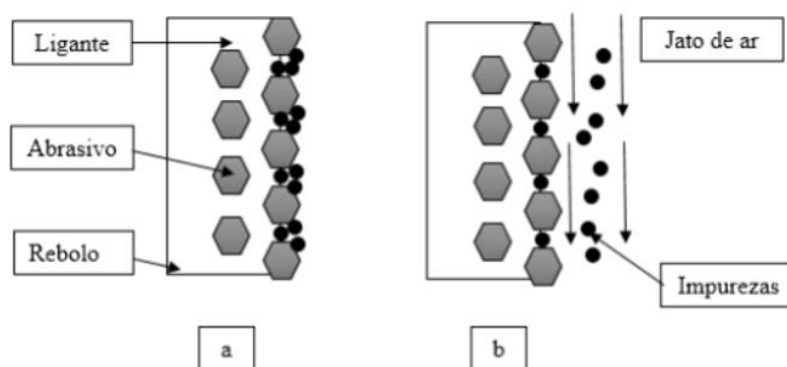


Figura 10: Limpeza do rebolo com jato de ar, adaptado (OLIVEIRA, *et al.*, 2012).

Este experimento foi realizado colocando o jato de ar comprimido de duas maneiras, na mesma direção que a rotação do rebolo e na direção oposta à rotação do rebolo Lee, *et al.* (2002) concluíram que quando o jato de ar foi usado, houve uma menor diminuição na profundidade de corte decorrente da diminuição do desgaste da ferramenta abrasiva. Além do mais, a precisão dimensional com o jato de ar foi melhor do que com o líquido refrigerante somente, ou seja, melhores valores de rugosidade podem ser obtidos com a limpeza. Esse resultado indica que o jato removeu o fino pó, e preveniu o entupimento. Isso contribui na manutenção de uma forma do rebolo. Outra conclusão tirada do trabalho foi que o jato de ar na mesma direção da rotação do rebolo obteve melhores resultados que na direção contrária, pois, este último resultou em trepidação no rebolo, o que piora a precisão dimensional.

Oliveira, *et al.* (2012) ressalta que além do uso do jato de limpeza, o sistema projetado permite o ajuste do ângulo de incidência, e os melhores resultados foram alcançados nos posicionamentos tangenciais; a 30° e a 60° nas três velocidades de mergulho empregadas: 0,25; 0,50 e 0,75 mm/min. A inclinação de 30° do bocal do jato de ar foi a condição que alcançou maior eficiência na limpeza do rebolo nas velocidades de 0,25 e 0,75 mm/min, gerando assim os menores valores de rugosidade. Já para a velocidade de mergulho de 0,50 mm/min as situações de limpeza MQL+30° e MQL+60° apresentam intervalos de confiança próximos, porém as duas situações apresentaram rugosidades inferiores aos outros métodos.

A figura 11 mostrar o efeito do jato de limpeza do rebolo nos ensaios realizados por Oliveira *et al.*, 2012.

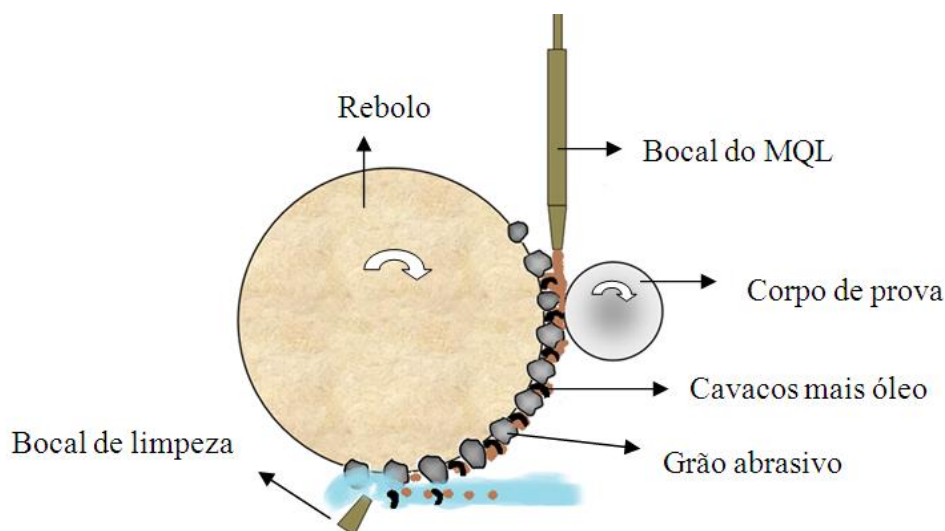


Figura 11: Efeito do jato de ar comprimido na limpeza do rebolo. (OLIVEIRA, *et al.*, 2012)

2.10 AS VARIÁVEIS DE SAÍDA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Diversas variáveis podem ser analisadas a fim de verificar as características do processo de retificação. Tais variáveis são especificadas em função dos diferentes tipos de materiais que apresentam diferentes mecanismos de remoção de cavacos, (KRAMER, 2007). As variáveis de saída são analisadas para melhor compreensão dos resultados, pois a interação singular entre o grão abrasivo e a peça possui uma influência direta na modelagem de tais variáveis (HECKER *et al.* 2007).

2.10.1 Rugosidade

A qualidade da superfície gerada na retificação de qualquer material determina muitas características da peça trabalhada como a mínima tolerância, a eficiência na lubrificação, a vida útil, propriedades funcionais, resistência à fadiga e corrosão, entre outras. Dessa forma, um parâmetro típico que tem sido utilizado para quantificar a qualidade topográfica da superfície é a rugosidade (HECKER & LIANG, 2003).

Assim, Marinescu, *et al.* (2016) define a rugosidade como o conjunto de irregularidades (erros microgeométricos) encontradas nas superfícies usinadas. Um dos parâmetros de rugosidade utilizado é a rugosidade média (Ra) que é definida como a média aritmética do desvio do perfil de rugosidade em relação à linha média (MAYER & FANG, 1993).

Weck, *et al.* (2001) diz que a qualidade superficial depende principalmente dos aspectos tecnológicos como o rebolo, parâmetros de dressagem, taxa de remoção de material e o uso de lubrificantes que reduzem as forças e energia. Bigerelle, *et al.* (2008) relata que a redução da rugosidade está diretamente relacionada com o tamanho e a forma do grão abrasivo do rebolo, onde quanto mais arestas de corte em contato com a superfície melhor a rugosidade. A natureza do ligante também influencia nessa variável, segundo Demirci *et al.* (2008).

Já para Hecker & Liang (2003), a rugosidade é função das condições cinemáticas do processo (profundidade de corte, velocidade de corte e da peça) e também do material usinado. Assim, uma maior velocidade melhora a qualidade superficial, pois haverá uma maior quantidade de grãos em contato com a peça.

Além disso, Ramesh & Huang (2003) dizem que o tempo de centelhamento, e o tipo de dressagem melhoram a qualidade superficial porque há uma fragmentação nos cavacos.

2.10.2 Erro de Circularidade

O erro de circularidade define-se como espaçamento radial entre dois círculos teóricos perfeitos e concêntricos onde deve - se encontrar um círculo real. Tal tolerância é definida em função da aplicação da peça (JEDRZEJEWSKI & MODRZEJCKY, 1997).

Dessa forma, segundo Holesovsky & Hrala (2004), a precisão de uma peça trabalhada na retificação é predita pela precisão do equipamento de produção, a magnitude de desgaste do rebolo, rigidez do conjunto máquina/peça/ferramenta/sistema de fixação, a taxa de remoção do material e energia específica. Com base nisso, quanto maior o calor na zona de corte maior dilatação e deformações térmicas e então ocorrerá na peça um aumento nos erros geométricos, especialmente no erro de circularidade (DEMETER & HOCKENBERGER, 1997).

2.10.3 Desgaste diametral do rebolo

Durante a retificação de uma peça existem três formas de desgaste da ferramenta abrasiva: pelo atrito entre o grão abrasivo e a peça; fratura do grão; fratura do ligante. Essas formas de desgaste são decorrentes das solicitações mecânicas à que o rebolo é submetido e também da deterioração térmica do próprio ligante (LIAO, *et al.* 2000).

A eficiência do rebolo em contraposição ao desgaste pode ser medida por meio da relação “G”. Esta relação é um parâmetro importante porque mantém certa ligação com os

custos do rebolo em muitas operações. Por esse motivo, rebolos que apresentam relação “G” alta produzem mais e desgastam-se menos (KRUEGER, *et al.* 2000).

Assim, de acordo com Marinescu, *et al.* (2016), a relação “G” é uma medida de quanto volume de material é removido da peça por unidade de volume de rebolo gasto:

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (11)$$

Onde: V_w - volume de material removido e V_s - volume de rebolo gasto.

Segundo Choi, *et al.* (2008), as mudanças nas arestas de corte da superfície de corte da ferramenta abrasiva afetam o desempenho da retificação. Com isso, Marinescu, *et al.* (2016) relatam que o desgaste do rebolo durante a retificação influencia, entre outros, nos seguintes aspectos do processo:

- ✓ Erro na profundidade de corte;
- ✓ Erro na dimensão final da peça;
- ✓ Aumento das forças características do processo;
- ✓ Aumento ou decréscimo da rugosidade;
- ✓ Mudança no número de arestas de corte efetivas;
- ✓ Nova dressagem do rebolo, ocasionando perdas na superfície da ferramenta, desgaste da ferramenta de dressagem e também gasto de tempo.

Entretanto, alguns fatores que influenciam o desgaste da ferramenta abrasiva são citados em alguns trabalhos. Choi, *et al.* (2008) redigiu em seu artigo que a relação G está primariamente relacionada com a espessura equivalente de corte, onde o aumento dessa espessura promove diminuição do parâmetro G. Além do mais, a maior eficiência do grão abrasivo é conseguida por meio de uma maior velocidade de corte e também pela aplicação de lubrificação.

O desgaste do rebolo é basicamente o desgaste devido ao atrito intenso entre os grãos abrasivos e a peça (WANG, *et al.*, 2016). Assim, o aumento no efeito da lubrificação, devido ao fluido de corte, reduz o desgaste do rebolo graças à redução do atrito entre os abrasivos e a peça, e dos cavacos com o ligante, o que permite aos grãos abrasivos permanecerem por mais tempo presos ao ligante (MALKIN & GUO, 2008).

Segundo Silva, *et al.* (2007), o aumento da lubrificação pela aplicação do fluido de corte, gera a diminuição do desgaste do rebolo, devido a diminuição do atrito entre o grão,

a peça e o cavaco. Assim, a lubrificação permite aos grãos abrasivos permanecerem por mais tempo fixado ao ligante, o que gera um menor desgaste diametral do rebolo. Logo, uma eficiente lubrificação da zona de contato reduz o desgaste do rebolo, por diminuir as forças de corte (SILVA, *et al.*, 2020).

2.10.4 Potência de retificação

Segundo Malkin & Guo (2008), a potência de retificação (P) é associada à velocidade de corte (v_s) e, à velocidade da peça (v_w) e à força tangencial de corte (F_t) segundo a Equação 12.

$$P = F_t \cdot (v_s \pm v_w) \quad (12)$$

O sinal positivo indica que v_s e v_w têm direções opostas e o sinal negativo indica mesma direção. Entretanto, se v_s é muito maior que v_w , a equação 13 pode ser descrita como:

$$P = F_t \cdot v_s \quad (13)$$

A força tangencial (F_t) é a componente da força de retificação responsável pela dissipação de potência em situações de alta velocidade do rebolo. Geralmente, a potência associada ao avanço e à velocidade transversal é desprezada (MARINESCU *et al.*, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os equipamentos e materiais empregados nos experimentos, assim como os procedimentos executados e parâmetros de entrada adotados no desenvolvimento do trabalho. Também são descritas as medições e análise das variáveis de saída e das demais variáveis, além dos definidos.

A retificação dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia - UNESP - campus Bauru. Os resultados de rugosidade, circularidade e desgaste diametral do rebolo, obtidos após a experimentação, foram analisados nos laboratórios da UNESP, campus de Bauru.

3.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Retificadora cilíndrica externa

Os experimentos foram realizados na retificadora cilíndrica CNC fabricada pela empresa SULMECÂNICA, modelo RUAP515H equipada com comando numérico computadorizado CNC da Fagor para o acionamento do eixo “X”. Utilizaram-se dois programas CNC; um para a usinagem dos corpos de prova e outro para a impressão do rebolo desgastado.

A retificadora possuía vedação com cortinas plásticas e placas de policarbonato para minimizar a perda de fluido para o ambiente. O equipamento comporta também um tanque para fluido de corte e um compressor de ar para pressurização do fluido atomizado no método MQL. Para medição de vazão dos fluidos aplicados o sistema é dotado de um medidor SVTG12/12BA4A44BS, do fabricante Contech Company e calibrado a 8 kgf/cm²

. Ambos os sistemas são conectados ao equipamento e os bocais de saída são aparafusados na máquina direcionando o fluido para a zona de interface entre ferramenta e peça.

3.1.2 Corpo de prova

O material utilizado como corpo de prova foi a cerâmica avançada Alumina, composta por 96% de Al₂O₃ e 4% de fusão óxidos (SiO₂, CaO, MgO e outros) com densidade de 3,7 g/cm³ e dureza 1339 ± 47 HV. O corpo de prova em formato de anel utilizado possuía as seguintes dimensões: diâmetro externo 54 mm, diâmetro interno 30 mm, espessura 4 mm. As dimensões do corpo de prova e o dispositivo de fixação são apresentados na figura 12.

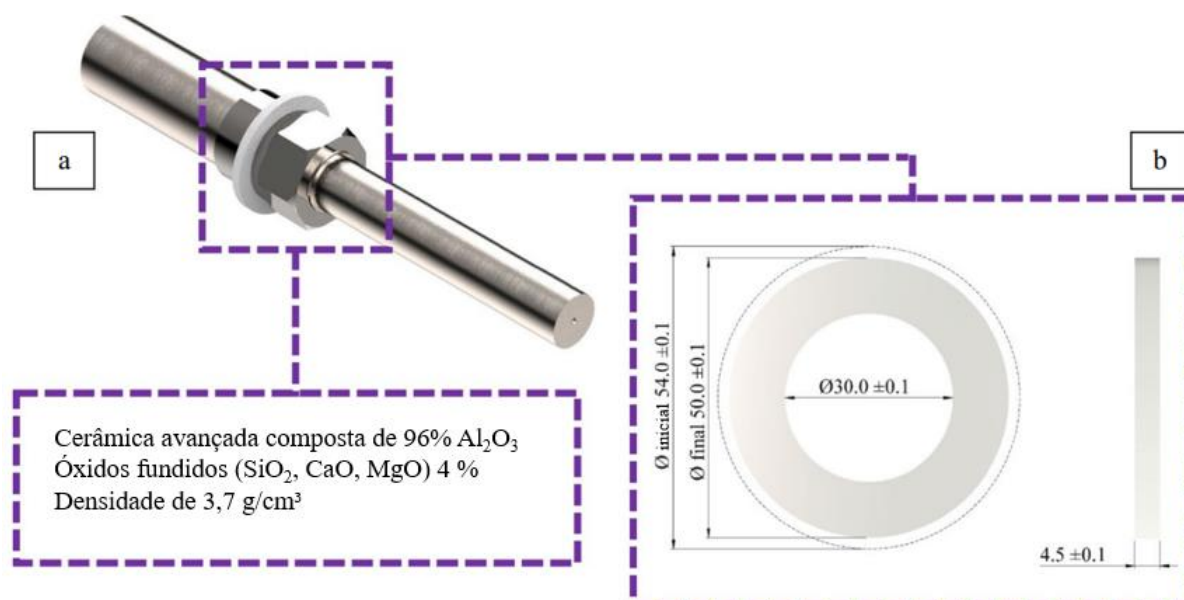


Figura 12: (a) fixação e da peça no dispositivo. (b) dimensões da peça.

3.1.3 Rebolo Utilizado

Utilizou-se um rebolo superabrasivos de diamante com ligante resinoide D107N115C50 fabricados pela empresa Nikon Ferramentas de Corte, pertencente ao grupo Saint-Gobain. As dimensões do rebolo são: 350,0 mm de diâmetro externo inicial; 15 mm de largura e 127 mm de diâmetro do furo. A calibração da rotação do rebolo foi feita utilizando-se de um tacômetro digital da marca LUTRON, modelo DT-2235B. Deste modo, utilizou-se velocidade de corte constante e igual a 30 m/s acionado por intermédio de um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW 08.

As operações de dressagem dos rebolos foram mantidas constantes para todos os ensaios. O procedimento foi realizado com um dressador multigranular, conglomerado, fabricado pela empresa Master Diamond. As dimensões da pastilha são: 15 mm x 8 mm x 10 mm. As condições de dressagem foram: velocidade de corte v_s de 30 m/s, velocidade de dressagem v_d de 100 mm/min, profundidade de dressagem por passada a_d de 2 μm e profundidade de dressagem radial de 40 μm .

3.1.4 O sistema de refrigeração convencional

O sistema de refrigeração convencional utilizado é o mesmo utilizado em várias empresas atualmente. Consiste essencialmente no reservatório de fluido, bomba de sucção, mangueiras, bocais aplicadores e o fluido de corte. O reservatório da retificadora possui

capacidade de 80 litros. O fluido de corte utilizado foi o óleo solúvel semissintético Rocol 4847 Ultracut 370 concentrado, fabricado pela empresa Quimatic Tapmatic do Brasil Ltda., que foi diluído em uma proporção de 5%. Manteve-se o monitoramento e controle de pH assim como a presença de agentes orgânicos evitando a possível influência destes nos resultados. Quanto à proliferação de bactérias, ressalta-se que seu controle não foi necessário devido à rápida utilização do fluido de corte após a emulsão ter sido adicionada juntamente com a água no reservatório previamente limpo, impedindo assim a contaminação do mesmo. O óleo também é dotado em sua composição por fungicidas e biocidas conforme informa o fabricante. Para a aplicação do fluido, com auxílio do medidor de vazão instalado controlou-se a injeção do óleo em 17 l/min. A potência da bomba de injeção de óleo no sistema de lubrificação instalada é de 372,85 watts. A figura 13 apresenta o sistema de lubrificação convencional.

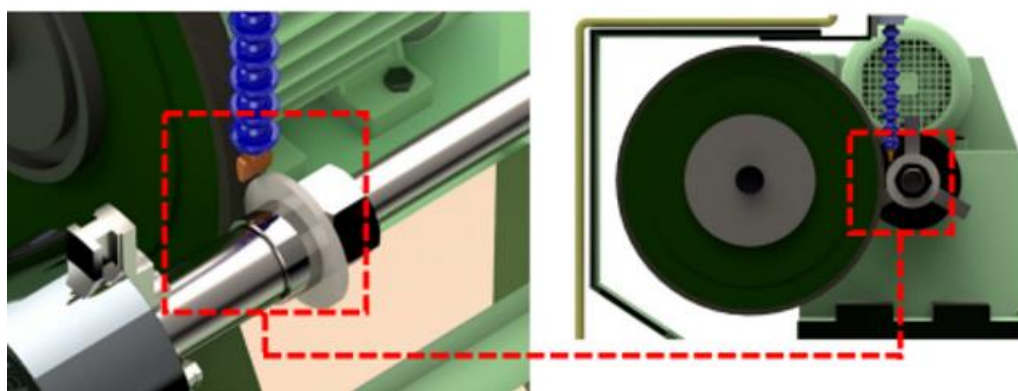


Figura 13: Sistema de lubrificação convencional.

3.1.5 O sistema MQL

O sistema MQL é composto basicamente de: compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador (equipamento de MQL) e bocal projetado para a utilização de MQL na retificação.

O compressor de ar utilizado era do modelo MSV 30/350, linha Max, fabricado pela empresa Schulz. A pressão de ar comprimido foi controlada através de regulador de pressão com filtro e medidor de vazão do tipo turbina. A pressão do ar comprimido aplicada nos experimentos foi de 8 bar e a velocidade utilizada foi de 32 m/s. O dispositivo dosador utilizado era do modelo Accu-Lube 79053D, fabricado pela ITW Chemical Products Ltda. Esse dispositivo controla a vazão de fluido e ar comprimido de forma independente e a atomização do processo ocorre no interior do bocal. A Figura 14 apresenta o dispositivo dosador e suas principais partes.

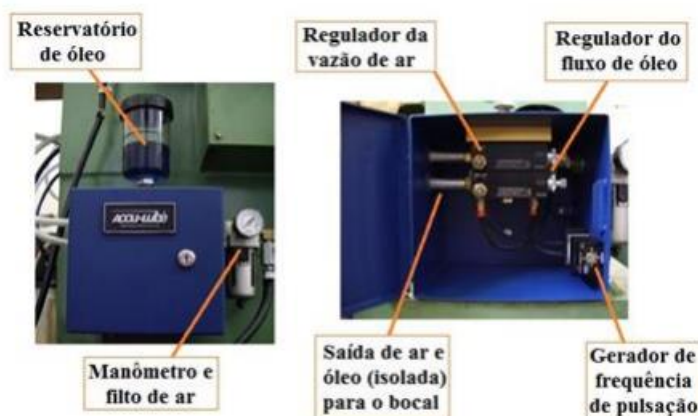


Figura 14: Aplicador ITW Accu-lube 76053D.

O fluido de corte utilizado no sistema MQL foi o óleo de base vegetal biodegradável Accu-Lube LB 1000 do fabricante ITW Chemical Products Ltda; e foi aplicado sem diluição. Este fluido é adequado para aplicações em altas pressões devido aos seus aditivos. A vazão de óleo empregada no sistema MQL foi de 100 ml/h.

Na figura 15 é apresentado o bocal empregado para a lubrificação MQL. Este foi projetado com dimensões e formas próximas ao desenvolvido por SILVA, *et al.* (2007). O bocal foi fabricado em latão e possui várias entradas de ar através de furos externos. Estes furos externos estão conectados a mangueiras independentes externas. Possui (duas) entradas de fluido de corte através de dois furos internos que recebem fluido de duas mangueiras independentes passadas internamente pela mangueira de ar comprimido. O bocal possui ainda uma câmara interna para uma correta mistura do ar comprimido com o fluido de corte através do princípio de Venturi. A saída da mistura fluido/ar comprimido ocorre em uma saída retangular.

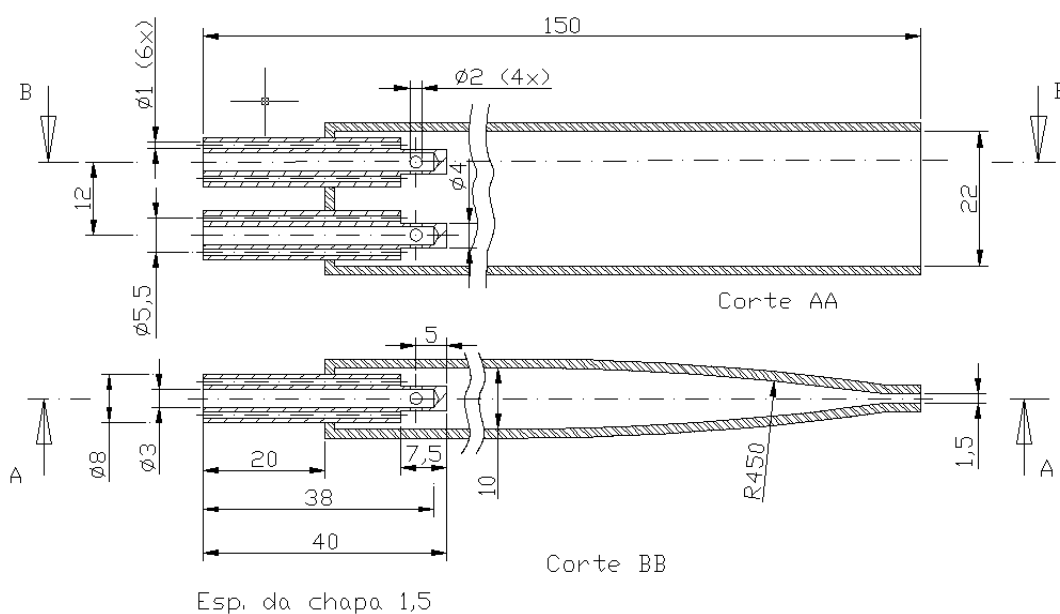


Figura 15: Projeto do bocal para experimentação com MQL (SILVA, *et al.*, 2007).

A figura 16 demonstra a fixação do bocal MQL na retificadora.

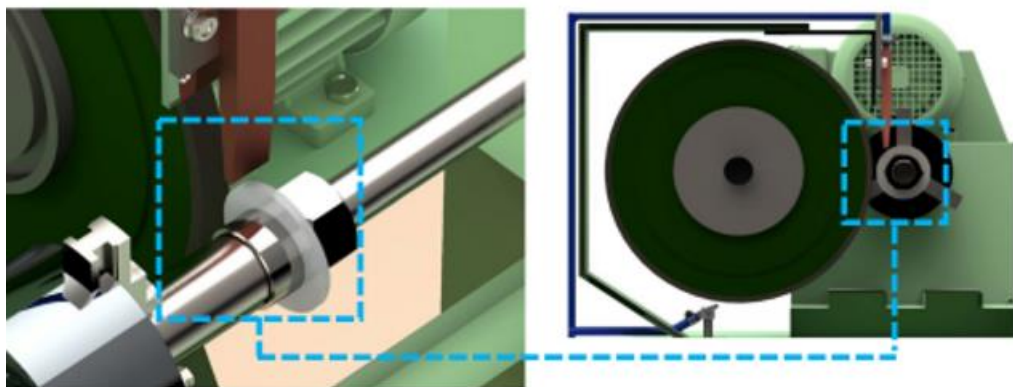


Figura 16: Sistema de lubrificação MQL.

3.1.6 O sistema de limpeza do rebolo

Esse sistema é independente do sistema de MQL e constituído de um compressor, reguladores de vazão e pressão e o bocal de limpeza. Optou-se por construir um sistema de ar comprimido independente, para não sobrecarregar um único compressor e ter maior eficiência e precisão nos resultados a serem obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa.

Para aplicação do ar comprimido usado na limpeza do rebolo foi projetado um bocal com um sistema de fixação que permitia o posicionamento do jato de ar em diferentes ângulos de incidência. A alteração do ângulo de incidência era feita através de uma escala graduada

com resolução de 15°. A geometria do bocal e seu sistema de fixação e posicionamento são apresentados nas figuras 17 e 18 respectivamente.

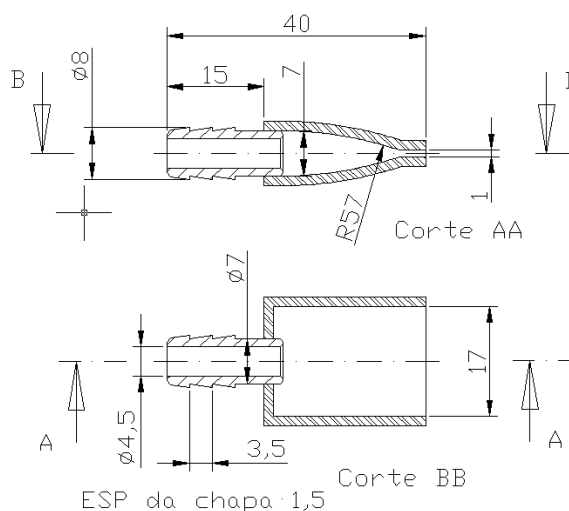


Figura 17: Bocal de limpeza.

O bocal de limpeza foi montado a uma distância em torno de 0,5 mm da superfície de corte do rebolo e fixado na proteção de ferro fundido que existe na retificadora. O posicionamento do bocal de limpeza na proteção da retificadora é mostrado na figura 18.

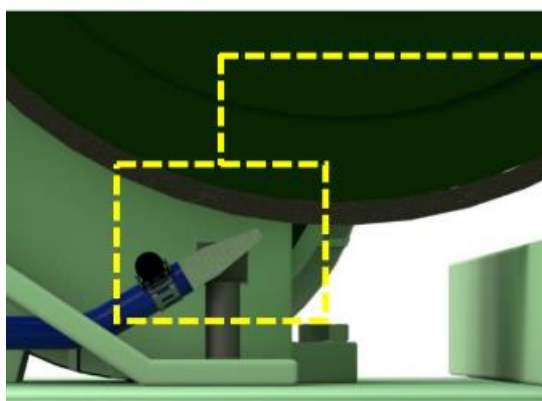


Figura 18: Fixação do bocal de limpeza.

Durante a realização dos ensaios com o sistema de limpeza o ar era expelido contra a superfície do rebolo a uma vazão de aproximadamente 30 m³/h (480 l/min) e pressão de 8 bar.

3.1.7 Sistema de aquisição de dados de potência elétrica consumida

Para o monitoramento da potência elétrica consumida durante o processo de retificação, foi utilizado um inversor de frequência, modelo CFW 08, fabricado pela empresa WEG, que monitora a corrente elétrica e a tensão do motor de acionamento do rebolo durante

o ensaio. Estes sinais são tratados por um circuito eletrônico, denominado Curvopower 3, projetado e construído em parceria com o Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais – LADAPS da Faculdade de Engenharia UNESP – Bauru e transmitidos a uma placa de aquisição de dados A/D, instalada em um notebook. Finalmente, os sinais são analisados pelo software LabView® 7.1 (Laboratory Virtual Instrument), da empresa National Instruments, obtendo-se os valores de potência elétrica consumida durante o ensaio.

3.2 CLASSIFICAÇÃO E PARÂMETROS DOS ENSAIOS

Considerando algumas limitações da retificadora empregada como, por exemplo, baixas rotações do rebolo, ensaios preliminares foram realizados com o intuito de se obter as melhores condições de usinagem para serem usadas nos ensaios definitivos. Salienta-se que para alguns parâmetros os valores utilizados não são os ideais, porém são os valores máximos alcançados na retificadora empregada.

O trabalho consistiu em 18 ensaios, considerando a aplicação de seis condições de lubrificação em três velocidades de avanço distintas.

As condições de lubrificação empregadas foram:

- ✓ Convencional (CO) – condição adotada como referência para análise das variáveis de saída por ser a mais amplamente empregada;

- ✓ MQL sem o sistema de limpeza (MQL);

- ✓ MQL + Jato de Limpeza do Rebolo (MQL + JLR)

Quando foi usado o sistema MQL juntamente com o sistema de limpeza do rebolo foram fixados quatro ângulos de incidência do jato de limpeza conforme os ângulos de incidência usados por Oliveira *et al.*(2012) em seu trabalho limpando a superfície do rebolo com jato ar comprimido. Os posicionamentos escolhidos foram:

- ✓ MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado tangente ao rebolo (MQL + JLR 0°).

- ✓ MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado a 30° em relação ao rebolo (MQL + JLR 30°);

- ✓ MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado a 60° em relação ao rebolo (MQL + JLR 60°);

- ✓ MQL + sistema de limpeza com o bocal de limpeza posicionado a 90° em relação ao rebolo (MQL + JLR 90°);

Os ângulos de incidência do jato de limpeza do rebolo usado nos ensaios são mostrados na figura 19.

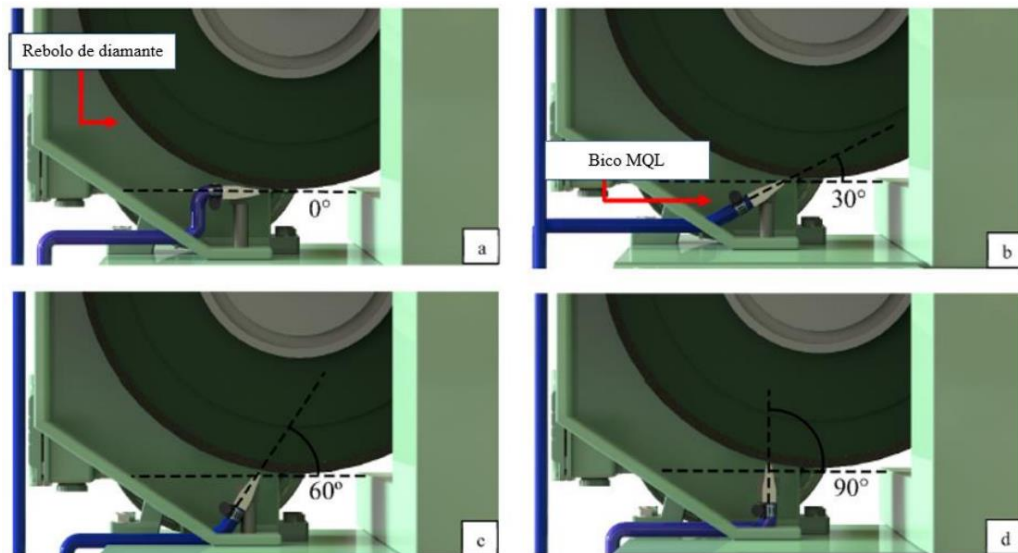


Figura 19: Detalhe dos ângulos de incidência do jato de ar comprimido.

As velocidades de avanço utilizadas foram: 0,25 mm/min (v_{f1}), 0,5 mm/min (v_{f2}) e 0,75 mm/min (v_{f3}).

A matriz dos ensaios é mostrada na figura 20.

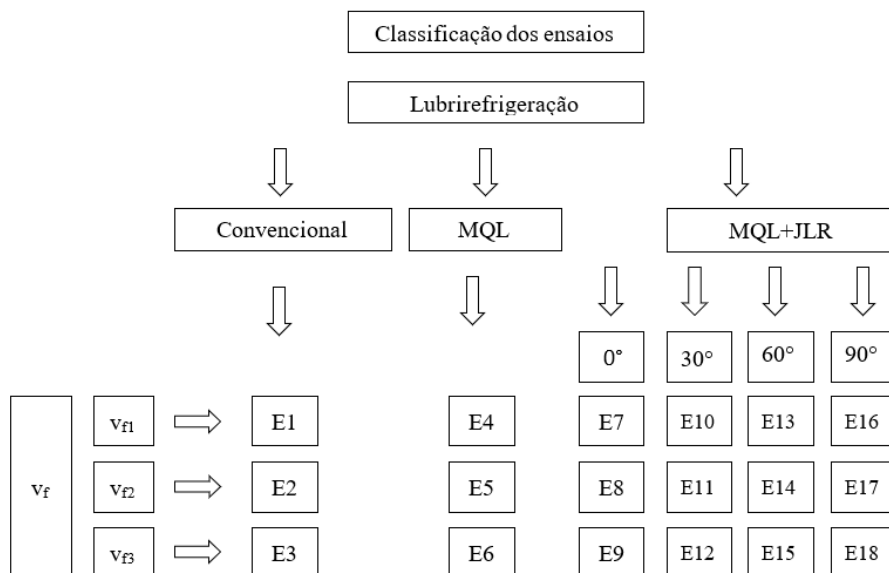


Figura 20: Matriz de ensaios.

Foram retificadas duas peças em cada ensaio totalizando um volume de material removido de 2600mm³. Para analisar as variáveis de saída foram realizadas duas repetições em cada ensaio. Antes de cada ensaio o rebolo era dressado.

Os parâmetros de entrada que foram mantidos constantes em todos os ensaios definitivos foram:

- ✓ Velocidade de corte (v_s) de 30 m/s (baixa para o rebolo diamantado, limitada pela retificadora);
- ✓ Rotação da peça (n_w) de 204 RPM ($v_w = 0,58$ m/s);
- ✓ Sobremetal removido a cada ciclo 0,1 mm;
- ✓ Tempo de centelhamento (t_s) igual a 5 segundos;
- ✓ Largura de retificação de 4 mm;
- ✓ Vazão do fluido de corte na refrigeração convencional de 17 l/min;
- ✓ Vazão do fluido de corte no MQL de 100 ml/h;
- ✓ Pressão do ar no MQL de 8 bar;
- ✓ Velocidade de saída do ar de 30 m/s no bocal;
- ✓ Pressão do sistema de limpeza: 8 bar;
- ✓ Vazão do ar no sistema de limpeza: 480 l/min;
- ✓ Profundidade de dressagem (a_d) de 0,040 mm (40 ciclos de 0,001mm);
- ✓ Velocidade de dressagem (v_d) de 500 mm/min (Feita manualmente, marcando-se o tempo para percorrer determinada distância).
- ✓ Dressador conglomerado de diamante, dimensões de 15 mm x 8 mm x 10 mm

Considerando que o diâmetro inicial da peça é 54 mm, o diâmetro final é 50 mm e a largura de retificação é de 4 mm, os seguintes parâmetros de retificação que são apresentados na tabela 2, sendo os valores máximos para o diâmetro inicial e mínimos para o diâmetro final.

Tabela 2: Parâmetros de retificação

d_e (mm)	v_f (mm/min)	a (μ m)	l_c (mm)	Q_{wmin} (mm ³ /min)	Q_{wmax} (mm ³ /min)	Q'_{wmin} (mm ³ /mm.min)	Q'_{wmax} (mm ³ /mm.min)	h_{eqmin} (μ m)	h_{eqmax} (μ m)
357	0,25	1,23	0,66	157	170	39	42	0,022	0,024
357	0,5	2,45	0,93	314	339	79	85	0,044	0,047
357	0,75	3,68	1,14	471	509	118	127	0,065	0,071

3.3 SEQUÊNCIA DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Antes da realização de cada ensaio realizaram-se operações de dressagem, a fim de reduzir a influência do desgaste do rebolo nas variáveis de saída. O dressador utilizado foi um do tipo conglomerado, de dimensões 15 x 8 x 10 mm, da empresa Master Diamond Ltda. As operações de dressagem foram realizadas com a lubrificação convencional. Esse tipo de dressador foi escolhido para uniformizar a superfície de corte do rebolo para o início de um novo ensaio, embora a dressagem rotativa fosse a mais indicada; entretanto, não foi utilizado devido a indisponibilidade do mesmo.

A retificadora empregada não possuía dispositivo de dressagem automática, então o deslocamento transversal para a realização da dressagem foi realizado de forma manual a uma velocidade (v_d) de 500mm/min, a profundidade de dressagem (a_d) foi de 0,04mm; valor determinado após ensaio preliminar; realizada em 40 ciclos. Para as condições de dressagem adotadas houve a predominância do microefeito na afiação da ferramenta.

Na operação de dressagem do rebolo, removia-se material até que a ferramenta abrasiva não apresentasse nenhuma marca referente à usinagem anterior. A operação de dressagem é mostrada na figura 21.



Figura 21: Operação de dressagem do rebolo.

O corpo de prova em forma de anel foi fixado com interferência e com uma porca em um mandril e este, por sua vez, fixado entre pontas na máquina. Este tipo de sistema é um dos mais utilizados nas indústrias, pois garante rapidez, facilidade de fixação e precisão reduzindo os erros encontrados nas fixações com placas.

Como a largura do corpo de prova ($b_w = 4 \text{ mm}$) era menor que a largura do rebolo ($b_s = 15 \text{ mm}$), realizavam-se dois ensaios em regiões distintas do rebolo antes das operações de dressagem. Considerando-se os mesmos parâmetros de dressagem em todos os ensaios, a ferramenta abrasiva apresentava as mesmas condições iniciais para todos os ensaios.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA

Realizados os ensaios procederam-se as medições das variáveis de saída: circularidade; rugosidade; desgaste diametral do rebolo; e microscopia confocal. Escolheram-se tais parâmetros, pois são os mais utilizados pelas indústrias além de serem aqueles que mais indicam as interferências do processo de retificação na integridade do material.

3.4.1 Medição da Rugosidade

Para a medição da rugosidade média das peças (R_a), utilizou-se um aparelho da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+. e um software TalyProfile, versão Lite 3.1.4. O aparelho é dotado de uma agulha com um apalpador de diamante com raio de ponta de $2 \mu\text{m}$, resolução de $0,01 \mu\text{m}$. O conjunto é anexado a um microcomputador mediante a interface de transmissão para coleta de dados RS232. Este equipamento é capaz de fazer medições de rugosidade em todos os seus parâmetros. No experimento, foi utilizado o parâmetro R_a (rugosidade média aritmética). O equipamento foi aferido e calibrado antes das medições, sendo configurado com *cut-off* de $0,8 \text{ mm}$, comprimento de amostragem de 4 mm . Os corpos de provas foram limpos utilizando uma sequência de banhos de thinner e álcoois etílico e metílico. Fixou-se o corpo de prova em um bloco em “V” e foram realizadas 5 medições em cada peça, em sentido axial, na direção perpendicular à superfície retificada e em regiões distintas e equidistantes. Com estes valores foi possível obter uma média aritmética e também o desvio-padrão das amostras. A medição de rugosidade é demonstrada na figura 22.



Figura 22: Medição da rugosidade.

3.4.2 Medição da Circularidade

A circularidade foi obtida através da utilização de um circularímetro modelo Tayround 31C marca Taylor Hobson.

Na ponta do braço encontra-se o apalpador com uma ponta de diamante, elemento que efetuava o contato com a peça para a obtenção da circularidade.

O circularímetro é alimentado através de um sistema de ar comprimido, garantindo assim que seus movimentos sejam extremamente precisos.

Usando uma resolução de $0,05 \mu\text{m}$ realizaram-se três medições em posições distintas na região retificada de cada uma das três peças retificadas em cada ensaio.

3.4.3 Medição do desgaste diametral do rebolo

O desgaste diametral do rebolo é um forte indicativo para a avaliação entre diferentes condições de retificação, considerando que em todas as condições de usinagem removeu-se o mesmo volume de material. A marcação do desgaste do rebolo foi possível devido a não utilização da largura total do rebolo (bs) de 15 mm, pois a largura utilizada foi de 8 mm (2 ensaios por rebolo). Criou-se assim um degrau no rebolo. Após a retificação do corpo de prova do ensaio (cerâmica avançada) marcou-se o desgaste em outro corpo de prova (aço SAE 1020). O processo de marcação do rebolo é mostrado na figura 23.



Figura 23: Processo de marcação do rebolo.

O desgaste foi medido com o auxílio do rugosímetro junto com um software para obtenção do perfil impresso do corpo de prova retificado no corpo de prova de impressão, conforme a figura 24.

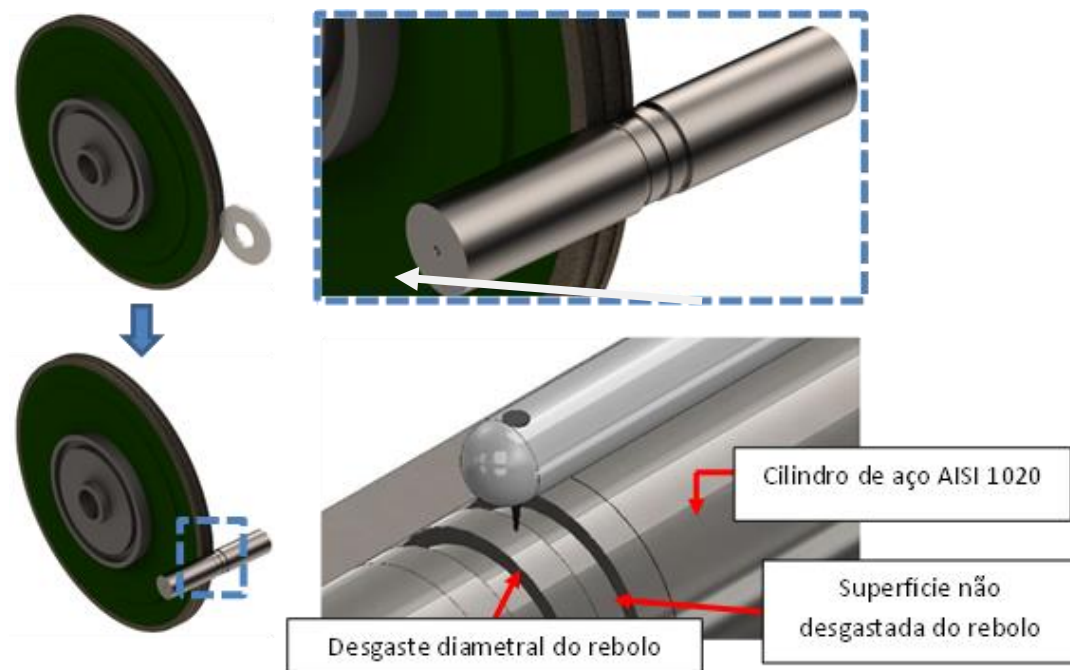


Figura 24: Medição do desgaste diametral do rebolo.

Assim, com o perfil obtido no programa de medição, pôde-se verificar o desgaste radial do rebolo e consequentemente o diametral, através da leitura da dimensão “a” na figura 25.

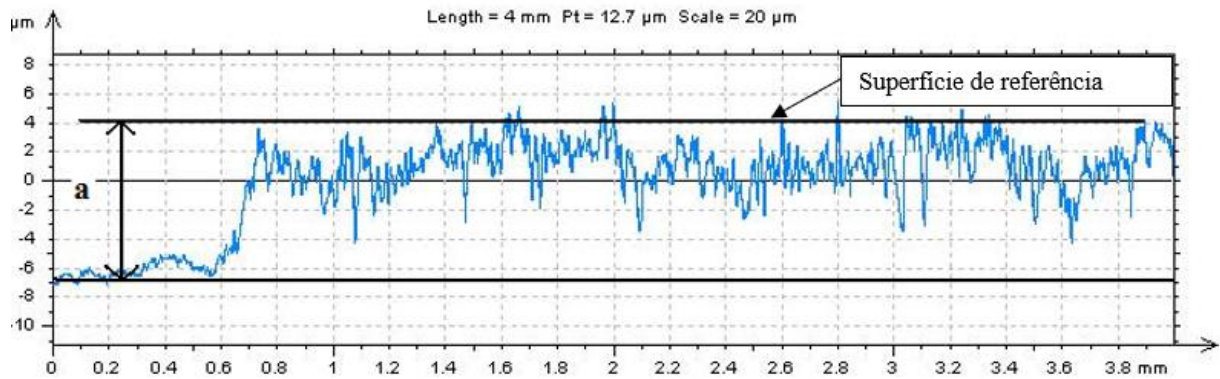


Figura 25: Esquema da medição do desgaste do rebolo.

A partir da medição do desgaste diametral foi possível o cálculo da relação G .

3.4.4 Potência elétrica do motor

A potência de retificação foi adquirida por sensores Hall, com taxa de aquisição de 2k/s, e um codificador para medir a rotação do rebolo. Os sensores e o codificador foram conectados a um módulo Curvepower e a uma placa PCI-6035EDAQ (16 bits) fabricada pela National Instruments. Os dados coletados foram posteriormente processados e analisados nos softwares LabView 7.1 e MatLab.

3.4.5 Custo de fabricação

O custo de fabricação diferente das outras variáveis de saída não foi mensurado, mas calculado através de outros inputs realizados e observando demais constantes do processo. Conforme visto anteriormente, o custo de fabricação é o resultado da soma do custo em relação a aquisição e manutenção do rebolo, do fluido de corte e da energia consumida no processo.

Conforme visto anteriormente o custo do rebolo é uma combinação de diferentes fatores. Para a análise a constante do custo por volume de rebolo C_s foi calculado em 0,075 US\$/mm³ (referenciado a partir do custo de aquisição de ferramenta e do volume de material abrasivo aplicado na ferramenta) e o número de peças usinadas entre dressagens N_d foi de 2 unidades. O diâmetro da ferramenta d_s é de 350 mm, sua largura b_s é de 4 mm e a penetração radial de dressagem na ferramenta a_d é de 0,040 mm. O volume de material removido por peça V foi de 1306,902 mm³. A relação G variou de acordo com cada medição de desgaste diametral.

Para o custo do fluido de corte, a penetração radial total na peça foi de a_e 2 mm. A vazão do fluido v_{jet} , o número de recirculações de fluido N_c e o custo do fluido em uso C_f , variaram de acordo com o método de lubrificação utilizado (convencional ou MQL). O custo de descarte C_w foi de 0,085 US\$/l (DEMIRBAS & KOBAYASHI, 2017).

Por fim o custo de energia consumida variando com a potência de corte P_c variável, potência da bomba de óleo P_{bo} e a potência do compressor de ar P_{ar} , o custo por unidade de energia elétrica C_e em 0,12 US\$/kWh (ELECTRICITY PRICES, 2020). O custo do ar comprimido - C_{ar} foi definido segundo Hitchcox (2015). Também observadas a distância em vazio da ferramenta de corte do ponto 0 da máquina até contato com a peça R , a velocidade deste movimento r , a penetração radial total na peça foi de a_e , a velocidade de corte v_w e o tempo de *spark-out* t_s .

O custo pode ser definido como a associação de três principais custos:

- ✓ Custo com o ferramental, levando em consideração a aquisição, manutenção e desgaste;
- ✓ Custo com o fluido de corte, considerando aquisição, aplicação e descarte;
- ✓ Custo com a energia consumida, considerando desde a energia de corte específica e dos demais conjuntos mecânicos.

Um resumo dos parâmetros fixos pode ser visto na tabela 3 abaixo enquanto um resumo dos parâmetros variáveis pode ser visto na tabela 4 na sequência.

Tabela 3: Parâmetros fixos para o cálculo de custo

Símbolo	Descrição	Unidade de Medida	Valor
a_d	Penetração total de dressagem no rebolo	[mm]	0,040
a_e	Penetração total de usinagem na peça	[mm]	2
b_s	Largura do rebolo	[mm]	15
b_w	Largura do corpo de prova	[mm]	4
t_s	Tempo de centelhamento	[min]	0,083
C_r	Custo total do rebolo	[US\$]	2043
d_s	Diâmetro externo da ferramenta	[mm]	350
d_{min}	Diâmetro mínimo da ferramenta	[mm]	340
d_w	Diâmetro externo da peça	[mm]	54
N_d	Quantidade de peças entre dressagens	[-]	2
R	Distância percorrida pela ferramenta até o contato	[mm]	300
r	Avanço de retração e aproximação da ferramenta	[mm/min]	36000
V	Volume de material removido por peça	[mm ³]	1.306,903
Car	Custo de ar comprimido por volume	[US\$/m ³]	0,0106
Ce	Custo de energia	[US\$/kWh]	0,12
Cs	Custo por volume útil do rebolo	[US\$/mm ³]	0,0754
Cw	Custo de descarte de óleo	[US\$/l]	0,085

Tabela 4: Parâmetros variáveis para o cálculo de custo

Símbolo	Descrição	Unidade de Medida	Avanço [mm/min]	Valores					
				Convencional	MQL	MQL+JLR 0°	MQL+JLR 30°	MQL+JLR 60°	MQL+JLR 90°
P_{ar}	Potência do compressor de ar	[W]	[-]	0	5500	5500	5500	5500	5500
P_{bo}	Potência da bomba de óleo	[W]	[-]	372,85	0	0	0	0	0
V_{jet}	Vazão de fluido de corte	[l/min]	[-]	17	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,017
N_c	Número de recirculações de Fluido	[-]	[-]	10	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
V_{ar}	Vazão de ar comprimido	[m³/min]	[-]	0	0,85	1,982	1,982	1,982	1,982
C_f	Custo de fluido em uso	[US\$/l]	[-]	0,6875	13,75	13,75	13,75	13,75	13,75
G	Relação G	[-]	0,25	40,76	17,47	20,96	24,46	19,83	19,91
			0,50	33,02	14,15	16,98	19,81	16,06	15,31
			0,75	27,51	111,79	14,15	16,51	13,39	12,76
P_c	Potência de retificação	[W]	0,25	1040	1760	1590	1520	1680	1770
			0,50	1160	1960	1770	1690	1870	1970
			0,75	1390	2350	2130	2030	2240	2360

Os custos podem ser calculados através das equações abaixo, conforme Pusavec, et al. (2010):

$$C_{rebolo} = \frac{C_s \cdot V}{G} + \frac{\pi \cdot b_s \cdot C_s}{N_d} (d_s \cdot a_d - a_d^2) \quad (14)$$

$$C_{fluido} = \frac{v_{jet} \cdot a_e}{N_c \cdot v_w} \cdot (C_f + C_w) \quad (15)$$

$$C_{energia} = \frac{(P_c + P_{bo} + P_{ar}) \cdot C_e}{60000} \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (16)$$

$$C_{total} = C_{rebolo} + C_{fluido} + C_{energia} \quad (17)$$

3.4.6 Emissão de Poluentes

A análise de emissão de poluentes assim como o custo de fabricação foi calculada através de outros inputs realizados e observando demais constantes do processo. Conforme visto anteriormente, a análise de emissão de poluentes é o resultado da soma da emissão através do consumo de energia e da quantidade de fluido utilizado.

A emissão de poluentes através do consumo do fluido de corte varia a partir da vazão de óleo no sistema V_{jet} , e da constante de proporção de óleo na mistura k_p , variáveis conforme experimento. A emissão de carbono pelo uso do fluido CE_{oil} é de 3,0162 kgCO₂/l conforme descrito por Abellan-Nebot & Rogero (2019). Também observadas a distância em vazio da ferramenta entre o ponto 0 da máquina e a peça R, a velocidade deste movimento r , a penetração radial na peça foi de a_e , a velocidade de corte v_w e o tempo de spark-out t_s .

A emissão por energia consumida varia com a potência de corte P_c variável, potência da bomba de óleo P_{bo} e a potência do compressor de ar P_{ar} , a emissão por unidade de energia elétrica CE_e em 0,128 kgCO₂/MJ (ABELLAN-NEBOT & ROGERO, 2019). Da mesma forma que a emissão de poluentes pelo fluido de corte, também são levadas em consideração a distância em vazio da ferramenta de corte do ponto 0 da máquina até contato com a peça R, a velocidade deste movimento r , a penetração radial total na peça foi de a_e , a velocidade de corte v_w e o tempo de spark-out t_s .

A análise pode ser definida como a associação de dois principais custos:

- ✓ Emissão com o fluido de corte, considerando fabricação do fluido, aplicação e descarte;
- ✓ Emissão pôr a energia consumida, considerando desde a energia de corte específica e dos demais conjuntos mecânicos.

Um resumo dos parâmetros fixos pode ser visto na tabela 05 abaixo enquanto um resumo dos parâmetros variáveis pode ser visto na tabela 06 na sequência.

Tabela 5: Parâmetros fixos para o cálculo de emissão de poluentes

Símbolo	Descrição	Unidade de Medida	Valor
a_d	Penetração total de dressagem no rebolo	[mm]	0,040
a_e	Penetração total de usinagem na peça	[mm]	2
b_s	Largura do rebolo	[mm]	15
b_w	Largura do corpo de prova	[mm]	4
t_s	Tempo de centelhamento	[min]	0,083
d_s	Diâmetro externo da ferramenta	[mm]	350
d_{min}	Diâmetro mínimo da ferramenta	[mm]	340
d_w	Diâmetro externo da peça	[mm]	54
N_d	Quantidade de peças entre dressagens	[-]	2
R	Distância percorrida pela ferramenta até o contato	[mm]	300
r	Avanço de retração e aproximação da ferramenta	[mm/min]	36000
V	Volume de material removido por peça	[mm ³]	1.306,903
Ω	Velocidade de rotação da ferramenta	[rad/s]	183.78
CE_e	Emissão de carbono por energia desprendida	[kgCO ₂ /MJ]	0,128
CE_{oil}	Emissão de carbono por volume de óleo	[kgCO ₂ /l]	3,0616

Tabela 6: Parâmetros variáveis para o cálculo de emissão de poluentes

Símbolo	Descrição	Unidade de Medida	Avanço [mm/min]	Convencional	MQL	MQL+JLR 0°	MQL+JLR 30°	MQL+JLR 60°	MQL+JLR 90°
k_p	Diluição de óleo	[-]	[-]	0,05	1	1	1	1	1
P_{ar}	Potência do compressor de ar	[W]	[-]	0	5500	5500	5500	5500	5500
P_{bo}	Potência da bomba de óleo	[W]	[-]	372,85	0	0	0	0	0
V_{jet}	Vazão de fluido de corte	[l/min]	[-]	17	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,017
N_c	Número de recirculações de fluido	[-]	[-]	10	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
V_{ar}	Vazão de ar comprimido	[m³/min]	[-]	0	0,85	1,982	1,982	1,982	1,982
C_f	Custo de fluido em uso	[US\$/l]	[-]	0,6875	13,75	13,75	13,75	13,75	13,75
G	Relação G	[-]	0,25	40,76	17,47	20,96	24,46	19,83	19,91
			0,50	33,02	14,15	16,98	19,81	16,06	15,31
			0,75	27,51	111,79	14,15	16,51	13,39	12,76
P_c	Potência de retificação	[W]	0,25	1040	1760	1590	1520	1680	1770
			0,50	1160	1960	1770	1690	1870	1970
			0,75	1390	2350	2130	2030	2240	2360

A emissão de poluentes pode ser calculada através das equações abaixo, conforme Wang, *et al.* (2020):

$$CE_{energia} = \frac{(P_c + P_{bo} + P_{ar}) \cdot CE_e \cdot 3,6}{60000} \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (18)$$

$$CE_{fluido} = \frac{V_{jet} \cdot k_p \cdot CE_{oil}}{60000} \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (19)$$

$$CE_{total} = CE_{energia} + CE_{fluido} \quad (20)$$

3.4.7 Microscopia confocal

Para obtenção de imagens tridimensionais das superfícies retificadas, as amostras foram analisadas com um microscópio confocal, modelo LEXT OLS4000, da marca Olympus, utilizando-se ampliação de 20 e 100x, acoplado a um computador equipado com um software fornecido pelo fabricante para processamento das imagens. Estas análises foram realizadas no Núcleo de Manufatura Avançada – NUMA do Departamento de Engenharia de Produção da EESC/USP – São Carlos/SP.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção apresenta os resultados obtidos para: rugosidade, erro de circularidade, desgaste diametral do rebolo, relação G, potência de retificação, análises de custos de retificação e poluição por emissão de CO₂ emissões para cada aplicação. Os dados foram obtidos para cada técnica de lubrificação nas três velocidades de avanço estudadas.

No caso da rugosidade, além da avaliação quantitativa, foram utilizadas imagens obtidas por microscopia confocal para análise qualitativa do processo.

4.1 RUGOSIDADE

Para avaliar a qualidade da superfície para cada condição de lubrificação, foi utilizado o método da rugosidade média (Ra). A figura 26 mostra os resultados obtidos com a aplicação da técnica convencional e MQL, com e sem o sistema de jato de limpeza do rebolo, variando o ângulo de incidência do bocal para as três velocidades de avanço: 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min.

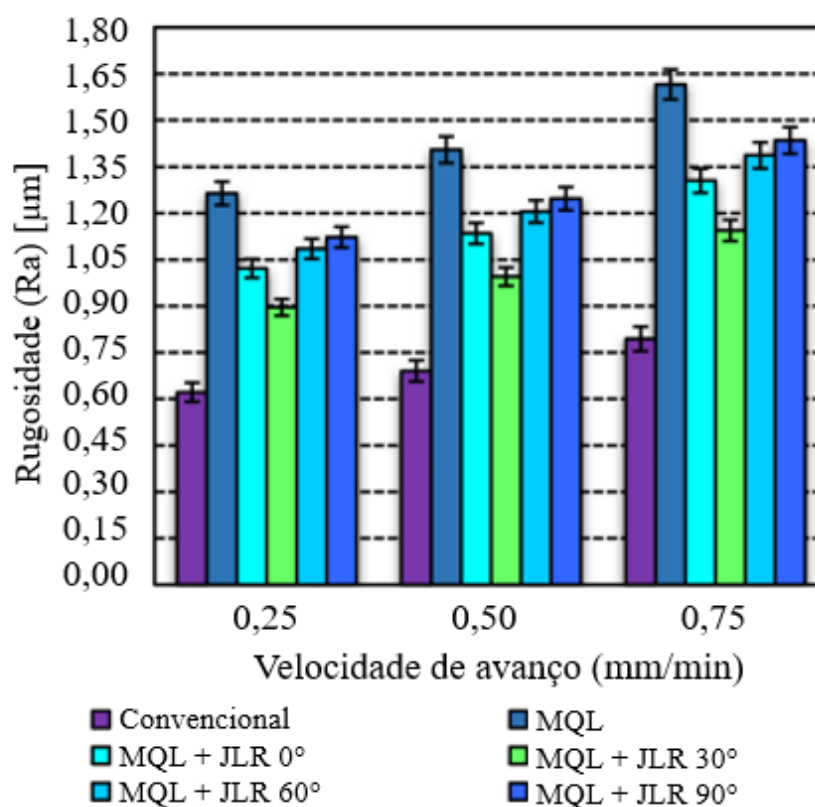


Figura 26: Rugosidades (Ra) nas diferentes técnicas.

A partir destes testes, foi possível entender que em todos os avanços utilizados, a técnica convencional, apresentou melhores valores de rugosidade superficial (Ra), enquanto a

técnica MQL não apresentou valores satisfatórios para esta operação. Uma possível explicação para esse fenômeno está relacionada a capacidade da lubrificação convencional remover as partículas de cavacos da superfície do rebolo. Esses respectivos cavacos, combinados com alta temperatura e contato de alta pressão do rebolo em direção a peça, visando a remoção de material, tende a gerar um fenômeno de entupimento, conforme observado nos estudos de Javaroni, *et al.* (2020) and Lopes, *et al.* (2020).

Rodríguez, *et al.* (2019) apresentou uma nova perspectiva sobre o entupimento na superfície do rebolo, cujo microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDX) foram empregadas para medir sua influência no processo. Eles concluíram que o fenômeno de entupimento é consequência de três fatores: cavacos aderidos aos poros, alta temperatura e alta pressão. Então, esses fatores são responsáveis pela formação do que os autores chamaram de camadas. Ainda assim, os mesmos autores disseram que a sequência dos três fatores constantes em seu estudo originou o fenômeno do entupimento.

Porém, o principal fator responsável pela maior precisão dimensional na peça está relacionado a capacidade de fluido de corte remover calor na interface rebolo-peça. Em contraste, a elevada quantidade de fluido de corte aplicada na superfície de corte do rebolo contribui para evitar a formação do entupimento, o que segundo para Rodríguez *et al.* (2020), pode manter o grão abrasivo mais agressivo com melhor capacidade de corte e corroborando com remoção de material mais eficiente que culmina em maior precisão dimensional e geométrica.

Como tal, qualquer nova técnica que se concentre em minimizar problemas relacionados ao meio ambiente e todas as situações perigosas para a saúde dos trabalhadores, inicialmente, eles têm que atender aos requisitos industriais. No entanto, o MQL, no primeiro momento, não consegue remover o calor com a mesma eficiência que a técnica convencional porque ocorrem duas situações: o fluido de corte aplicado ao sistema MQL tem mais propriedades lubrificantes do que refrigerantes, e o fenômeno de entupimento do rebolo eleva as temperaturas na região de corte.

Dado essas duas peculiaridades, é fato que a técnica MQL aplicada ao processo de retificação pode intensificar a degradação térmica da peça e do rebolo. No entanto, quando o MQL é combinado com o sistema de jato de limpeza do rebolo, há uma melhoria evidente na rugosidade (Ra).

Adicionando o sistema de jato de limpeza do rebolo à técnica MQL, o fenômeno de entupimento é diminuído abruptamente porque o ar comprimido atua como um mecanismo de arrasto, o que contribui para evitar a formação de camadas de cavacos na superfície do rebolo.

Além disso, embora a vazão de fluido aplicada é inferior à aplicada pelo método convencional, o MQL pode penetrar com mais eficiência na interface de corte porque a aplicação do ocorre sob pressão significativamente maior: MQL – 8 bar e Convencional - 0,8 bar. Durante o processo de retificação, esta diferença de pressão entre MQL e convencional ajuda a romper a barreira de ar, quando o rebolo é ligado, uma grande quantidade de ar se move em torno deste, dificultando a aplicação do fluido de corte. Marinescu, *et al.* (2016) explicam que a velocidade de aplicação do fluido de corte na interface de corte deve ser maior ou igual a velocidade de corte, caso contrário, apenas pequenas quantidades de fluido de corte irão chegar na interface rebolo-peça.

A melhor rugosidade superficial (Ra) foi encontrada aplicando-se a técnica convencional sob uma baixa velocidade de avanço 0,25 mm/min porque taxas de avanço mais baixas tendem a gerar menor quantidade de calor, criando pequenas distorções na superfície da peça. Além disso, na cerâmica avançada o mecanismo de corte consiste em fraturas frágeis, ou seja, deformação elástica quase inexistente, formada principalmente por deformação plástica proveniente da propagação contínua de trincas pela região de corte. Consequentemente, maiores valores de velocidade de avanço contribuem para mais trincas e deformações, resultando em maiores valores de rugosidade (Ra). Alguns pesquisadores, como Talon, *et al.* (2022), Lopes, *et al.* (2023b), e Domingues, *et al.* (2023), também estudaram alternativas para mitigar os efeitos perigosos sobre o meio ambiente e a saúde dos funcionários. No entanto, embora todos os estudos mostraram uma melhoria substancial na quantidade de menos impacto na biosfera, melhorar os efeitos mecânicos na superfície da peça tem sido um desafio mais significativo.

Além disso, melhores resultados para rugosidade (Ra) foram encontrados aplicando a técnica MQL na velocidade de avanço de 0,25 mm/min combinada com um jato de limpeza do rebolo aplicado a um ângulo de 30° MQL+JLR 30°. Esses resultados também foram observados por Lopes *et al.* (2019) e Oliveira *et al.* (2012), cerâmica avançada e aço temperado, respectivamente. O ângulo de 30° apresentou melhores resultados somando os dois aspectos: arrasto e pressão em direção à superfície de corte do rebolo, o que resulta em melhor desempenho conjunto entre a remoção de cavacos nos poros. Com isso, a agressividade do grão abrasivo permanece por mais tempo, gerando menos calor e consequentemente menor deformação.

Diferentes rugosidades superficiais (Ra) podem ser necessárias, cada uma em geral relacionada à aplicação, ou seja, o processo de retificação pode ser utilizado tanto para produzir peças com tolerâncias restritas e para outros tipos de componentes com tolerâncias mais abertas. Independentemente da finalidade, a técnica MQL pode ser usada com o jato de limpeza do

rebolo em diversas situações para substituir a técnica convencional porque os valores obtidos estão compatíveis as rugosidades normalmente atingidas pelo processo de retificação. Assim, a figura 27 compara a microscopia confocal de peças cerâmicas avançadas superfícies com e sem aplicação/o de jato de limpeza do rebolo aplicado à técnica MQL sob 0,25 mm/min de velocidade de avanço. Puderam ser verificados, resíduos de abrasivos na superfície retificada com lubrificação convencional (a) e lascamentos nas superfícies retificadas com MQL (b) e (c).

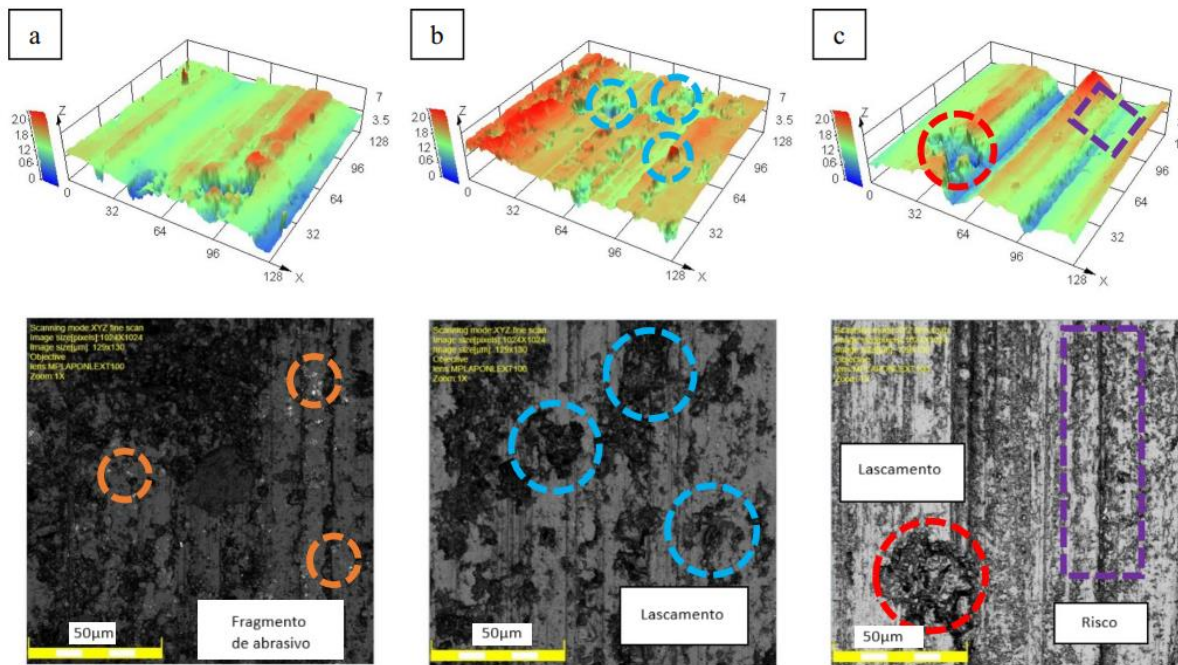


Figura 27: Microscopia confocal: (a) convencional; (b) MQL; (c) MQL + JLR 30°.

Conforme mostrado na figura, o sistema de jato de limpeza do rebolo, quando usado, melhorou a qualidade da superfície da peça. Pelas imagens, nota-se que há mais picos e vales na aplicação da técnica MQL combinada ao sistema de limpeza do rebolo. Além disso, os lascamentos nas superfícies retificadas com o MQL contribuíram para o aumento da rugosidade superficial (R_a).

4.2 CIRCULARIDADE

A figura 28 apresenta os resultados obtidos para o desvio de circularidade em μm , referente à comparação entre as condições de lubrificação e as diferentes velocidades de avanço empregadas.

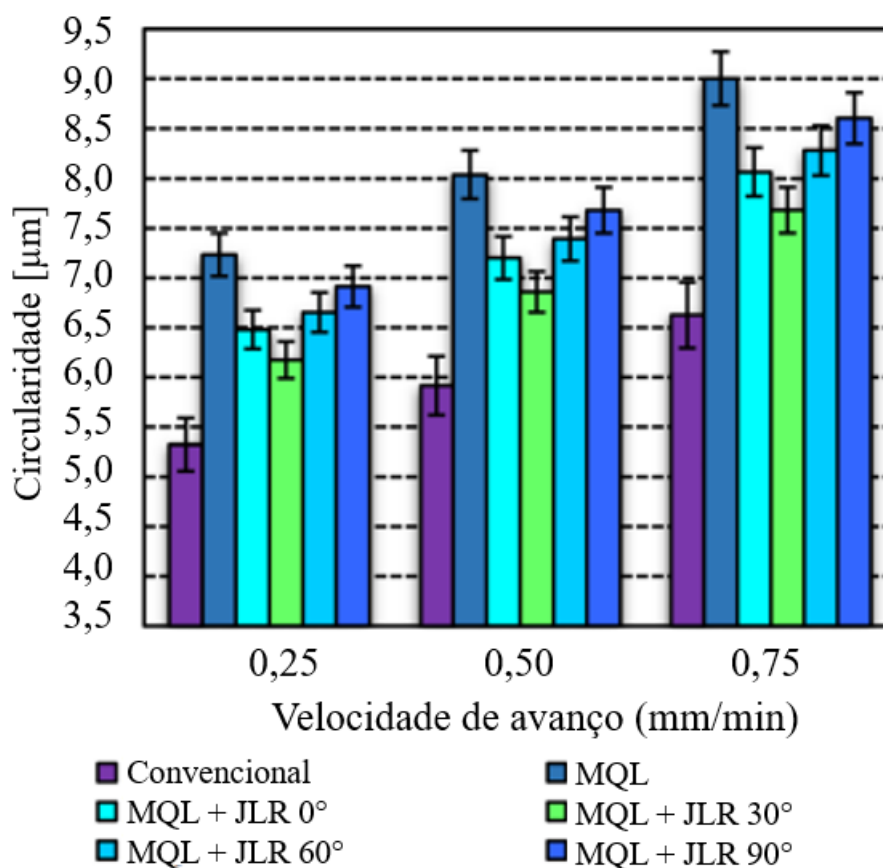


Figura 28: Circularidade nas diferentes técnicas.

Segundo Silva, *et al.* (2020) and Ribeiro, *et al.* (2020), o erro de circularidade pode ser influenciado por problemas relacionados à dilatação térmica da peça devido ao calor mais intenso gerado na interface rebolo-peça durante o corte. No entanto, Callister & Rethwisch (2018) explicam que os materiais cerâmicos são mais estáveis termicamente do que qualquer outro material. A partir disso, a explicação sobre o calor gerado não pode ser aplicada para justificar a deformação na superfície da peça. Entes outros aspectos, segundo Fernandes, *et al.* (2018) and Lopes, *et al.* (2019) funcionaram em ferro fundido dúctil e ferro fundido dúctil austemperado, respectivamente, no qual, à medida que o desgaste era mais intenso, também foram verificados os piores valores de erro de circularidade. Sato, *et al.* (2019) observaram esse fenômeno ao comparar ligantes vitrificados e resinoides durante a retificação do aço AISI D6. Assim, altos valores de erro de circularidade, podem ser atribuídos à alta temperatura gerada durante o processo, que proporciona irregularidades mais intensas na geometria ao rebolo, tornando-se o erro de circularidade ainda mais significativo.

Quando a técnica convencional foi aplicada, foram encontrados valores menores de erro de circularidade, de modo que quando a técnica MQL foi aplicada sem a limpeza do rebolo, ocorreram valores de erro mais significativos. A menor capacidade refrigerante é responsável

pelas altas temperaturas atingidas pela técnica MQL, contribuindo para o entupimento do rebolo, o que ocasionou maior rugosidade e também os lascamentos na superfície retificada, contribuindo para maiores valores de erro de circularidade.

O sistema de jato de limpeza do rebolo é o principal responsável para reduzir o entupimento e fornecer mais refrigeração. Portanto usando o MQL com o jato de limpeza do rebolo a 30°, os resultados de rugosidade (R_a), e o erro de circularidade também foi o melhor, devida a redução do efeito de entupimento, obtendo melhores valores comparados com os demais ângulos de incidência do jato de limpeza.

4.3 DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO

O desgaste diametral do rebolo é uma forma de analisar os impactos econômicos nos processos de retificação, permitindo calcular o consumo da ferramenta e a necessidade de dressagens. Em primeiro lugar, é necessário quantificar o desgaste, e após utilizar esta informação para custear a produção industrial. Podem influenciar o desgaste do rebolo a alta temperatura e aumento da taxa de remoção de material (MALKIN & GUO, 2008; ROWE, 2014).

A Figura 29 apresenta os valores obtidos de desgaste diametral do rebolo para todas as técnicas de lubrificação testadas.

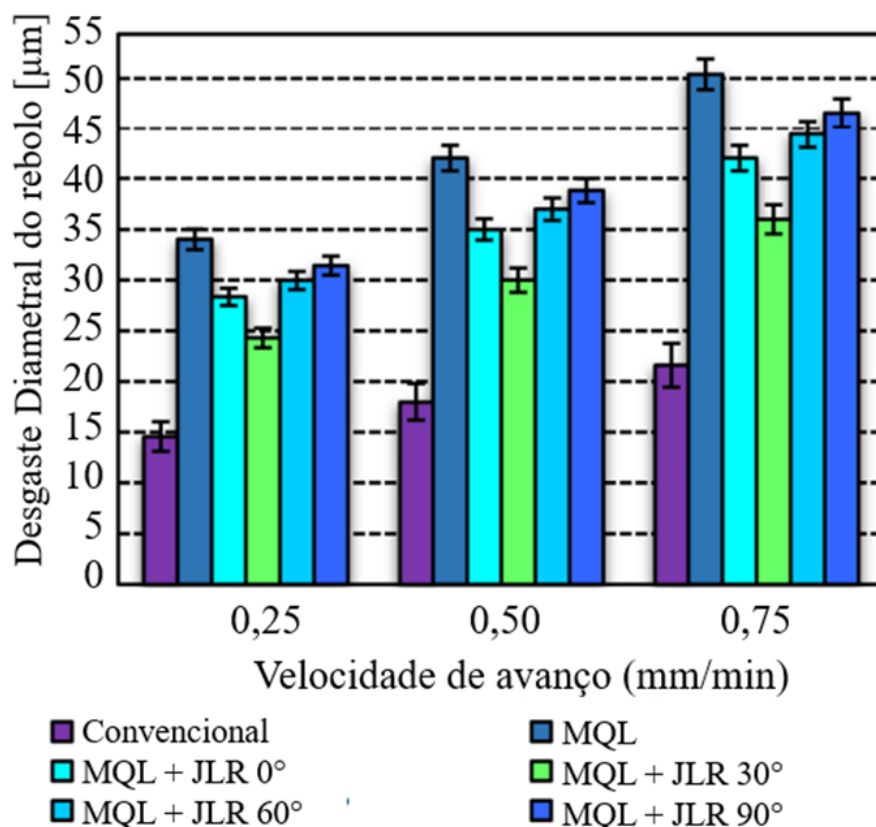


Figura 29: Desgaste diametral do rebolo nas diferentes técnicas.

É possível verificar que o desgaste diametral do rebolo tem tendência semelhante à rugosidade superficial (R_a) e circularidade, para as diferentes técnicas de lubrificação. Esta tendência pode ser explicada pelo fenômeno que ocorre durante o mecanismo de corte do material. Os grãos abrasivos removem o material quando o rebolo entra em contato com a peça e (MARINESCU, *et al.*, 2013). Portanto, o sistema de lubrificação é essencial para a aplicação do fluido de corte a uma velocidade constante. Sem a aplicação adequada, a temperatura aumentará, gerando deformação no primeiro momento na superfície da peça. A seguir, também haverá danos à superfície de corte do rebolo porque a degradação do ligante acontece em uma taxa elevada quando a temperatura do processo não é controlada. Além disso, autores como Malkin & Guo (2008) apresentaram em seus estudos, que observaram que o grão abrasivo e o ligante podem sofrer fratura e deterioração do ligante devido a lubrificação ineficiente.

Embora a técnica convencional tenha apresentado melhores resultados sobre o desgaste diametral do rebolo, isso não significa todas as aplicações da técnica MQL serão inviáveis. Na situação mais grave, a 0,75 mm/min, a técnica MQL apresentou um desgaste diametral do rebolo 133% superior a técnica convencional. Porém, o MQL + JLR 30° apresentou um aumento de 66% em relação ao convencional. A técnica MQL combinada com

a limpeza do rebolo em um ângulo de 30° apresentou melhores resultados entre todas as técnicas testadas, sendo seus valores mais próximos dos analisados no método convencional. Em geral, estes resultados representaram que, embora foram encontrados valores de desgaste superiores a técnica convencional, ainda é possível considerar a técnica MQL uma alternativa com menor impacto ambiental em aplicações com valores de desgaste um pouco superiores. Garcia, *et al.* (2020) and Lopes, *et al.* (2023), ambos apoiam a ideia de que um desgaste mais significativo é mais viável a médio - longo prazo ao observar todas as oportunidades oferecidas para adequação por regras internacionais, certificações e mercado global agregado aos processos com menor geração de resíduos industriais. Caso contrário, um processo industrial que gera menor desgaste do rebolo, certamente exigirão posterior tratamento de resíduos.

No entanto, o que explica o pior desempenho da técnica MQL em outras condições é o fenômeno do entupimento dos poros e consequente aumento de temperatura. Daniel, *et al.* (2020) estudaram a influência da friabilidade dos grãos abrasivos no processo de retificação de ferro fundido dúctil austemperado, que concluiu que a quebra mais significativa do grão abrasivo contribui para maior erro geométrico e dimensional, pode ser visto na rugosidade superficial (R_a) e no erro de circularidade, além apresentar desgaste diametral dos rebolos mais intenso. Diante disto, é possível entender que sempre que há um fenômeno mecânico de maior severidade durante o processo de retificação, como aumento da taxa de avanço ou lubrificação ineficiente, sempre haverá um aumento na taxa de desgaste do rebolo.

4.4 RELAÇÃO G

Avaliando assim a eficiência do processo de retificação, outra forma de quantificar o desgaste diametral do rebolo é analisar quanto material foi removido da peça e quanto foi o desgaste do rebolo. Esta relação adimensional é conhecida como relação G e os resultados alcançados são apresentados na figura 30.

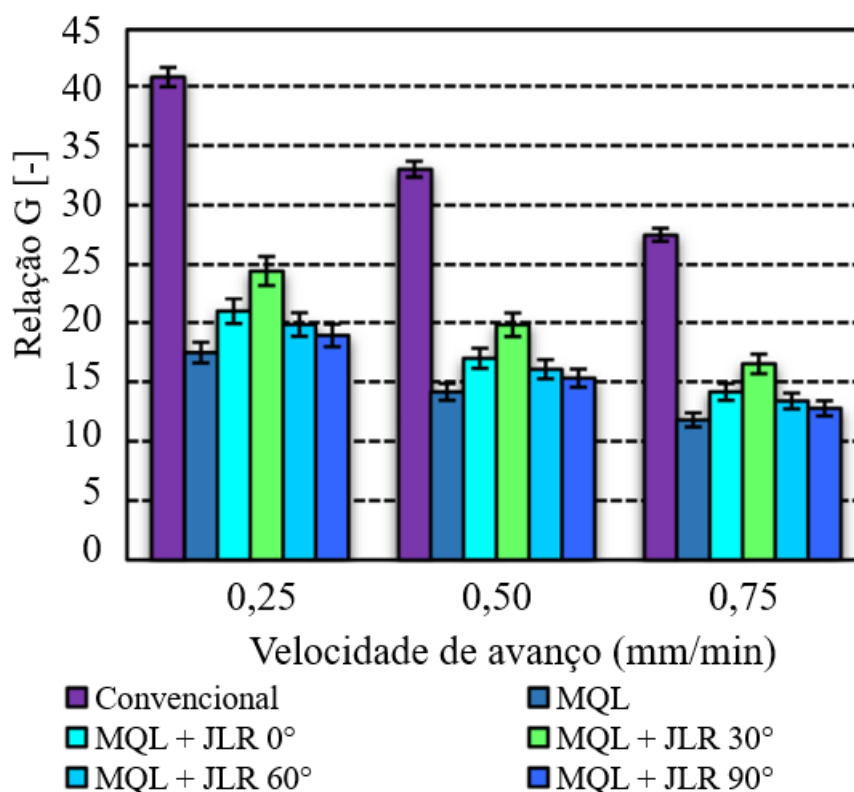


Figura 30: Relação G nas diferentes técnicas.

Segundo King & Hahn, (2012), a técnica de lubrificação empregada no processo pode reduzir o desgaste mecânico e cargas térmicas exercidas no rebolo, diretamente influenciando os valores de desgaste e relação G. A técnica convencional apresentou os melhores resultados de relação G devido à grande quantidade de remoção de calor da interface de corte. Por outro lado, a técnica MQL sem jato de limpeza do rebolo, teve pior desempenho pela menor capacidade de lubrificação e pela contribuição para o entupimento mais significativa. Nestas condições a dissipação de calor torna-se ainda mais complexa, elevando a temperatura da interface e contribuindo para uma deformação mais intensa na superfície de corte do rebolo.

Assim, a técnica MQL associada ao jato de limpeza do rebolo com bocal no ângulo de 30° forneceu valores de relação G 40% maiores que a técnica MQL. Vale ressaltar que a lubrificação convencional alcançou valores de relação G 66% superiores à técnica MQL + jato de limpeza do rebolo a 30°. Nesta perspectiva, o jato de limpeza do rebolo aumentou a eficiência do MQL devido à melhoria do poder refrigerante e limpeza da superfície de corte do rebolo. Além disso, o ângulo de 30° para o jato de limpeza do rebolo foi o mais significativo, facilitando a penetração do ar comprimido na zona de corte e melhorando as condições de retificação.

Lopes, *et al.* (2021) estudaram a retificação do aço AISI 4340 usando um rebolo de óxido de alumínio combinado com o MQL. Neste estudo, os autores concluíram que o jato de limpeza do rebolo reduziu o entupimento do rebolo, mantendo sua capacidade de corte e melhorando a relação G. Em última análise, este parâmetro era apenas ligeiramente superior à técnica convencional.

Finalmente, o desgaste diametral do rebolo e a relação G mostram que a técnica MQL combinada com o sistema de jato de limpeza do rebolo podem fornecer resultados mais próximos de aqueles encontrados pela aplicação da técnica convencional. Desta maneira, torna-se uma técnica alternativa promissora para o processo de retificação mais sustentável aplicado a cerâmicas avançadas.

4.5 POTÊNCIA DE RETIFICAÇÃO

Durante o processo de retificação, monitorando possíveis alterações na superfície retificada da peça pode trazer benefícios para a compreensão dos fenômenos mecânicos e térmicos que ocorrem na interface de corte. Sabe-se que a potência de retificação resulta da combinação dos esforços envolvidos na retificação. Portanto, mais especificamente é calculada pelo produto da força tangencial e da velocidade de corte (MALKIN & GUO, 2008). Como resultado, a potência de retificação é proporcional ao calor gerado.

Os valores de potência de retificação são influenciados por vários fatores, como mecanismo formação de cavacos, esforços de corte e condição de desgaste da ferramenta. A quantidade de energia necessária é proporcional ao desgaste do rebolo. A agressividade dos grãos abrasivos é reduzida pelo entupimento, sendo necessária mais energia para remover o material, aumentando o consumo de energia.

A Figura 31 apresenta os valores de potência de retificação para cada técnica avaliada no estudo.

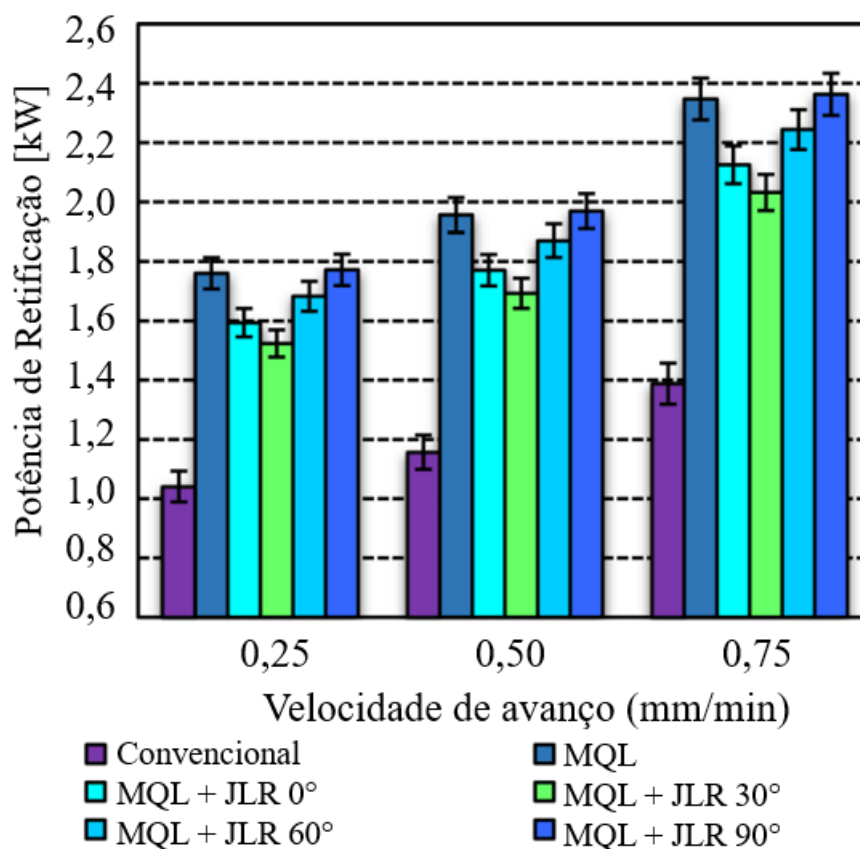


Figura 31: Potência de retificação nas diferentes técnicas.

Observa-se que para as três diferentes velocidades de avanço, a técnica de convencional teve o menor consumo de energia. Quando comparada com os resultados médios da técnica MQL, as diferenças chegaram a 37%.

A vazão do fluido de corte é essencial para a limpeza adequada da superfície de corte do rebolo, mantendo as arestas de corte em condições de trabalho por longos períodos.

Brinksmeier, *et al.* (2015) enfatizam que a lubrificação eficiente acontece quando a dissipação de calor é feita rapidamente, mantendo a interface de corte abaixo de um nível crítico temperatura. Por outro lado, quanto menor a temperatura na interface de corte, maior será a resistência ao cisalhamento do material da peça, causando assim um aumento das forças no processo. Marinescu, *et al.* (2016) afirmam que dependendo de seu desempenho, o poder de resfriamento do fluido de corte influencia significativamente a taxa de remoção de material, as forças de retificação, a temperatura de retificação e o desgaste do rebolo. Além do efeito nos parâmetros do processo, a possível qualidade da superfície e as características subsuperficiais dependem crucialmente do fluido de corte usado. Ribeiro, *et al.*, 2020 explica que sempre que é usada a técnica MQL, a potência de retificação aumenta em função do entupimento do rebolo ser mais significativo. Porém, com a maior temperatura da interface de corte, menor é a tensão

de cisalhamento para cortar o material, mesmo assim, o a potência de retificação aumenta, verificada pelo aumento dos valores de rugosidade superficial (R_a) e erro de circularidade, além disso nota-se um desgaste diametral mais significativo do rebolo.

Portanto, aplicar a técnica MQL é promissor pois foi observado que o sistema com jato de limpeza do rebolo pode mitigar a deficiência de resfriamento, pois entre os vários ângulos testados, os melhores resultados foram obtidos com o bocal em um ângulo de 30° . Além disso, a remoção de material é mais eficiente, pois atinge tangencialmente a superfície do rebolo retirando os cavacos.

Porém, o jato de limpeza do rebolo aplicado nos demais ângulos de inclinação do bocal não apresentaram eficiência na remoção desses cavacos, que se alojaram nos poros, causando algumas diferenças nos resultados.

Além disso, o entupimento é um dos fatores mais graves o aumento da demanda energética. Portanto, apesar de não atingir os valores de energia obtidos com a técnica convencional, a combinação do MQL com jato de limpeza do rebolo a 30° mostrou-se promissora como alternativa viável para aplicação como técnica mais sustentável.

4.6 ANÁLISE DE CUSTOS E POLUIÇÃO

Talvez o custo industrial do processo seja o fator mais significativo na implementação de novas técnicas relacionadas à mitigação dos efeitos químicos dos resíduos e mudanças de mentalidade sobre a pegada ambiental e minimização das causas do efeito estufa. No entanto, a política ambiental atualmente incentivada pela Organização das Nações Unidas (ONU) através dos seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – também conhecidos como Objetivos Globais - foram adotados pelos Estados Unidos em 2015 como um apelo universal à ação para acabar com a pobreza, proteger o planeta e garantir que até 2030 todas as pessoas desfrutem paz e prosperidade (NATIONS, 2015).

Ao abordar o tema processo de retificação, várias dificuldades são encontradas devido à complexidade do processo e todos os parâmetros envolvidos. Entretanto, o constante desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis, relacionadas com processos mais caros, como o fluido de corte, criaram um novo conceito de aplicação em direção a uma eficiência industrial mais significativa. Contudo, esta evolução deve ser constante, uma vez que poluição, doenças e mortes têm sido relacionadas a práticas industriais inadequadas, na maioria das vezes ligadas ao descarte de produtos químicos complexos (KATNA, *et al.*, 2017; TAWAKOLI & AZARHOUSHANG, 2008). Esta mudança de mentalidade começou a acontecer. Uma das formas mais impactantes e eficazes de iniciar uma discussão sobre sustentabilidade e poluição

na indústria é analisando valores por peça. A Figura 32 apresenta os valores do custo por peça para diferentes técnicas de lubrificação.

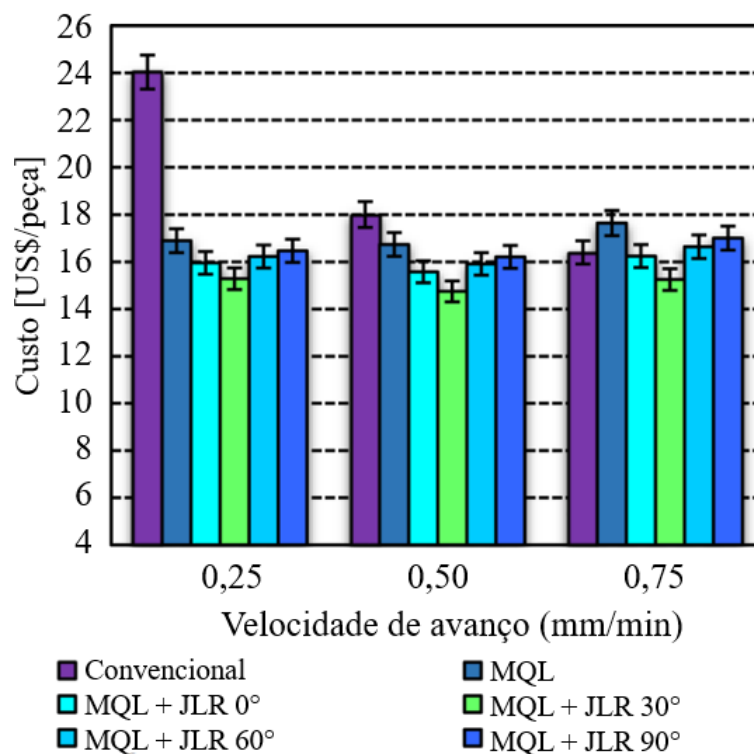


Figura 32: Custos nas diferentes técnicas.

Os resultados mostram ser fundamental apontar que o preço por peça produzida é diretamente proporcional ao tempo de usinagem. Desta forma, as tendências naturais esperadas eram de reduções dos custos com o aumento da velocidade de avanço. No entanto, este comportamento foi observado apenas para a técnica convencional, apresentando redução dos custos em 25% e 10% para 0,50 mm/min e 0,75 mm/min, respectivamente. No entanto, o custo médio das técnicas com MQL permaneceram estáveis, com oscilações menores de 2%. Este comportamento pode ser explicado por ser diretamente vinculado à parcela representativa do total da produção custos, atribuídos ao custo de compra e descarte relacionados aos fluidos de corte e o rebolo. Em seu estudo, Sato, *et al.* (2022) mencionaram que a compra e o descarte de fluidos de corte podem representar 17% dos custos finais do produto quando a técnica convencional é aplicada durante o processo de fabricação.

Uma relação entre o volume do fluido de corte e o custo foi observado durante as análises. A seguir, o tempo efetivo de corte reduz o volume de fluido de corte aplicado ao processo, reduzindo potencialmente o valor do custo final do produto. No entanto, os valores tendem a manter-se quando o é aplicada a técnica MQL, embora a velocidade de avanço aumenta. O desgaste diametral do rebolo aumenta significativamente danificando a superfície

de corte do rebolo pelas altas temperaturas, tornando o custo equilibrado pela redução do fluido de corte.

A diferença mais significativa entre o método convencional e as técnicas MQL foram observadas sob 0,25 mm/min de velocidade de avanço, correspondente a cerca de 32% da economia, usando esta nova abordagem. Portanto, o jato de limpeza do rebolo tem uma representação mais acentuada nos resultados combinada com um bocal inclinado a 30°, que proporcionou melhor remoção de cavacos na superfície de corte do rebolo, aumentando sua vida útil.

Além dos conceitos relacionados para a aplicação sustentável, outra ideia ganhou adeptos, ligando a produção industrial à conceitos de minimização do efeito estufa através do cálculo da pegada de carbono do processo. Os valores encontrados para esta análise são mostrados na figura 33.

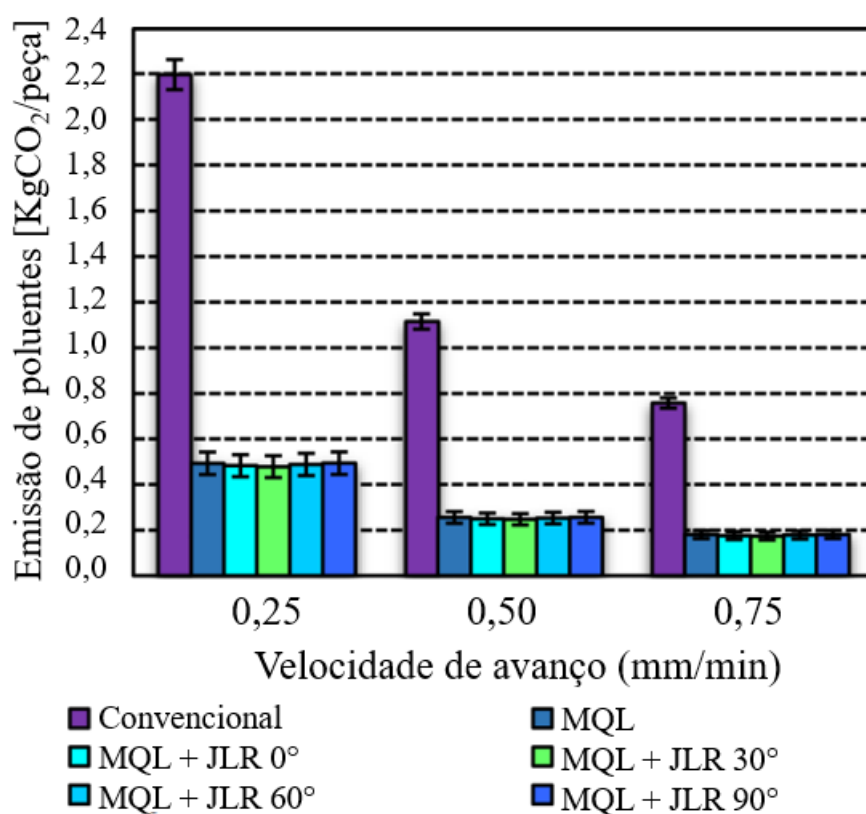


Figura 33: Emissão de Poluentes nas diferentes técnicas.

A emissão de carbono refere-se à liberação de gases de efeito estufa gases na atmosfera, principalmente dióxido de carbono (CO_2), mas outras substâncias gasosas são tão ou mais nocivas, como óxido nitroso (N_2O), hexafluoreto de enxofre (SF_6), e metano (CH_4). Os gases de efeito estufa retêm parte da radiação solar que atinge o planeta, tornando-o mais quente. O fenômeno ocorre naturalmente, mas o volume de gases resultantes da interferência

humana no meio ambiente, fizeram com que a temperatura da Terra aumentasse de forma preocupante. O aquecimento global tem inúmeras consequências, por exemplo, aumento de eventos climáticos extremos, tsunamis, períodos prolongados de seca e inundações fora de época. Em Além disso, o aumento das doenças respiratórias tem sido considerado uma das novas consequências. No entanto, o dióxido de carbono é justamente o gás que mais contribui para este cenário porque embora as queimadas e o desmatamento tenham aumentado sua geração, a maior parte das emissões ainda é consequência de atividades industriais (DAVIM, 2013; HAGEDORN, *et al.*, 2022; WOOD, *et al.*, 2022).

Observou-se redução expressiva utilizando a técnica MQL, atingindo 78% de emissão de CO₂ quando foi utilizada uma velocidade de avanço de 0,25 mm/min. Esta melhoria está relacionada ao volume de fluido de corte utilizado, uma vez que os produtos químicos necessários para manter o fluido de corte também foram reduzidos, como bactericidas e fungicidas, responsáveis por muitas das emissões. Vale a pena mencionar que o sistema de jato de limpeza do rebolo praticamente não afeta as emissões de carbono. Pelo contrário, a técnica beneficia o custo do processo, como rugosidade da superfície (Ra) e erro de circularidade. Esse benefício se deve a baixa influência química no fluido de corte porque não ficam armazenados no tanque, como na técnica convencional, por isso não requer vários agentes químicos para controlar as propriedades e o pH dos fluidos de corte, apresentando mais benefícios físicos para o processo industrial e ainda mais significativamente para o meio ambiente e a saúde dos funcionários.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos durante a retificação da cerâmica avançada, foi possível avaliar o desempenho de diferentes técnicas com grande potencial para substituir a técnica convencional em algumas operações de retificação. Em breve, novos estudos poderão fornecer novas propostas, com capacidade de estimular ainda mais a aplicação da produção sustentável. Através da análise dos resultados, pode-se concluir que:

- ✓ Os desvios dimensionais que obtiveram a melhor precisão foram relacionadas à aplicação da técnica convencional, cuja rugosidade superficial e erro de circularidade apresentaram os menores valores. Embora o MQL não teve os melhores resultados, com sistema de limpeza do rebolo aplicado a 30° proporcionou os resultados mais próximos da lubrificação convencional, mostrando-se promissória por menor impacto ambiental e à saúde dos funcionários.

- ✓ A relação G e o desgaste do rebolo foram mais impactados pelo MQL devido aos fluidos de corte e sua capacidade de resfriamento aplicadas em cada técnica. Isto observou-se que o desgaste mais significativo ocorreu durante a aplicação da técnica MQL porque os fluidos de corte utilizados neste sistema, não podem remover o calor como a técnica convencional. No entanto, esta lacuna foi resolvida com um jato de limpeza do rebolo em ângulo de 30°, apresentando estabilidade em todos os avanços testados.

- ✓ A técnica convencional apresentou a menor potência de retificação, apresentando um valor 37% menor que a técnica MQL. No entanto, a aplicação do sistema de jacto de limpeza de jantes diminui esta diferença para perto de 30%, tornando-o viável. Assim, o fato de apresentar maiores valores de potência de retificação podem indicar mais entupimento no rebolo superfície de corte por maior geração de calor. Se considerar, apenas a potência de retificação com a rugosidade (Ra) e circularidade, o sistema de jato de limpeza 30° proporciona resultados que permitem sua aplicação.

- ✓ Realizando as análises de custo de retificação, a técnica MQL + JLR apresentou valores mais baixos por peça, enquanto a técnica convencional mostrou-se a mais cara em todas as velocidades de avanço. O fluido de corte, considerando: compra, manutenção e descarte, contribui para este custo mais elevado, além de trazer maior impacto ao meio ambiente.

- ✓ As análises de poluição por CO₂ fornecem os melhores resultados a aplicação do MQL, sendo esta técnica responsável por quase emitir 5 × menos poluentes de CO₂ na atmosfera, tornando-se uma alternativa verde para evitar o efeito estufa, além de contribuir com o meio ambiente e com a saúde dos colaboradores rumo a um planeta melhor.

✓ Portanto, a quantidade mínima de lubrificação (MQL) sistema não conseguiu superar o sistema de lubrificação convencional, pelo fato de promover um menor resfriamento e agravar o entupimento do rebolo. No entanto vale ressaltar que a técnica MQL + JLR 30°, produziu resultados mais próximos ao do método convencional. Considerando isso, para trabalhos futuros, sugere-se discutir medidas que possam ser tomadas para melhorar limpeza dos rebolos associada ao MQL para métodos mais sustentáveis.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de reforçar as evidências do aprimoramento da lubrificação MQL e permitir a ampliação sua utilização nas operações de retificação dentro das indústrias algumas sugestões são apresentadas:

- ✓ Verificar o desempenho do método proposto na retificação em altas velocidades de corte;
- ✓ Investigar se a técnica proposta apresenta bons resultados em diferentes tipos de materiais como compósitos e ligas de titânio;
- ✓ Verificar se o meio de lubrificação proposto apresenta também um bom desempenho em outras variações de processos de retificação como: a retificação interna, a retificação *centerless* e a retificação plana.

7. RELATO

O artigo intitulado “Reducing carbon footprint in grinding: exploring green manufacturing to mitigate CO₂ emission from cutting fluids”, foi publicado na revista International Journal of Advanced Manufacturing Technology (ISSN: 1433-3015), cujo fator de impacto é de 3,5632), em 22 de novembro de 2023 divulgando os resultados obtidos nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABELLAN-NEBOT, J.V., ROGERO, M.O. **Sustainable machining of molds for tile industry by minimum quantity lubrication.** Journal of Cleaner Production 240:118082, 2019.
- ALBERDI, R., SANCHEZ J.A., POMBO, I., ORTEGA, N., IZQUIERDO, B., PLAZA, S., BARRENETXEA, D. **Strategies for optimal use of fluids in grinding.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 51, n. 6, p. 491–499, 2011.
- ALFARES, M., ELSHARKAWY, A. **Effect of grinding forces on the vibration of grinding machine spindle system.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40p. 2003–2030, 2009.
- AN, H., RAZZAQ A., NAWAZ, A., NOMAN, S.M., KHAN, S.A.R. **Nexus between green logistic operations and triple bottom line: evidence from infrastructure-led Chinese outward foreign direct investment in Belt and Road host countries.** Environmental Science and Pollution Research, 28(37), 51022–51045, 2021.
- ANDERSON, D., WARKENTIN, A., BAUER, R. **Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding.** Journal of materials processing technology, 204, p. 269–278, 2008.
- ATTANASIO, A., GELFI, M., GIARDINI, C., REMINO, C. **Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear.** Wear, 260, p.333–338, 2006.
- AURICH, J. C.,HERZENSTIEL, P., SUDERMANN, H.,MAGG, T.**High -performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern.**CIRPAnnals - Manufacturing Technology. Vol. 57, p.357-362, 2008.
- BADGER, J. **Factors affecting wheel collapse in grinding.** CIRP Annals, V.58, n1, p.307-310, 2009

BAI, X., JIANG, J., LI, C., DONG, L., ALI, H.M., SHARMA, S. **Tribological performance of different concentrations of Al₂O₃ nanofluids on minimum quantity lubrication milling.** Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition) 36(1):1–12, 2023.

BALDO, E. D. **Redução do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com auxílio da emissão acústica.** Dissertação de Mestrado - UNICAMP, Campinas, 1994.

BARCZAK, L. M.; BATAKO, A. D. L.; MORGAN, M. N. **A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 50, n. 11, p. 977–985, 2010.

BARTZ, W.J. **Lubricants and the environment,** Tribology International, 31, p. 35–47, 1998.
BIGERELLE, M., HAGEGE, B., EL MANSORI, M. **Mechanical modeling of micro-scale abrasion in superfinish belt grinding.** Tribology International, Vol. 41, p. 992–1001, 2008.

BRINKSMEIER, E., HEINZEL, C., WITTMANN, M. **Friction, Cooling and Lubrication in Grinding.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 48, p. 581–598, 1999.

BRINKSMEIER, E., MEYER, D., HUESMANN-CORDES, A.G., HERRMANN, C. **Metalworking fluids - mechanisms and performance.** CIRP Ann Manuf Technol 64(2):605–628, 2015.

BYRNE, G., SCHOLTA, E. **Environmentally clean machining processes—a strategic approach.** CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 42, p. 471–474, 1993.

CALLISTER, W.D., RETHWISCH, D.G. **Materials science and engineering: an introduction,** vol 9. Wiley, New York, 2018.

CAMERON, A., BAUER, R.; WARKENTIN, A. **An investigation of the effects of wheel cleaning parameters in creep-feed grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, V. 50, p. 126–130, 2010.

CHOI, T.J., SUBRAHMANYA, N., LI, H., SHIN Y.C. **Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.48, p. 61–72, 2008.

CUI, X., LI, C., YANG, M., LIU, M., GAO, T., WANG, X., SAID, Z., SHARMA, S., ZHANG, Y. **Enhanced grindability and mechanism in the magnetic traction nanolubricant grinding of Ti-6Al-4 V.** Tribology International 186:108603, 2023.

DANIEL, D.M., ÁVILA, B.N., GARCIA, M.V., LOPES, J.C., RIBEIRO, F.S.F., MELLO, H.J., SANCHEZ, L.E.A., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Grinding comparative between ductile iron and austempered ductile iron under CBN wheel combined to abrasive grains with high and low friability.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 109(9–12):2679– 2690, 2020.

DAVIM, J.P. **Green manufacturing processes and systems.** Springer, 2013.

DEMETER, E.C., HOCKENBERGER, M.J. **The application of tool path compensation for the reduction of clamping-induced geometric error.** International Journal of Production Research, v.12, p. 35, 1997.

DEMIRBAS, E., KOBAYASHI, M. **Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes.** Process Saf Environ Prot 105:79–90, 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.** Springer Science-Business Media, LLC 2008.

DHAR, N., ISLAM, S., KAMRUZZAMAN, M. **Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness in Turning AISI-4340 Steel.** Journal of Materials Processing Technology, 172, p. 299-304, 2006.

DINESHI, G., THAKUR, B., RAMAMOORTHY, L., VIJAYARAGHAVAN, **Investigation and optimization of lubrication parameters in high speed turning of superalloy Inconel 718**, Int Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 50, p. 471–478, 2010.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artliber Editora Ltda., Campinas, SP, Brasil, 9ª Edição, 2014.

DOMINGUES, B.B., RODRIGUEZ, R.L., SOUZA, G.G., ÁVILA, B.N., RODRIGUES, M.S., RIBEIRO, F.S.F., RODRIGUES, A.R., SANCHEZ, L.E.A., BIANCHI, E.C., LOPES J.C. **Eco-friendly thinking toward mitigating the greenhouse effect applied to the alumina grinding process**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 124, 2171–2183, 2022.

DUAN, Z., LI C., ZHANG, Y., YANG, M., GAO, T., LIU, X., LI R., SAID, Z., DEBNATH, S., SHARMA, S. **Mechanical behavior and semiempirical force model of aerospace aluminum alloy milling using nano biological lubricant**. Frontiers of Mechanical Engineering 18(4)1–15, 2023.

EBBRELL, S., WOOLLEY, N.H., TRIDIMAS, Y.D., ALLANSON, D.R., ROWE, W.B. **Effects of cutting fluid application methods on the grinding process**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v.40, p. 209–223, 2000.

ELECTRICITY PRICES. https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/ 2020, Acesso em 06 de maio de 2023.

FERNANDES, L.M., LOPES, J.C., VOLPATO, R.S., DINIZ, A.E., OLIVEIRA, R.F.M., AGUIAR, P.R., MELLO, H.J., BIANCHI, E.C. **Comparative analysis of two CBN grinding wheels performance in nodular cast iron plunge grinding**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 98(1–4):237–249, 2018.

FRATILA, D., CAIZAR, C. **Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg₃**. Journal of Cleaner Production, v.19, p.640–645, 2011.

FUJITA, H.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; SANCHEZ, L. E.; DA SILVA JR. L. E. **Contribuição ao estudo da retificação abrasiva de materiais cerâmicos.** Revista Cerâmica, v. 52, nº 324, p. 269-275. 2006.

GARCIA, M.V., LOPES, 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 257:120376, 2020.

GRAF, W. **Cylindrical Grinding.** WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 87p., 2004.

HADAD, M. **An experimental investigation of the effects of machining parameters on environmentally friendly grinding process.** Journal of Cleaner Production, v. 108, p. 217–231, 2015.

HAFENBRAEDL, D., MALKIN, S. **Tecnologia ambientalmente correta para retificação cilíndrica interna.** Revista Máquinas & Metais, Vol. 37, nº 426, p. 40-55, julho 2001.

HAGEDORN, W., JÄGER, S., WIECZOREK, L., KRONENBERG, P., GREIF, K., WEBER, S., ROETTGER, A. **More than recycling – the potential of the circular economy shown by a case study of the metal working industry.** Journal of Cleaner Production 377: 134439, 2022.

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

HECKER, R.L., LIANG, S.Y., WU, X.J., **Grinding force and power modeling based on chip thickness Analysis.** International Journal of Advanced Manufacuturing Technology, v.33, p.449-459, 2007.

HEISEL, U., LUTZ, D., WASSMER, R., WALTER, U. **The Minimum Quantity Lubricant technique and its application in the cutting process.** Machines and metals magazine, Brazil, No.386, Febr., 1998, p. 22-38.

HITCHCOX, A. **Determine the cost of compressed air for your plant.** <https://www.hydraulicspneumatics.com/technology/es/air-compressors/article/21884932/determine-the-cost-ofcompressed-air-for-your-plant>. 2015. Acesso em 06 de maio de 2023.

HOLESOVSKY, F., HRALA, M. **Integrity of ground cylindrical surface.** Journal of Materials Processing Technology, v. 153-154, 10, p. 714-721, 2004.

HONG, S.Y., BROOMER, M. **Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel.** Clean Products Process, 2, p. 157–166, 2000.

HOWELL, J.K., LUCKE, W.E., WHITE, E.M. **Health and Safety Aspects in the Use of Metalworking Fluids**, by Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

HOWES, T., MINDEK R. **Creep-Feed Exam.** Cutting Tool Engineering, v. 48, p.73-80, 1996.

HUBERTUS, R. **Current Classification of Ceramic Materials. In: Extrusion in Ceramics.** Mühlacker: Springer Berlin Heidelberg, p. 35-57, 2007.

HWANG, T. W., EVANS, C. J., MALKIN, S. **An Investigation of High Speed Grinding with Electroplated Diamond Wheels.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 49, p. 245-248, 2000.

IRANI, R.A., BAUER, R.J., WARKENTIN, A. **A review of cutting fluid application in the grinding process.** International Journal of Machine Tools and Manufacture 45(15):1696–1705, 2005.

JACKSON, M.J., DAVIS, C.J., HITCHINER, M.P., MILLS, B. **High-speed grinding with CBN grinding wheels applications and future technology.** Journal of Materials Processing Technology, 110, p. 78-88, 2001.

JACKSON, M.J., KHANGAR, A., CHENC, X., ROBINSON, G.M., VENKATESH, V.C., DAHOTRE N.B. **Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels.** Journal of Materials Processing Technology, 185, p.17-23, 2007.

JAMSHIDI, H., BUDAK, E. **On the prediction of surface burn and its thickness in grinding processes.** CIRP Ann 70(1):285–288, 2021.

JAVARONI, R.L., LOPES, J.C., DINIZ, A.E., GARCIA, M.V., RIBEIRO, F.S.F., TAVARES, A.B., TALON, A.G., SANCHEZ, L.E.A., MELLO, H.J., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Improvement in the grinding process using the MQL technique with cooled wheel cleaning jet.** Tribology International 152:106512, 2020.

JAVARONI, R.L., LOPES, J.C., SATO, B.K., SANCHEZ, L.E.A., MELLO, H.J., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Minimum quantity of lubrication (MQL) as an eco-friendly alternative to the cutting fluids in advanced ceramics grinding.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 103(5– 8):2809–2819, 2019.

JEDRZEJEWSKI J., MODRZYCKI W. **Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools.** Proc. 32nd Int. MATADOR Conf, Manchester, UK, 1997.

KATNA, R., SINGH, K., AGRAWAL, N., JAIN, S. **Green manufacturing—performance of a biodegradable cutting fluid.** Materials and Manufacturing Processes 32(13):1522–1527, 2017.

KHAN, I.S., AHMAD, M.O., MAJAVA, J. **Industry 4.0 and sustainable development: a systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives.** Journal of Cleaner Production 297:126655, 2021.

KING, R.I., HAHN, R.S. **Handbook of modern grinding technology.** Springer Science & Business Media, 2012.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lappinghis.** 1.ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

KLOCKE, F., BECK, T., EISENBLÄTTER, G., LUNG, D. **Minimal quantity lubrication (MQL): motivation, fundamentals.** In: 12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrication, Technische Akademie Esslingen, 14p. 2000.

KLOCKE, F., KUCHLE, A. **Cutting fluids, manufacturing processes 1**, Ed.. Springer Berlin Heidelberg, pp. 219–236, 2011.

KRAMER, N. **In-Process Identification of Material-Properties by Acoustic Emission Signals**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.56, p. 331-334, 2007.

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

LAKHDAR, Y., TUCK, C., BINNER, J., TERRY, A., GOODRIDGE, R. **Additive manufacturing of advanced ceramic materials**. Progress in Materials Science 116:100736, 2021.

LEE, S.W., LEE, Y.C., JEOND, H.D., CHOI, H.Z. **The effect of high pressure air jet on form accuracy in slot grinding**. Journal of Materials Processing Technology, 128, p.67-72, 2002.

LIAO, Y. S., LUO, S. Y., YANG, T. H. **A thermal model of the wet grinding process**. Journal of Materials Processing Technology, v. 101, p. 137-145, 2000.

LIU, M., LI, C., YANG, M., GAO, T., WANG, X., CUI, X., ZHANG, Y., SAID, Z., SHARMA, S. **Mechanism and enhanced grindability of cryogenic air combined with biolubricant grinding titanium alloy**. Tribology International 187:108704, 2023.

LIU, M., LI, C., ZHANG, Y., YANG, M., GAO, T., CUI, X., WANG, X., XU, W., ZHOU, Z., LIU, B., SAID, Z., LI, R., SHARMA, S. **Analysis of grinding mechanics and improved grinding force model based on randomized grain geometric characteristics**. Chinese Journal of Aeronautics 36(7):160–193, 2023b.

LOPES, J.C., ÁVILA, B.N., RODRIGUES, M.S., GARCIA, M.V., RIBEIRO, F.S.F., MELLO, H.J., SANCHEZ, L.E.A., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Grinding comparative analysis between diferent proportions of water-oil applied to MQL technique and industrial production cost towards a green manufacturing**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021.

LOPES, J.C., CARVALHO, G.A., MORETTI, G.B., ÁVILA, B.N., RODRIGUES, M.S., GARCIA, M.V., RIBEIRO, F.S.F., RODRIGUES, A.R., SANCHEZ, L.E.A., BIANCHI, E.C. **Sustainable thinking toward to industry's future combined with new knowledge on greenhouse effect mitigation generated by the grinding process.** Journal of Cleaner Production 386:135810, 2023.

LOPES, J.C., FERNANDES, L., GARCIA, M.V., MORETTI, G.B., MORAES, D.L., RIBEIRO, F.S.F., SANCHEZ, L.E.A., OLIVEIRA, R.F.M., MELLO, H.J., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Performance of austempered ductile iron (ADI) grinding using diluted oil in MQL combined with wheel cleaning jet and diferent CBN grains friability.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 107(3–4):1805–1818, 2020.

LOPES, J.C., GARCIA, M.V., VALENTIM, M., JAVARONI, R.L., RIBEIRO, F.S.F., SANCHEZ L.E.A., MELLO H.J., AGUIAR P.R., BIANCHI E.C. **Grinding performance using variants of the MQL technique: MQL with cooled air and MQL simultaneous to the wheel cleaning jet.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 105(10):4429–4442, 2019a.

LOPES, J.C., GARCIA, M.V., VOLPATO, R.S., HAMILTON, S., EDUARDO, F., BIANCHI, E.C. **Application of MQL technique using TiO₂ nanoparticles compared to MQL simultaneous to the grinding wheel cleaning jet.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 106(5–6):2205– 2218, 2019b.

LOPES, J.C., MARTIN,I FERNANDES L., DOMINGUES, B.B., CANARIM, R.C., FONSECA ,M.P.C., SANCHEZ L.E.A., OLIVEIRA, R.F.M., MELLO H.J., AGUIAR P.R., BIANCHI E.C. **Efect of CBN grain friability in hardened steel plunge grinding.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 103(1–4):1567–1577, 2019c.

LOPES, J.C., RIBEIRO, F.S.F., LINKEVICIUS, S.A.S., RODRIGUES, M.S., SOUZA, R.R., SATO, B.K., MORAES, D.L., GARCIA, M.V., SANCHEZ, L.E.A., BIANCHI, E.C. **Manufacturing process linked to the MQL compared to food lubrication applied to the grinding of VP50IM steel using black silicon carbide wheel.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 120(5):4179–4190, 2022.

LOPES, J.C., VENTURA, C.E.H., FERNANDES, L.M., TAVARES, A.B., SANCHEZ, L.E.A., MELLO, H.J., AGUIAR, P.R., BIANCHI E.C. **Application of a wheel cleaning system during grinding of alumina with minimum quantity lubrication.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 102(1–4):333–341, 2019d.

LOPES, J.C., VENTURA, C.E.H., RODRIGUEZ, R.L., TALON, A.G., VOLPATO, R.S., SATO, B.K., MELLO, H.J., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Application of minimum quantity lubrication with addition of water in the grinding of alumina.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 97(5–8):1951–1959, 2018.

MACHADO, A. R., DINIZ, A. E., **Advantages and disadvantages of the use of the cutting fluids.** Machining Congress 2000, São Paulo, SP, Brazil, 2000.

MALKIN, S., GUO, C. **Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives** (2a ed). Industrial Press Inc, 2008.

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

MAMALIS, A. G.; KUNDRACK, J.; GYANI K.; HORVATH, M. **On the Precision Grinding of Advanced Ceramics.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 20, n° 4, p. 255-258. 2002.

MARINESCU, I.D., DOI, T.K., ECKART, U. **Handbook of ceramics grinding and polishing.** (2nd ed.), Elsevier, 2015.

MARINESCU, I.D., HITCHINER, M.P., UHLMANN, E., ROWE, W.B., INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels.** CRC Press, 2016.

MARINESCU, I.D., ROWE, W.B., DIMITROV, B., OHMORI, H. **Tribology of abrasive machining processes.** Elsevier, 2013.

MATHIYAZHAGAN, K., VIMAL, K., KUMAR, H., RAMESH, A., AGARWAL, V. **Lean and green manufacturing.** Springer, 2022.

MAYER, J. E., FANG G. P. **Diamond grinding of silicon nitride ceramic. Machining of advanced ceramics.** Conf. NIST, p. 171-183, 1993.

MORETTI, G.B., ÁVILA, B.N., LOPES, J.C., MORAES, D.L., GARCIA, M.V., RIBEIRO, F.S.F., MELLO, H.J., SANCHEZ, L.E.A., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Industrial manufacturing linked to the mechanical and economic viewpoint of the mold steel grinding process using aluminum oxide wheel.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 117(9–10):2655– 2666, 2021.

NATIONS, U. **The 17 sustainable development goals.** [https:// sdgs.un.org/goals](https://sdgs.un.org/goals), 2015

NGUYEN, T.A., BUTLER, D.L. **Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.45, p. 1321–1328, 2005.

NOUREDINE, B. **A technology enabler for green machining: minimum quantity lubrication (MQL).** Journal of Manufacturing Technology Management 21(5):556–566, 2010.

OBIKAWA, T., KAMATA, Y., SHINOZUKA, J. **High-speed grooving with applying MQL.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 46, p. 1854–1861, 2006.

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 212(12):2559– 2568, 2012.

PAWLAK, Z., KLAMECKI, E.B., RAUCKYTE, T., SHPENKPV, P.G., KOKOWSKI, A. **The Tribochemical and Micellar Aspects of Cutting Fluids.** Tribology International, 38, 1, 2004.

PUSAVEC, F., KRAMAR, D., KRAJNIK, P., KOPAC, J. **Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies.** Journal of Cleaner Production 18(12):1211–1221, 2010.

RABIEI, F., RAHIMI, A.R., HADAD, M.J., ASHRAFIJOU, M. **Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization.** Journal of Cleaner Production, v. 86, p. 447–460, 2015.

RAMESH, K., HUANG, H. **The Effects of Grinding Wheel Speed on Burr Creation and Surface Quality.** Machining Technology Group, Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapore, 2003.

RASIM, M; MATTFELD, P; Klocke, F. **Analysis of the grain shape influence on the chip formation in grinding.** Journal of Materials Processing Technology, v. 226, p. 60- 68, 2015.

RIBEIRO, F.S.F., LOPES, J.C., GARCIA, M.V., SANCHEZ, L.E., MELLO, H.J., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Grinding performance by applying MQL technique: an approach of the wheel cleaning jet compared with wheel cleaning Tefon and Alumina block.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 107(11–12):4415–4426, 2020.

RIBEIRO, F.S.F., LOPES, J.C., GARCIA, M.V., SANCHEZ, L.E.A., MELLO, H.J., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Grinding assessment of workpieces with diferent interrupted geometries using aluminum oxide wheel with vitrified bond.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 108(3):931–941, 2020.

RODRIGUEZ, R.L., LOPES, J.C., HILDEBRANDT, R.A., PEREZ, R.R.V., DINIZ, A.E., SANCHEZ, L.E.A., RODRIGUES, A.R., MELLO, H.J., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface.** Journal of Materials Processing Technology 271(October 2018):357–367, 2019.

RODRIGUEZ. R.L., LOPES, J.C., GARCIA, M.V., RIBEIRO, 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+W CJ technique in AISI 4340 steel grinding for cleaner and greener production.** Journal of Cleaner Production 124670, 2020.

ROWE, W.B. **Principles of modern grinding technology.** (2nd ed.). William Andrew, 2014.

SADEGHI, M.H., HADDAD M.J., TAWAKOLI T., EMAMI M. **Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.44, p. 487–500, 2009.

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

SANCHEZ, J.A., POMBO, I., ALBERDI, R., IZQUIERDO, B., ORTEGA, N., PLAZA, S., MARTINEZ-TOLEDANO, J. **Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology**. Journal of Cleaner Production 18, p. 1840 – 1849, 2010.

SATO, B.K., LOPES, J.C., DINIZ, A.E., RODRIGUES, A.R., HAMILTON, E., BIANCHI, E.C. **Toward sustainable grinding using minimum quantity lubrication technique with diluted oil and simultaneous wheel cleaning**. Tribology International 147:106276–106276, 2020.

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 330(September 2021):129673, 2022.

SATO, B.K., LOPES, J.C., RODRIGUEZ, R.L., GARCIA, M.V., RIBEIRO, F.S.F., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Eco-friendly manufacturing towards the industry of the future with a focus on less cutting fluid and high workpiece quality applied to the grinding process**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 113(3–4):1163–1172, 2021.

SATO, B.K., RODRIGUEZ, R.L., TALON, A.G., LOPES, J.C., MELLO, H.J., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Grinding performance of AISI D6 steel using CBN wheel vitrified and resinoid bonded**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 105(5–6):2167–2182, 2019.

SHASHIDHARA, Y.M., JAYARAM, S.R. **Vegetable oils as a potential cutting fluid - an evolution**. Tribology International 43(5):1073–1081, 2010.

SHAW, M.C. **Energy Conversion in Cutting and Grinding**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.45, p. 101-104, 1996.

SHILLOR, M., BABER, G.C, JEN, T., WI, M., **Thermal Analysis of the Grinding**. Process, Mathematical and Computer Modeling, 39, p. 991-1003, 2004.

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. **Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 57, p. 83–101, 2012.

SILVA NETO, J. F. DA. **Estudo experimental da remoção, por jato de ar comprimido, de detritos na superfície de corte de rebolo diamantado durante a retificação da alumina refrigerada pela técnica MQL**. 94 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2012.

SILVA, A.E., LOPES J.C., DANIEL, D.M., MORAES, D.L., GARCIA, M.V., RIBEIRO, F.S.F., MELLO, H.J., SANCHEZ, L.E.A., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Behavior of austempered ductile iron (ADI) grinding using diferent MQL dilutions and CBN wheels with low and high friability**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 107(11–12):4373–4387, 2020.

SILVA, L.R., BIANCHI, E.C., FUSSE, R.Y., CATAI, R.E., FRANC, T.V., AGUIAR, P.R. **Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant –MQL in grinding**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 47, p. 412–418, 2007.

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 256:103287, 2020.

SINHA, M. K., SETTI, D., GHOSH, S. RAO, P. V. **An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718**. Journal of Manufacturing Processes, v. 21, p. 124-133, 2016.

SINOT, O., CHEVRIER, P., PADILLA, P. **Experimental simulation of the efficiency of high speed grinding wheel cleaning**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 46, p.170–175, 2006.

SKERLOS, S., HAYES, K. **Vegetable-based Cutting Fluids: A New Dimension in Research.**2003.

SOARES, D.D., OLIVEIRA, J.F.G. **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais.** Revista Máquinas e metais, Ano XXXVIII, nº 436, p. 140- 157maio, 2002.

SOKOVIC M., MIJANOVIC K. **Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes.** Journal of Materials Processing Technology, 109, p. 181-189, 2001.

SREEJITH P.S., NGOI, B.K.A. **Dry machining: Machining of the future.** Journal of Materials Processing Technology, 101, p. 287-291, 2000.

STÄBLER, D., SCHÖNWALD, M., SEFRIN, H., WOLF, M. **Hazard Evaluation at the Dry Tooling of Metallic Materials.** Final Project Report of the Süddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft. 2003.

STANFORD, M., LISTER, P. M., KIBBLE,K. A., MORGAN, C. **Investigation into the use of gaseous and liquid nitrogen as a cutting fluid when turning BS 970-80A15 (En32b) plain carbon steel using WC-Co uncoated tooling.** Journal of Materials Processing Technology (Elsevier). 2007.

SUDA, S., YOKOTA, H., INASAKI, I., WAKABAYASHI, T. **A Synthetic Ester as an Optimal Cutting Fluid for Minimal Quantity Lubrication Machining.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.51, p. 95-99, 2002.

TALON, A.G., RODRIGUES, M.S., GARCIA, M.V., LOPES, J.C., RIBEIRO, F.S.F., MELLO, H.J., SANCHEZ, L.E.A., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C. **Comparative evaluation of CBN wheels with abrasive grains of diferent friability applied to steel and ductile iron grinding process.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 112: 2547–2564, 2021.

TALON, A.G., SATO, B.K., RODRIGUES, M.S., ÁVILA, B.N., CUESTA, J.L., RIBEIRO, F.S.F., RODRIGUES, A.R., SANCHEZ, L.E.A., BIANCHI, E.C., LOPES J.C. **Green**

manufacturing concept applied to the grinding process of advanced ceramics using an alternative lubri-refrigeration technique. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 123(7):2771–2782, 2022.

TAWAKOLI, T., AZARHOUSHANG, B. **Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel.** International Journal of Machine Tools and Manufacture 48(14):1585–1591, 2008.

TAWAKOLI, T., HADAD, M.J., SADEGHI, M.H. **Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication - MQL grinding process.** International Journal of Machine Tools and Manufacture 50(6):521–531, 2010.

TAWAKOLI, T., HADAD, M.J., SADEGHI, M.H., DANESHI, A., STÖCKERT, S., RASIFARD, A. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding International. Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 49, p. 924–932, 2009.

TAWAKOLI, T., WESTKAEMPER E., RABIEY M. **Dry grinding by special conditioning.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 33, p. 419–424, 2007.

TAYLOR, D. A. **Advanced Ceramics – The Evolution, Classification, Properties, Production, Firing, Finishing and Design of Advanced Ceramics.** Materials Australia, v. 33, nº. 1, p. 20-22, January/February. 2001.

WALKER, T. **MQL Handbook.** [s.l.] Unist company, v.1, 2013.

WANG, C.M., CARGILL, G.S., CHAN, H.M., HARMER, M.P. **Structure of Y and Zr Segregated Grain Boundaries in Alumina.** INTERFACE SCIENCE 8, 243–255, 2000.

WANG, Y., LI, C., ZHANG, Y., LI, B., YANG, M., ZHANG, X., GUO, S., LIU, G. **Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in MQL grinding with different nanofluids.** Tribology International 99:198–210, 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 V. 253: 119896, 2020.

WEBSTER, J.; TRICARD, M. **Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding.** CIRP Annals, v. 53, n. 2, p. 597–617, 1 jan. 2004.

WECK, M., HENNES, N., SCHULZ, A. **Dynamic Behavior of Cylindrical Traverse Grinding Processes.** CIRP Annals - Manufacturing Technology. V.50, p. 213-216, 2001.

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

WOOD, P., BOUD, F., CARTER, W., VARASTEHE, H., GUNPUTH, U., PAWLIK, M., CLEMENTSON, J., LU, Y., HOSSAIN, S., BRODERICK, M., RAGURAMAN, M., SMITH, A., MANTLE, A., MCGOURLAY, J. **On the lubricity and comparative life cycle of biobased synthetic and mineral oil emulsions in machining titanium Ti-6Al-4V at low cutting speed.** Journal of Manufacturing Materials Processing 6(6):154, 2022.

WU, X., LI, C., ZHOU, Z., NIE, X., CHEN, Y., ZHANG, Y., SHARMA, S. **Circulating purification of cutting fluid: an overview.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 117(9–10):2565–2600, 2021.

ZHANG, Y., LI, C., JIA, D., ZHANG, D., ZHANG, X. **Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil.** Journal of Cleaner Production 87:930–940, 2015.

ZHONG, Y., DAI, Y., XIAO, H., SHI, F. **Experimental study on surface integrity and subsurface damage of fused silica in ultraprecision grinding.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 115(11):4021–4033, 2021.