



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

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

RAFAEL LIBERATTI JAVARONI

RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 UTILIZANDO A TÉCNICA DE
MQL, SISTEMA DE LIMPEZA E REBOLO DE CBN

BAURU

2020



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



RAFAEL LIBERATTI JAVARONI

RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 UTILIZANDO A TÉCNICA DE MQL, SISTEMA DE LIMPEZA E REBOLO DE CBN

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

Orientador: Professor Titular Eduardo Carlos Bianchi

Coorientador: Professor Me. José Claudio Lopes

BAURU

2020

Javaroni, Rafael Liberatti.

Retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 utilizando a técnica de MQL, sistema de limpeza e rebolo de CBN / Rafael Liberatti Javaroni, 2020
112 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Coorientador: José Claudio Lopes

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2020

1. Retificação. 2. Mínima quantidade de lubrificante (MQL). 3. Sistema de limpeza do rebolo. 4. Integridade superficial. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

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

Aos 21 dias do mês de agosto do ano de 2020, às 14:00 horas, no(a) Via Sistema de videoconferência e outras ferramentas de comunicação a distância, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / FEB/UNESP/Bauru, Dr. HAMILTON JOSÉ DE MELLO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo / USP - São Carlos, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RAFAEL LIBERATTI JAVARONI, intitulada **RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 UTILIZANDO A TÉCNICA DE MQL, SISTEMA DE LIMPEZA E REBOLO DE CBN**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: **APROVADO**

_____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI



Dr. HAMILTON JOSÉ DE MELLO



Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

DEDICATÓRIA

Ao meu filho João Pedro Merchan Grizzo Liberatti Javaroni

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Ana Flávia Merchan Ferraz Grizzo Javaroni e ao nosso filho João Pedro Merchan Grizzo Liberatti Javaroni, sem vocês nada disso seria possível. Agradeço todos os dias pela família incrível que formamos, pelo amor, cumplicidade, carinho e respeito.

Aos meus pais Carlos Eduardo Javaroni e Sueli Liberatti Javaroni. Obrigado por tudo que sempre fizeram e fazem por nossa família. Obrigado por nos criarem com muito amor, honestidade, carinho e dedicação, vocês sempre serão meus maiores exemplos.

Aos meus irmãos Alexandre Liberatti Javaroni e Júlia Liberatti Javaroni, por sempre estarem presentes e me apoiarem.

A todos os demais familiares e amigos.

Ao Professor Titular Eduardo Carlos Bianchi, pela oportunidade, orientação, ensinamentos e amizade que me foram concedidas.

Ao meu amigo José Claudio Lopes, por todo o suporte durante este trabalho, por ter me apresentado ao nosso orientador e principalmente pela nossa amizade.

A Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista - UNESP, em especial ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade.

Aos docentes e técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica, pelos ensinamentos transmitidos e todo o apoio na realização deste trabalho.

Aos integrantes do Laboratório de Usinagem por Abrasão, por todo conhecimento que pudemos adquirir e compartilhar neste período.

Meus mais sinceros agradecimentos a todos que contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho fosse concluído.

“Nada é permanente, exceto a mudança”.

(Heráclito)

RESUMO

A técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL) é uma das alternativas mais promissoras para substituição da aplicação convencional de fluidos de corte em processos de usinagem, mitigando riscos à saúde dos trabalhadores e ao meio ambiente e reduzindo custos com armazenamento, manutenção e descarte de fluidos de corte. No entanto, seu uso em processos de retificação ainda é um desafio, pois alguns problemas, como o aumento da temperatura na interface de corte e o aumento do fenômeno de empastamento do rebolo, podem afetar a qualidade das peças e reduzir a vida da ferramenta, tornando sua aplicação industrial inviável. Visando minimizar estas questões, este trabalho investigou um sistema de limpeza do rebolo associado à técnica de MQL em três vazões (40, 80 e 160 ml/h) na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340, temperado e revenido, com rebolo de CBN, comparando os resultados com os métodos convencional e MQL tradicional. Os parâmetros de saída analisados foram rugosidade, desvios de circularidade e microdureza da peça, desgaste diametral do rebolo, emissão acústica e potência elétrica consumida. As superfícies retificadas foram avaliadas por microscopias óptica, eletrônica de varredura e confocal e a superfície de corte do rebolo foi analisada após cada ensaio através de microscopia óptica. A técnica de MQL associada ao sistema de limpeza apresentou performance superior ao MQL tradicional e sua eficiência foi aprimorada com o aumento da vazão de fluido. Não foram observados danos térmicos, microtrincas ou alterações microestruturais nas peças, independentemente do método de lubrificação aplicado. Portanto, pode-se concluir que o uso do sistema de limpeza melhorou o desempenho da técnica de MQL nas condições investigadas, contribuindo para o desenvolvimento de um processo de retificação mais sustentável.

Palavras-chave: Retificação. Mínima quantidade de lubrificante (MQL). Sistema de limpeza do rebolo. Integridade superficial.

ABSTRACT

The minimum quantity lubrication (MQL) is an environmentally friendly technique of cutting fluids application, promoting a substantial reduction of fluid consumption in machining processes, thus mitigating health risks to workers and lowering costs with cutting fluids storage, maintenance and disposal. However, its use in grinding processes is still a challenge, as some problems such as increased temperatures in the cutting interface and rise of the grinding wheel clogging can affect the quality of the workpieces and reduce the tool life, making its industrial application unviable in these cases. To improve the MQL application, this study combines the MQL technique with a wheel cleaning jet (WCJ), to minimize clogging occurrence and consequently enhance the quality of the workpiece and increase the wheel life. In this context, the performance of the MQL technique with a wheel cleaning jet (MQL+WCJ) was assessed at three different flow rates (40, 80, and 160 ml/h) in external cylindrical plunge grinding of AISI 4340 steel, quenched and tempered, using a cubic boron nitride (CBN) grinding wheel. For comparison of the results, experiments were also performed with the traditional MQL technique (without wheel cleaning jet) and with the conventional method (flood application). The output parameters assessed were workpiece surface roughness, roundness deviation, and microhardness, diametrical wheel wear, acoustic emission, and grinding power. The machined surfaces were evaluated through optical, scanning electron, and confocal microscopies and the grinding wheel cutting surface was analyzed through optical microscopy. The MQL+WCJ technique outperformed the traditional MQL, and its efficiency was improved with the increase of the fluid flow rate. No thermal damages, microcracks or microstructural alterations were observed on the workpieces, irrespective of the cooling-lubrication method applied. Therefore, it could be concluded that the use of the wheel cleaning jet improved the performance of the MQL technique under the investigated conditions, contributing to the development of a more environmentally friendly grinding process.

Keywords: Grinding. Minimum Quantity Lubrication (MQL). Wheel Cleaning Jet (WCJ). Surface Integrity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Elementos básicos do processo de retificação.	23
Figura 2: Interface de contato entre grãos abrasivos e peça na retificação.	24
Figura 3: Custo de um componente em função das operações de fabricação	25
Figura 4: Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.....	26
Figura 5: Ciclo da retificação cilíndrica externa de mergulho.	27
Figura 6: Cinemática do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.....	28
Figura 7: Efeitos do aumento da velocidade de corte: (a) Sob taxa de remoção de material constante e (b) Sob taxa de remoção de material crescente	29
Figura 8: Estágios de formação do cavaco no processo de retificação.	34
Figura 9: Estruturas típicas de um rebolo: a) superabrasivo e b) convencional.....	36
Figura 10: Mecanismos de desgaste de grãos e ligante.	39
Figura 11: Macro-desgaste do rebolo	40
Figura 12: Dimensões dos corpos de prova (em milímetros).....	57
Figura 13: Dispositivo dosador MQL Accu-Lube 79053D: 1) Reservatório de fluido de corte, 2) válvula, 3) filtro de ar com manômetro, 4) gerador de frequência, 5) bombas pneumáticas para ar e fluido de corte, 6) botões de ajuste de vazão de ar e fluido, 7) chassi metálico, 8) base magnética para fixação rápida, 9) entrada de ar comprimido, 10) saídas de ar e fluido.	59
Figura 14: Bocal utilizado na aplicação da técnica de MQL.....	60
Figura 15: Visão esquemática: a) operação de retificação com MQL e Limpeza: b) Detalhe do bocal de MQL, c) Detalhe do bocal de Limpeza.	61
Figura 16: Matriz de ensaios.	65
Figura 17: Visão esquemática da impressão do perfil do rebolo desgastado no corpo de prova de aço ABN 1020.	68
Figura 18: Rugosidade (R_a) em função da condição de lubrificação.	74
Figura 19: Superfície de corte do rebolo após retificação sob diferentes condições de lubrificação: a) convencional, b) MQL - 40 ml/h, c) MQL + Limpeza - 40 ml/h, d) MQL - 80 ml/h, e) MQL + Limpeza - 80 ml/h, f) MQL - 160 ml/h, g) MQL + Limpeza - 160 ml/h.	76
Figura 20: Microscopia óptica de varredura (MEV) das superfícies retificadas: a) Visão esquemática da amostra, b) Localização da microscopia, c) Convencional, d) MQL - 40 ml/h, e) MQL + Limpeza - 40 ml/h, f) MQL - 80 ml/h, g) MQL + Limpeza - 80 ml/h, h) MQL - 160 ml/h, i) MQL + Limpeza - 160 ml/h.....	78

Figura 21: Microscopia confocal das superfícies retificadas: a) Convencional, b) MQL - 40 ml/h, c) MQL + Limpeza - 40 ml/h, d) MQL - 80 ml/h, e) MQL + Limpeza - 80 ml/h, f) MQL - 160 ml/h, g) MQL + Limpeza - 160 ml/h.	79
Figura 22: Desvios de circularidade em função da condição de lubrificação.	81
Figura 23: Desgaste diametral em função da condição de lubrificação.	83
Figura 24: Processo de retificação sob diferentes condições de lubrificação: a) Convencional, b) MQL, c) MQL + Limpeza.	86
Figura 25: Potência elétrica consumida em função da condição de lubrificação.	87
Figura 26: Emissão acústica (RMS) em função da condição de lubrificação.	89
Figura 27: Microscopia óptica: a) Visão esquemática da amostra, b) Localização dos pontos de microscopia (amarelo) e microdureza (vermelho), c) Convencional, d) MQL - 40 ml/h, e) MQL + Limpeza - 40 ml/h, f) MQL - 80 ml/h, g) MQL + Limpeza - 80 ml/h, h) MQL - 160 ml/h, i) MQL + Limpeza - 160 ml/h.	92
Figura 28: Microdureza em função da distância da superfície retificada e da condição de lubrificação.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos principais materiais utilizados na fabricação de grãos abrasivos	37
Tabela 2: Composição química do aço ABNT 4340.....	57
Tabela 3: Dureza dos corpos de prova antes e após tratamentos térmicos.....	58
Tabela 4: Condições de retificação.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNC	Controle numérico computadorizado
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva
EESC/USP	Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
FEB	Faculdade de Engenharia de Bauru
LADAPS	Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais
LUA	Laboratório de Usinagem por Abrasão
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MQL	Mínima quantidade de lubrificação
NUMA	Núcleo de Manufatura Avançada
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius	(°C)
°INPM	Grau Instituto Nacional de Pesos e Medidas	(°INPM)
μ	Coeficiente de atrito	(-)
μm	Micrometro	(μm)
A	Área média no topo dos grãos abrasivos	(mm^2)
A/D	Analógico/digital	(-)
a_d	Profundidade de dressagem	(μm)
a_e	Profundidade real de corte	(μm)
Al_2O_3	Óxido de alumínio	(-)
a_p	Profundidade de corte	(μm)
b	Largura do rebolo	(mm)
C	Carbono	(-)
CBN	Nitreto de boro cúbico	(-)
c_d	Profundidade radial de corte	(μm)
Cr	Cromo	(-)
d_e	Diâmetro equivalente	(mm)
d_s	Diâmetro do rebolo	(mm)
d_w	Diâmetro da peça	(mm)
e_c	Energia específica	(J/mm^3)
F_a	Força axial	(N)
F_n	Força normal	(N)
F_t	Força tangencial	(N)
G	Relação G	(-)
gf	Gramma-força	(gf)
h_{eq}	Espessura equivalente de corte	(μm)
HV	Dureza Vickers	(HV)
HR_C	Dureza Rockwell C	(HR_C)
K	Força de corte unitária	(N)
kgf	Quilograma-força	(kgf)
l/min	Litro por minuto	(l/min)
l_c	Comprimento de contato	(μm)

m	Metro	(m)
m/s	Metro por segundo	(m/s)
ml/h	Mililitro por hora	(ml/h)
mm	Milímetro	(mm)
mm/min	Milímetro por minuto	(mm/min)
Mn	Manganês	(-)
Mo	Molibidênio	(-)
MPa	Mega Pascal	(MPa)
Ni	Níquel	(-)
n_s	Rotação do rebolo	(rpm)
n_w	Rotação da peça	(rpm)
P	Potência de corte	(W)
p	Pressão unitária	(N/mm ²)
P.A.	Para análise	(-)
Q'_w	Taxa específica de remoção de material no tempo	(mm ³ /mm.s)
Q_w	Taxa de remoção de material no tempo	(mm ³ /s)
R_a	Rugosidade média aritmética	(μ m)
RMS	Root Mean Square	(-)
R_q	Rugosidade média quadrática	(μ m)
R_y	Rugosidade máxima	(μ m)
R_z	Rugosidade total	(μ m)
Si	Silício	(-)
SiC	Carbeto de silício	(-)
t_s	Tempo de centelhamento	(s)
v_d	Velocidade de dressagem	(mm/min)
v_f	Velocidade de avanço do rebolo	(mm/min)
v_s	Velocidade tangencial do rebolo ou de corte	(m/s)
v_w	Velocidade periférica da peça ou velocidade de trabalho	(m/s)
Z_s	Volume de rebolo gasto	(mm ³)
Z_w	Volume de material removido	(mm ³)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1.	Motivação	21
1.2.	Objetivos.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1.	Processo de retificação	23
2.2.	Retificação cilíndrica externa de mergulho	25
2.3.	Parâmetros de corte na retificação cilíndrica externa de mergulho.....	28
2.3.1.	Velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo (v_s)	28
2.3.2.	Velocidade periférica da peça (v_w)	29
2.3.3.	Velocidade de avanço ou de mergulho (v_f)	30
2.3.4.	Profundidade de corte (a_p).....	30
2.3.5.	Diâmetro equivalente (d_e)	31
2.3.6.	Comprimento de contato (l_c)	32
2.3.7.	Taxa de remoção de material (Q_w)	33
2.3.8.	Espessura equivalente de corte (h_{eq})	33
2.4.	Mecanismo de formação do cavaco.....	34
2.5.	Rebolos.....	35
2.5.1.	Rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN) com ligante vitrificado.....	37
2.5.1.1.	Grãos abrasivos de nitreto de boro cúbico (CBN).....	37
2.5.1.2.	Ligante vitrificado	41
2.6.	Lubrirrefrigeração	41
2.6.1.	Técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL).....	43
2.7.	Sistema de Limpeza da superfície de corte do rebolo	47
2.8.	Variáveis de saída do processo de retificação	48
2.8.1.	Rugosidade	48
2.8.2.	Circularidade	49
2.8.3.	Desgaste diametral do rebolo	51
2.8.4.	Potência elétrica consumida.....	52
2.8.5.	Emissão acústica	53
2.8.6.	Microscopias e microdureza.....	54
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	56
3.1.	Equipamentos, Materiais e Procedimentos	56

3.1.1.	Retificadora	56
3.1.2.	Rebolo e dressador	56
3.1.3.	Corpos de prova	57
3.1.4.	Sistema de lubrificação convencional.....	58
3.1.5.	Sistema de lubrificação por mínima quantidade de lubrificante (MQL)	58
3.1.6.	Sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo	60
3.1.7.	Sistema de aquisição de dados de potência elétrica consumida.....	61
3.1.8.	Sistema de aquisição de dados de emissão acústica.....	61
3.2.	Procedimento de ensaio e parâmetros de entrada.....	62
3.3.	Análise das variáveis de saída	66
3.3.1.	Rugosidade	66
3.3.2.	Desvios de circularidade	67
3.3.3.	Desgaste diametral do rebolo	67
3.3.4.	Preparação das amostras para análise metalográfica e microdureza.....	68
3.3.5.	Microscopia óptica das peças.....	70
3.3.6.	Microdureza Vickers	70
3.3.7.	Potência elétrica consumida.....	71
3.3.8.	Emissão acústica	71
3.3.9.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	71
3.3.10.	Microscopia confocal	71
3.3.11.	Microscopia óptica da superfície de corte do rebolo.....	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1.	Rugosidade	73
4.2.	Análise das superfícies retificadas	77
4.3.	Desvios de circularidade	80
4.4.	Desgaste diametral do rebolo	82
4.5.	Potência elétrica consumida	86
4.6.	Emissão acústica	89
4.7.	Microscopia óptica e microdureza	91
5	CONCLUSÕES	95
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICES	111

1 INTRODUÇÃO

A retificação é o processo de usinagem por abrasão mais utilizado quando alta qualidade superficial e elevada precisão geométrica das peças usinadas são necessárias (MALKIN; GUO, 2008). Na maioria dos casos, a retificação é o último processo da cadeia produtiva da peça, o que ressalta sua importância e elevado valor agregado na indústria metalúrgica (OLIVEIRA et al., 2009).

Comparada a outros processos de usinagem, a retificação apresenta elevada geração de energia, devido às altas velocidades de corte empregadas, que resultam em intensa interação entre as múltiplas arestas de corte dos grãos abrasivos presentes no rebolo com a superfície da peça usinada. A maior parte desta energia é dissipada na forma de calor através da interface de corte, elevando, portanto, a temperatura nesta região (DING et al., 2018). Conforme já amplamente reportado na literatura, altas temperaturas em processos de usinagem podem levar a sérios danos térmicos na peça, como aumento da rugosidade, transformações na microestrutura do material, microtrincas, queimas e tensões residuais de tração, afetando de forma negativa a qualidade da peça obtida (MARINESCU et al., 2013). O calor gerado também pode alterar as características dos grãos abrasivos e do material ligante do rebolo, reduzindo o desempenho e a vida da ferramenta (AGARWAL, 2019).

Neste contexto, a utilização de fluidos de corte torna-se essencial em operações de retificação. As principais funções dos fluidos são de lubrificar, refrigerar e remover os cavacos gerados da área de contato ferramenta/peça, o que possibilita a obtenção de peças de melhor qualidade e o aumento da vida da ferramenta. Entretanto, sua aplicação convencional, realizada de maneira abundante, apresenta sérios problemas, como elevados custos, riscos ambientais e à saúde dos trabalhadores envolvidos na operação.

Segundo Debnath, Reddy e Yi (2014), os custos referentes a aquisição, armazenamento, conservação, aplicação e descarte de fluidos de corte representam cerca de 16% dos custos totais de usinagem, enquanto os custos com ferramenta são de apenas 4%. Além disso, 85% dos fluidos de corte são de origem mineral, isto é, não são biodegradáveis, o que faz necessária a implementação de complexos e caros sistemas de manutenção e descarte para minimização de possíveis impactos ambientais (BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017). A proliferação de fungos e bactérias também pode ocorrer no fluido de corte, levando à uma série de doenças aos operadores envolvidos, como dermatites e problemas respiratórios (SHOKOOHI; KHOSROJERDI; SHIADHI, 2015). Durante a usinagem, devido às elevadas forças e temperaturas envolvidas, parte do fluido tende a ser vaporizada, formando uma névoa que, se

inalada pelos operadores, pode causar sérias doenças respiratórias, como asma e até alguns tipos de câncer (SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012). Desta forma, a redução do consumo de fluidos de corte é atualmente um dos maiores desafios da indústria metalúrgica e vem ganhando crescente atenção nos últimos anos, com a criação de leis e normas cada vez mais restritivas ao redor do planeta (PUSAVEC et al., 2010).

Buscando solucionar este desafio, diversas técnicas foram sugeridas e testadas pelos pesquisadores para reduzir o consumo de fluidos de corte, como usinagem à seco, mínima quantidade de lubrificante (MQL), lubrificante sólido, refrigeração criogênica, nano-fluidos, entre outras (LIEW et al., 2017; SHARIF; PERVAIZ; DEIAB, 2017). Dentre todas as alternativas, a operação à seco seria a ideal, visto que não há aplicação de fluido. No entanto, em processos de alta geração de energia, como a retificação, a ausência de fluido leva à elevadas temperaturas na interface de corte, o que deteriora a qualidade da peça e a vida da ferramenta, impedindo, portanto, sua aplicação industrial (DOGRA et al., 2018).

Diante dos problemas apresentados na usinagem à seco, a técnica MQL foi considerada por vários pesquisadores como a mais adequada para substituir o método convencional, devido aos benefícios de excelente lubrificação, redução substancial do consumo de fluidos (cerca de 99% em relação à aplicação abundante) e baixos custos de implementação em comparação com as demais técnicas alternativas (SHARMA; TIWARI; DIXIT, 2016). No método MQL, uma pequena quantidade de fluido (entre 50 e 200 ml/h) é aplicada diretamente na interface de corte através de um jato de ar comprimido (DA SILVA et al., 2007). A lubrificação é garantida pelo óleo que, devido às elevadas pressão e velocidade de aplicação, consegue penetrar através da barreira de ar formada ao redor do rebolo e alcançar a interface de corte, criando um filme lubrificante entre a peça e o rebolo, enquanto o resfriamento é realizado pelo jato de ar comprimido (BELENTANI et al., 2013).

Sendo assim, vários estudos foram realizados sobre a técnica MQL e, em muitos casos, foram constatadas performances similares ou até superiores do que as obtidas com o método convencional, em processos como furação e torneamento (BOSWELL et al., 2017; KUMAR; SINGH; KALSI, 2017; SARIKAYA; GÜLLÜ, 2014).

No entanto, a técnica MQL também apresenta algumas desvantagens significativas. O jato de ar comprimido possui baixa capacidade de remoção de calor, o que torna a capacidade de resfriamento desta técnica consideravelmente inferior que a do método convencional (RODRIGUEZ et al., 2019). Além disso, este jato não é eficiente na remoção dos cavacos da zona de corte, o que pode levar ao fenômeno de empastamento do rebolo (OLIVEIRA et al., 2012). Em processos com alta geração de energia e consequentemente altas temperaturas, como

é o caso da retificação, estes problemas se tornam ainda mais relevantes, de maneira que diversos estudos nesta área constatarem pioras significativas na qualidade da peça e na vida da ferramenta durante a retificação com a técnica MQL, inviabilizando sua ampla aplicação industrial em condições similares (BARCZAK; BATAKO; MORGAN, 2010; HADAD; SADEGHI, 2012; SHAO et al., 2015).

A refrigeração ineficiente leva ao aumento das temperaturas na região de corte. Já o empastamento é um fenômeno altamente prejudicial, que ocorre quando os cavacos, ao não serem removidos de maneira adequada, se misturam ao fluido de corte formando uma espécie de borra, que se aloja nos poros do rebolo, o que dificulta o acesso do fluido, prejudicando a lubrificação do processo. Além do mais, à medida que esta borra aumenta, ela pode vir a cobrir grãos ativos, reduzindo a capacidade de corte da ferramenta e aumentando a área de contato, o que leva ao aumento do atrito e, conseqüentemente, da temperatura na região de corte. Estes fatores têm influência significativa na retificação, causando deterioração na qualidade da peça e desgaste prematuro do rebolo, tornando necessária a sua dressagem constante ou até mesmo sua substituição, o que diminui a produtividade e aumenta os custos de produção, tornando o processo inviável.

Desta forma, a busca por soluções que aumentem a eficiência da técnica MQL em processos de retificação tem sido um dos principais objetivos dos pesquisadores nos últimos anos. Uma alternativa para minimizar a ocorrência do empastamento é a utilização de um sistema de limpeza do rebolo, que consiste na aplicação de um jato de ar comprimido contra a superfície de corte da ferramenta, removendo assim grande parte dos cavacos gerados durante o corte (LOPES et al., 2019a). Segundo Rodriguez et al. (2019), a utilização de um sistema de limpeza associado à técnica MQL na retificação do aço ABNT 4340 com rebolo de óxido de alumínio melhorou a qualidade superficial da peça obtida em relação ao MQL tradicional (sem limpeza). Apesar de sua potencial aplicação, esta técnica ainda foi pouco explorada, sendo necessários maiores estudos a respeito do tema para comprovação de sua eficiência, considerando as diversas classes de materiais e ferramentas utilizados atualmente.

A utilização de rebolos de nitreto de boro cúbico (CBN) com ligante vitrificado para retificação de materiais de difícil usinagem aumentou substancialmente nas últimas décadas. Os grãos abrasivos de CBN apresentam excelentes características de elevada dureza, boa condutividade térmica e alta resistência ao desgaste, fazendo com que esse tipo de rebolo tenha vantagens significativas em relação aos convencionais. Assim, durante a retificação com rebolo de CBN, uma quantidade significativamente maior de calor é dissipada pela ferramenta, levando a redução da energia dissipada através da superfície da peça e, portanto, minimizando

os riscos de danos térmicos (HADAD et al., 2012). Os grãos de CBN apresentam menor desgaste, o que reduz a necessidade de dressagem e permite o uso de maiores velocidades de corte, o que aumenta a produtividade. Já o ligante vitrificado apresenta as características de alta resistência ao desgaste e de dressagem mais fácil quando comparado aos ligantes metálicos e resinóides (HERMAN; KRZOS, 2009). Além disso, a possibilidade de controlar a porosidade e a estrutura de rebolos com ligante vitrificado permite que os fabricantes projetem ferramentas com diferentes características, tornando-os mais versáteis. Portanto, é possível condicionar a topografia desse tipo de ferramenta para uma ampla gama de taxas de remoção de material e acabamentos de superfície (KOPAC; KRAJNIK, 2006). Segundo Tawakoli et al. (2011), rebolos de CBN, além da maior condutividade térmica, também apresentam menor tendência ao empastamento que os convencionais, principalmente os de granulação mais grossa e maior porosidade, sendo indicados para utilização com a técnica MQL. Assim, a utilização de um rebolo de CBN com ligante vitrificado na retificação com MQL pode reduzir um dos principais problemas dessa técnica, que é a baixa capacidade de refrigeração.

O aço de baixa liga e alta resistência ABNT 4340, temperado e revenido, foi selecionado como material a ser retificado nesta pesquisa, por apresentar a excelente combinação de elevada resistência mecânica, ductilidade e tenacidade, sendo assim amplamente utilizado na produção de diversos componentes na indústria metalmeccânica, como eixos, engrenagens, acoplamentos, pistões, entre outros, peças que passam pela operação de retificação durante seus respectivos processos de fabricação.

O presente trabalho teve como objetivo aumentar a performance da técnica MQL na retificação através da utilização de um sistema de limpeza por ar comprimido e de um rebolo de CBN, tema ainda pouco explorado na literatura, contribuindo, portanto, para o avanço da ciência em direção a técnicas mais sustentáveis de manufatura.

Para tanto, foram realizados testes da técnica MQL em diferentes vazões (40 ml/h, 80 ml e 160 ml/h), associada a um sistema de limpeza do rebolo, na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340, temperado e revenido, com rebolo de CBN. Testes com os métodos MQL tradicional (sem limpeza) e convencional também foram realizados para comparação dos resultados. Os parâmetros de saída monitorados para avaliar as performances foram rugosidade, desvios de circularidade e microdureza da peça, desgaste diametral do rebolo, potência consumida e emissão acústica. As superfícies retificadas foram avaliadas através das técnicas de microscopia óptica, eletrônica de varredura e confocal, enquanto a superfície de corte do rebolo foi analisada por microscopia óptica.

1.1. Motivação

O processo de retificação é amplamente utilizado na indústria de manufatura para obtenção de peças com as características de alta qualidade superficial e excelente tolerância dimensional. A técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) tem sido cada vez mais aplicada com sucesso em processos convencionais de usinagem, como furação e torneamento, apresentando resultados compatíveis ou até superiores aos obtidos com a aplicação abundante de fluidos.

Entretanto, após pesquisas realizados em bancos de dados internacionais como Scopus, Google Scholar e Science Direct, e visitas à algumas empresas da área, constatou-se que a aplicação da técnica MQL na retificação ainda não é amplamente utilizada, devido principalmente aos problemas de refrigeração ineficiente e empastamento, que levam à deterioração da qualidade da peça e desgaste prematuro da ferramenta. Desta forma, a grande maioria das operações de retificação ainda é realizada com o método convencional, o que acarreta elevados custos de aquisição, manutenção e descarte de fluidos, além de sérios riscos ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores.

A motivação para o presente trabalho, portanto, foi tentar aumentar a eficiência da técnica de MQL em processos de retificação, contribuindo para o aumento de sua aplicação industrial. A utilização de um rebolo de CBN foi escolhida como meio de diminuir o calor dissipado pela superfície da peça, enquanto um sistema de limpeza por ar comprimido foi adotado como forma de reduzir a ocorrência do empastamento. O aço ABNT 4340, temperado e revenido, foi escolhido como material dos corpos de prova em função de sua relevância nas indústrias aeroespacial, automobilística e de máquinas e equipamentos em geral, onde é empregado na fabricação de diversos componentes de alta solicitação mecânica, como eixos, bielas, virabrequins, engrenagens, cilindros, entre outros. Constatou-se que esta combinação de MQL, sistema de limpeza e rebolo de CBN na retificação cilíndrica externa de mergulho ainda é pouco explorada na literatura, justificando a execução do presente trabalho.

1.2. Objetivos

- Avaliar o desempenho da técnica de lubrificação por mínima quantidade de lubrificante (MQL) em diferentes vazões (40 ml/h, 80 ml/h e 160 ml/h) associada a um sistema de limpeza do rebolo, na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340, temperado e revenido, com rebolo de CBN, através da análise dos parâmetros de rugosidade, desvios de circularidade e microdureza da peça, desgaste diametral do rebolo, consumo de

potência elétrica e emissão acústica, e análises por microscopias óptica, eletrônica de varredura e confocal das superfícies retificadas.

- Comparar os resultados obtidos com os métodos MQL tradicional (sem limpeza) e convencional.

- Relacionar a influência do sistema de limpeza e do aumento de vazão de fluido de corte com o desempenho da técnica de MQL, em função da qualidade da peça obtida e do desgaste da ferramenta.

- Verificar a viabilidade da substituição do método convencional pela técnica de MQL associada ao sistema de limpeza.

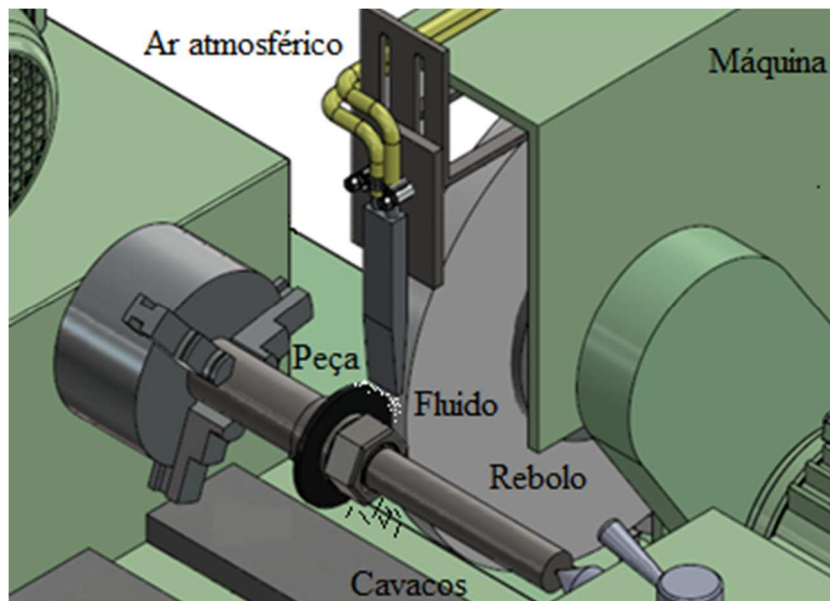
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica realizada sobre os temas referentes ao presente trabalho: o processo de retificação e seus principais componentes, parâmetros de usinagem, técnicas de lubrificação, com ênfase em mínima quantidade de lubrificante (MQL) e variáveis de saída.

2.1. Processo de retificação

A retificação é um processo de usinagem por abrasão amplamente utilizado na indústria metalmeccânica para obtenção de peças com excelente qualidade superficial e estreitas tolerâncias dimensionais e geométricas (MALKIN; GUO, 2008). Segundo Marinescu et al. (2006), seis elementos básicos constituem este processo: máquina retificadora, rebolo, peça, fluido de corte, ar atmosfera e cavaco, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Elementos básicos do processo de retificação.

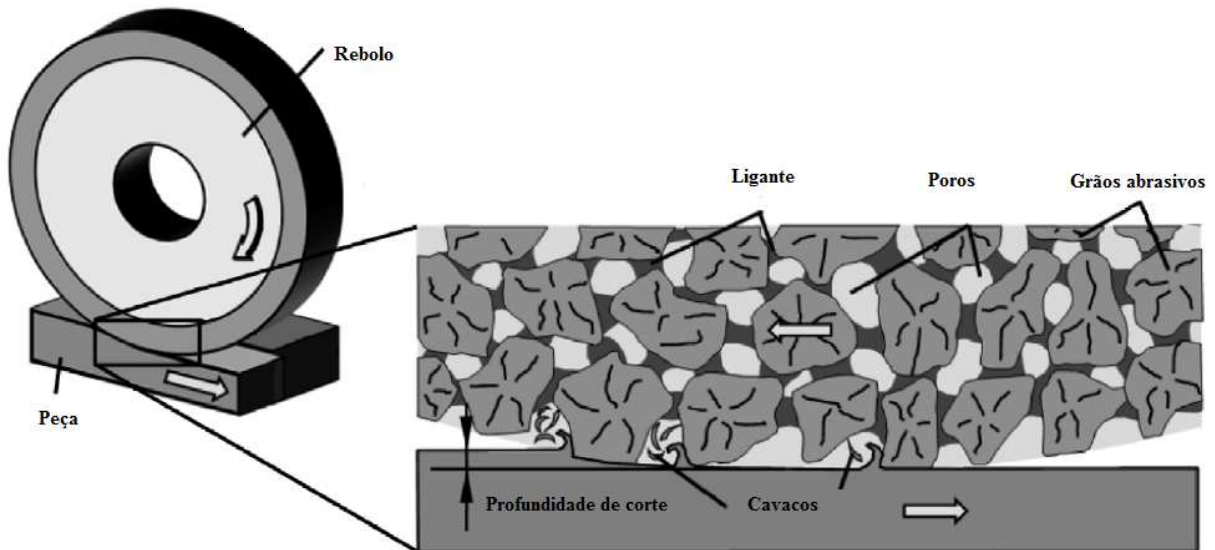


Fonte: Autor, 2020.

A ferramenta de corte, denominada rebolo, é constituída por grãos abrasivos, distribuídos e orientados de maneira aleatória em uma matriz ligante, o que a caracteriza como uma ferramenta de geometria não definida, diferentemente da maioria dos demais processos de fabricação, como torneamento, fresamento e furação (MARINESCU et al., 2013). O contato entre os grãos abrasivos e a superfície da peça em altas velocidades produz interações de atrito,

deformações elásticas e plásticas e cisalhamento, que é o responsável pela efetiva remoção de material e formação do cavaco (KLOCKE, 2013), conforme ilustrado na Figura 2.

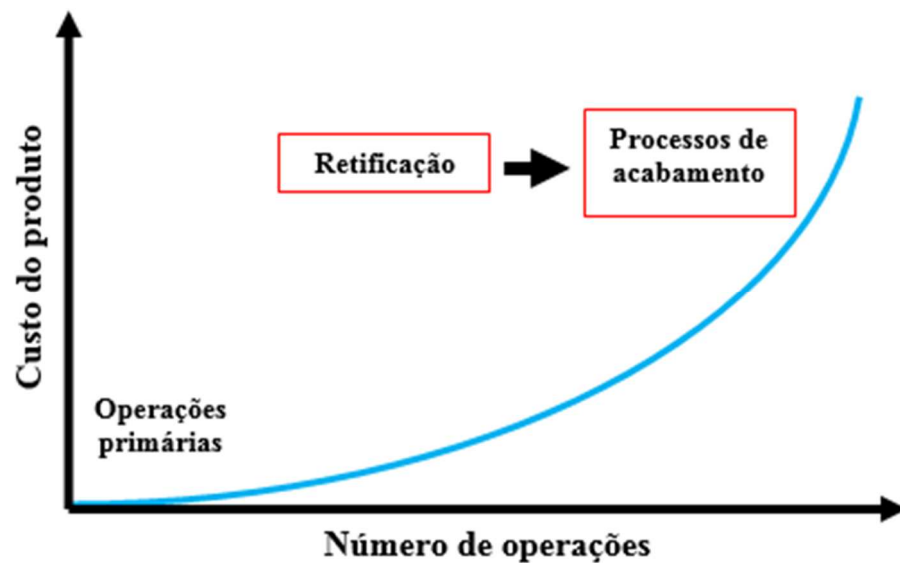
Figura 2: Interface de contato entre grãos abrasivos e peça na retificação.



Fonte: Adaptado de (ROM et al., 2018).

Comparada aos processos convencionais de usinagem com ferramenta de geometria definida, a retificação envolve forças e velocidades significativamente maiores, o que implica em elevada geração de energia (AZARHOUSHANG; DANESHI; LEE, 2017). A maior parte desta é dissipada através da peça, na forma de calor, o que pode causar diversos danos térmicos à peça, como alterações microestruturais, microtrincas, queimas, tensões residuais de tração, elevação da rugosidade e desvios de forma (LAVISSE et al., 2018). Por se tratar de um dos processos finais na fabricação de um componente, normalmente realizado após o tratamento térmico, a retificação possui elevado valor agregado, podendo representar entre 20% e 25% do custo total da peça, conforme exemplificado na Figura 3 (WINTER et al., 2015). Desta forma, para lubrificar e refrigerar o processo, a aplicação de fluidos de corte de maneira abundante é amplamente empregada em retificação. Além disso, os parâmetros de usinagem devem ser muito bem definidos, para que não ocorram danos à peça que levariam ao seu descarte, implicando em elevados custos e retrabalhos (BIANCHI et al., 2013).

Figura 3: Custo de um componente em função das operações de fabricação



Fonte: Adaptado de (ROWE, 2014).

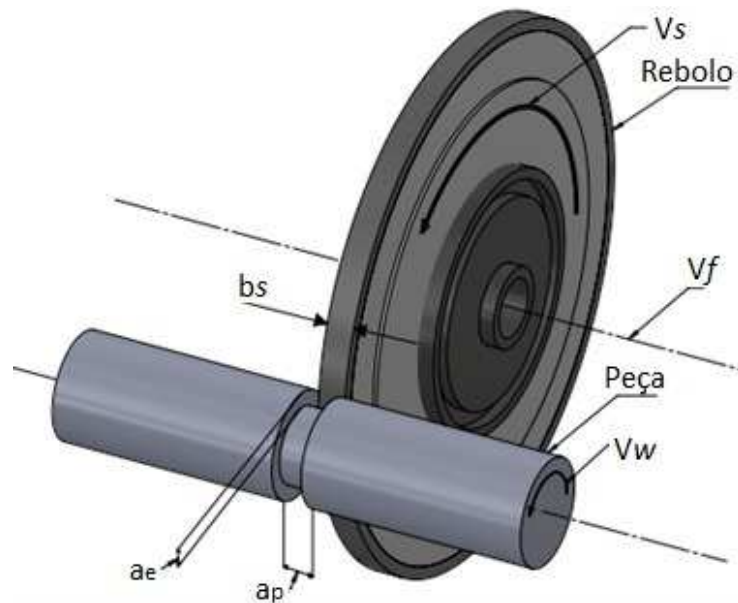
A retificação é considerada um processo de fabricação de alta complexidade, devido à diversos fatores, mas principalmente pela grande quantidade de arestas de corte com formas e distribuição aleatórias que interagem em elevadas velocidades de corte com a superfície da peça. Além disso, a geometria dos grãos se altera continuamente durante a operação, devido ao desgaste e fraturas do material abrasivo e até mesmo do ligante (ZHOU et al., 2018).

As operações de retificação são classificadas em relação ao tipo de contato entre rebolo e peça: cilíndrica externa, interna, plana e plana rotativa; e em relação ao movimento de avanço do rebolo: tangencial de mergulho, tangencial de passagem, lateral de mergulho ou lateral de passagem. Neste trabalho, a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho foi estudada, devido à sua relevância na fabricação de diversos componentes na indústria metalmeccânica.

2.2. Retificação cilíndrica externa de mergulho

No processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo avança em direção perpendicular à superfície da peça. A Figura 4 demonstra a operação, bem como as principais grandezas físicas envolvidas.

Figura 4: Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.

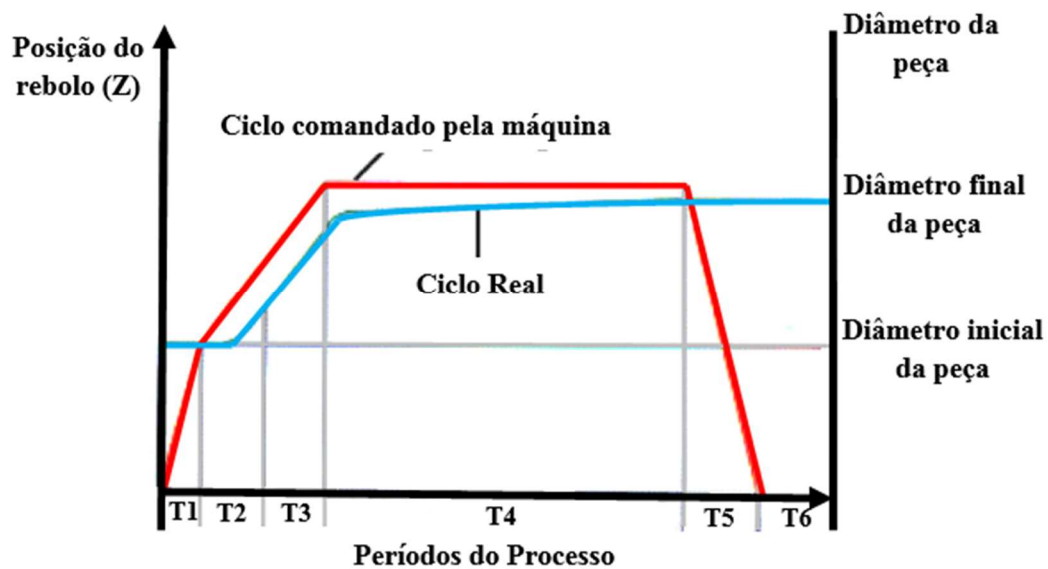


Fonte: Adaptado de (NGUYEN; ZHANG, 2011).

Onde v_s é a velocidade tangencial do rebolo, também denominada como velocidade de corte, v_w a velocidade tangencial da peça, v_f a velocidade de avanço, a_p é a largura de corte, a_e a profundidade de corte e b_s a largura do rebolo.

O ciclo da operação de retificação cilíndrica externa de mergulho é definido como o conjunto de todas as etapas do processo, desde o posicionamento e fixação da peça na máquina até a remoção da mesma (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Segundo Hassui e Diniz (2003), quando o rebolo toca inicialmente a peça, ocorre a deformação elástica da mesma e do eixo porta-rebolo, fazendo com que o avanço por volta comandado pela máquina seja diferente do avanço real, ou seja, a posição real do rebolo fica defasada em relação à posição teórica. Após algumas voltas, o avanço real iguala-se ao avanço comandado, no entanto, a diferença entre as profundidades de corte teórica e real continua. Desta forma, para garantir a dimensão desejada da peça, é necessário que, ao final do corte, o rebolo pare seu movimento de avanço radial por alguns instantes até que o eixo porta-rebolo e a peça se recuperem da deformação elástica sofrida e retornem à suas dimensões originais. Nesse período ainda existe o corte, porém com profundidade de penetração cada vez menor à medida que a deformação regride. Este período é denominado como tempo de centelhamento, ou tempo de “spark-out”. A Figura 5 exemplifica este ciclo:

Figura 5: Ciclo da retificação cilíndrica externa de mergulho.



Fonte: Adaptado de (HASSUI; DINIZ, 2003).

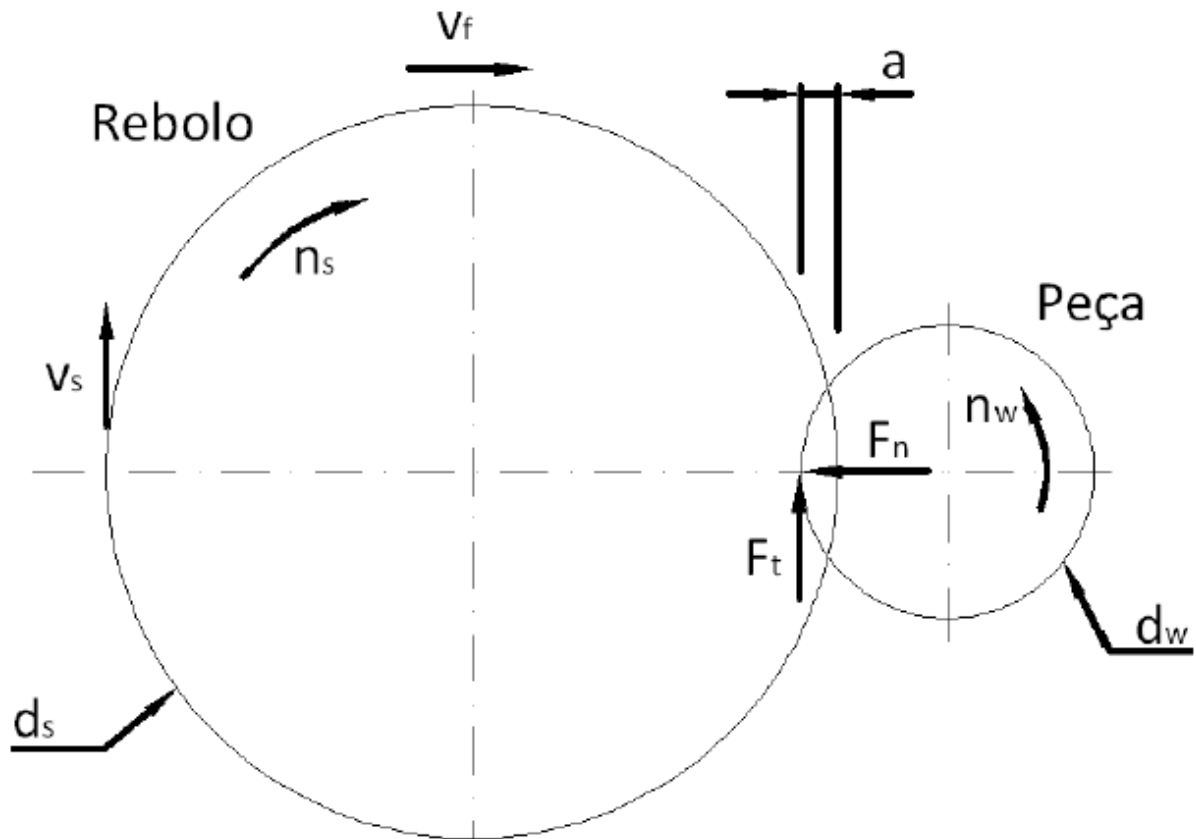
Ainda segundo Hassui e Diniz (2003), os períodos do processos são caracterizados como:

- T1: fixação da peça na máquina, deslocamento do rebolo em direção à peça, sem a ocorrência de remoção de material, já com a velocidade de avanço a ser utilizada durante o processo;
- T2: contato inicial entre o rebolo e a peça, onde as forças de corte causam deformações elásticas na peça e no eixo porta-rebolo, levando o avanço real a ser menor que o comandado pela máquina e ocasionando o atraso entre a posição real do rebolo e a posição comandada pela máquina.
- T3: fase de corte, onde ocorre a remoção de material e formação de cavacos e o avanço real se iguala ao avanço comandado pela máquina;
- T4: fase de centelhamento ou spark-out, onde o rebolo permanece em contato com a peça, porém sem avanço, o que permite que as deformações elásticas ocorridas na fase T2 sejam eliminadas. Esta fase é fundamental no processo, visto que neste período o volume de cavacos removidos diminui continuamente até zero, o que confere a qualidade superficial à peça;
- T5: afastamento do rebolo;
- T6: remoção da peça e realização da operação de dressagem do rebolo (operação de afiação da ferramenta, que será descrita posteriormente) e retorno do rebolo até a posição de trabalho, permitindo o início de um novo ciclo.

2.3. Parâmetros de corte na retificação cilíndrica externa de mergulho

A cinemática do processo de retificação cilíndrica externa é representada por um rebolo de diâmetro d_s e velocidade tangencial v_s , que avança com velocidade de mergulho (ou de avanço) v_f em direção à peça, de diâmetro d_w e velocidade tangencial V_w , até atingir a profundidade de corte desejada a , e as forças resultantes desta interação são a força tangencial F_t e a força normal F_n (ANDERSON; WARKENTIN; BAUER, 2008). O processo é apresentado esquematicamente na Figura 6.

Figura 6: Cinemática do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.



Fonte: Adaptado de (MALKIN; GUO, 2008).

Desta forma, nos próximos tópicos serão apresentados os principais parâmetros envolvidos no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.

2.3.1. Velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo (v_s)

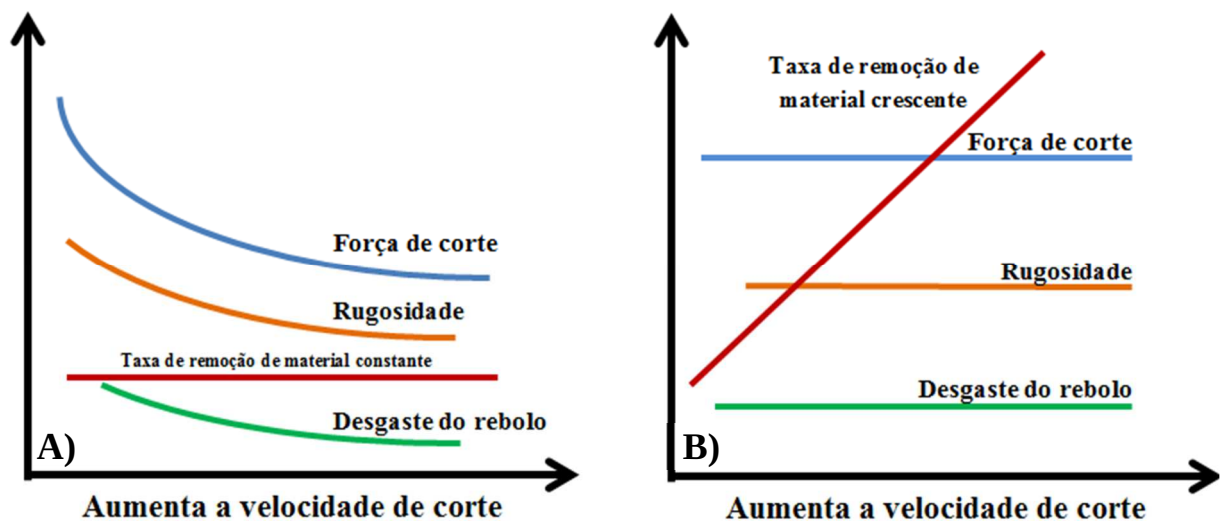
Segundo Rowe (2014), a velocidade de corte (v_s) é definida pela Equação (1):

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

Onde: d_s é o diâmetro do rebolo (mm) e n_s a rotação do rebolo (rpm).

Ainda de acordo com o autor, maiores velocidades de corte podem ser utilizadas tanto para melhorar a precisão e qualidade quanto para aumentar a produtividade, conforme demonstrado na Figura 7.

Figura 7: Efeitos do aumento da velocidade de corte: (a) Sob taxa de remoção de material constante e (b) Sob taxa de remoção de material crescente



Fonte: Adaptado de (ROWE, 2014).

Pode-se observar na Figura 7 que o aumento da velocidade de corte com taxa de remoção de material constante reduz as forças de corte, a rugosidade da peça e o desgaste do rebolo, devido ao fato de que um maior número de grãos abrasivos passa pela peça em um mesmo intervalo de tempo, removendo material na forma de cavacos menores, resultando em menores forças de corte e maior vida da ferramenta (TIAN et al., 2015). Já quando se aumenta a taxa de remoção de material, as forças de corte, a rugosidade da peça e o desgaste do rebolo se mantêm constantes, ou seja, a produtividade pode ser aumentada sem prejudicar a qualidade do processo, visto que o tempo da operação será menor.

2.3.2. Velocidade periférica da peça (v_w)

De acordo com Marinescu et al. (2006), a velocidade periférica da peça (v_w) é dada pela equação (2):

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

Onde: d_w é o diâmetro da peça (mm), n_w a rotação da peça (rpm) e v_w a velocidade periférica da peça (m/s).

Segundo Rowe (2014), baixas velocidades periféricas da peça favorecem a ocorrência de danos térmicos à peça, visto que o calor tem mais tempo para ser conduzido através do material. Já o aumento deste parâmetro leva à maiores taxas de remoção de material, resultando em cavacos mais grossos e, conseqüentemente, maiores forças de corte.

2.3.3. Velocidade de avanço ou de mergulho (v_f)

A velocidade de avanço ou de mergulho da ferramenta, segundo Marinescu et al. (2006), corresponde à velocidade do rebolo na direção normal à superfície da peça no ponto em que se dá o contato entre ambos. Este parâmetro afeta diretamente o acabamento da peça e as forças de corte, sendo que quanto maior a velocidade de avanço, maiores as forças de corte e, conseqüentemente, maior a rugosidade da peça (GE et al., 2019).

2.3.4. Profundidade de corte (a_p)

Segundo Malkin e Guo (2008), a profundidade de corte (a_p) equivale a profundidade que o rebolo entra na peça em relação à sua superfície, com uma velocidade de avanço v_f , durante uma revolução completa da mesma, sendo representada pela Equação (3):

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

Onde: v_f é a velocidade de avanço, v_w a velocidade da peça, d_w o diâmetro da peça.

Entretanto, segundo Rowe (2014), a equação (3) é válida quando é desconsiderado o desgaste do rebolo, o que afeta a profundidade de corte devido à diminuição, mesmo que infinitesimal, do diâmetro do rebolo. No entanto, em casos onde o desgaste é mais acentuado, como na retificação de materiais muito duros, este fator deve ser considerado. Desta forma, o autor propõe a seguinte metodologia para o cálculo da profundidade de corte, dada pela equação (4):

$$a_p = \frac{\pi \cdot d_w}{1 + (1/G) \cdot (d_w/d_s)} \cdot \left(\frac{v_f}{v_w} \right) \quad (4)$$

Onde: G é a relação entre o volume de material removido e o volume de rebolo gasto, d_w o diâmetro da peça, d_s o diâmetro do rebolo, v_f a velocidade de avanço e v_w a velocidade da peça.

De acordo com Rowe (2014), para determinar a profundidade real de corte (a_e) é necessária a medição da peça logo após o processo, visto que seu valor normalmente difere da profundidade de corte programada devido aos diversos fatores que ocorrem durante a retificação, influenciados pela dureza da peça, desgaste do rebolo, deflexões do sistema, dilatações térmicas, comprimento de contato, velocidade de corte e velocidade da peça, dentre outros. Em razão disso as forças de retificação e consequentemente a deflexão resultante do sistema pode ser significativamente alterada. Desta forma, segundo o autor, a profundidade real de corte (a_e) pode ser obtida pela equação (5):

$$a_e = a_p - x - a_s + x_{exp} \quad (5)$$

Onde: a_p é a profundidade de corte programada, x a deflexão do sistema, a_s o desgaste do rebolo e x_{exp} a expansão térmica da peça e elementos da máquina.

A espessura de corte é um importante parâmetro do processo, visto que seu valor é diretamente proporcional ao da espessura equivalente de cavaco, ou seja, quanto maior a profundidade de corte, maior o contato entre grãos e superfície da peça, o que aumenta os esforços de corte e, consequentemente, a rugosidade da peça, além de acelerar o desgaste da ferramenta (LINKE et al., 2017).

2.3.5. Diâmetro equivalente (d_e)

Segundo Malkin e Guo (2008), o parâmetro diâmetro equivalente (d_e) correlaciona a retificação plana e a cilíndrica e a diferença de curvatura em retificações internas e externas, sendo obtido conforme a equação (6):

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

Onde: d_s é o diâmetro do rebolo e d_w o diâmetro da peça. Adota-se o sinal negativo quando se trata da retificação cilíndrica interna e o sinal positivo no caso da externa. No caso da retificação plana, o diâmetro da peça (d_w) deve ser considerado infinito. Assim, $d_e = d_w$.

Portanto, na retificação cilíndrica esse parâmetro equivale ao diâmetro necessário de um rebolo em uma retificação plana tangencial para que este proporcione a mesma geometria de corte e comprimento de contato da cilíndrica.

2.3.6. Comprimento de contato (l_c)

O comprimento de contato (l_c) pode ser entendido como a extensão do contato entre a peça e o rebolo durante o processo. Segundo Marinescu et al. (2006), pode ser calculado considerando apenas a geometria dos elementos, conforme a equação (7):

$$l_c = \sqrt{a_e \cdot d_e} \quad (7)$$

Onde: a_e é a profundidade real de corte e d_e o diâmetro equivalente.

Entretanto, de acordo com Malkin e Guo (2008), a Equação (6) não leva em conta os movimentos e deformações envolvidas no processo, sendo então denominado de comprimento de contato estático. Conforme Marinescu et al. (2006), é através desse contato que o calor será dissipado através da peça. Ainda segundo o autor, a Equação (6) fornece uma boa aproximação para rebolos de ligante metálico (mais rígidos), porém já não é adequada para rebolos de ligante vitrificado (mais elásticos), onde o valor real pode chegar a ser duas vezes maior que o fornecido pela mesma.

O comprimento de contato é de grande relevância, visto que quanto maior o seu valor maior a quantidade de grãos que irão suportar as forças de corte e, portanto, menor a pressão sobre cada grão. Desta forma, se o comprimento de contato é maior, pode-se também aumentar a porosidade do rebolo e o tamanho dos grãos, o que resulta em uma diminuição do número total de grãos do rebolo e em uma melhor dissipação de calor, já que o aumento na porosidade favorece a remoção de cavacos e a ação do fluido de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

2.3.7. Taxa de remoção de material (Q_w)

Segundo Malkin e Guo (2008), a taxa de remoção de material (Q_w) é um parâmetro que demonstra o volume de material removido em função do tempo, sendo calculado através da Equação (8):

$$Q_w = a_p \cdot v_w \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b \quad (8)$$

Onde: a_p é a profundidade de corte, v_w a velocidade da peça, b a largura de retificação, d_w o diâmetro da peça e v_f a velocidade de avanço.

Ainda de acordo com os autores, pode-se obter a taxa de remoção específica de material (Q'_w), dividindo a taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de retificação (b), conforme demonstrado na Equação (9):

$$Q'_w = a \cdot v_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (9)$$

O parâmetro de taxa de remoção de material é amplamente utilizado para a avaliação da produtividade de um processo de retificação (AGARWAL, 2016) .

2.3.8. Espessura equivalente de corte (h_{eq})

De acordo com Malkin e Guo (2008), a espessura equivalente de corte (h_{eq}) é definida como a razão entre a taxa de remoção específica de material (Q'_w) e a velocidade de velocidade de corte (v_s). No caso da retificação cilíndrica, essa relação é dada pela Equação (10):

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{v_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{60 \cdot 1000 \cdot v_s} \quad (10)$$

Onde: Q'_w é a taxa de remoção específica de material, v_s a velocidade de corte, d_w é o diâmetro da peça e v_f a velocidade de avanço.

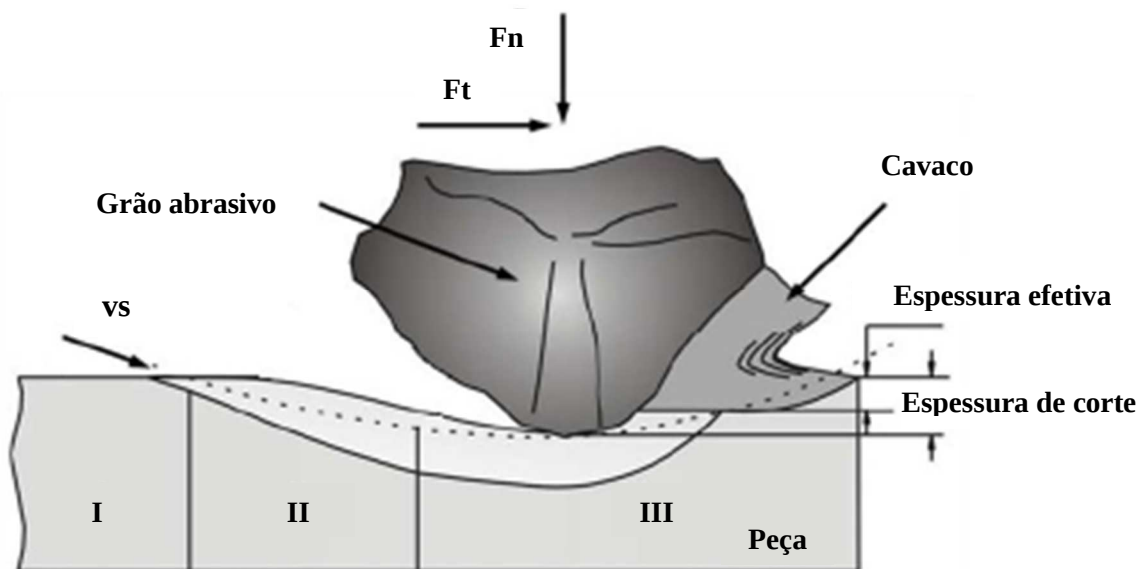
Este parâmetro representa, portanto, a espessura teórica da camada de material que é removida pelo rebolo numa volta completa, sendo muito utilizada para prever o comportamento da operação, visto que seu valor é diretamente relacionado com diversos parâmetros relevantes da operação. O aumento da espessura equivalente de corte (h_{eq}) leva ao aumento das forças de

corte, da rugosidade e à diminuição da vida do rebolo. Deste modo, busca-se sempre utilizar rebolos cujas ligas suportem elevadas rotações de trabalho (consequentemente com velocidades de corte mais elevadas) a fim de se diminuir a espessura equivalente de corte e, consequentemente, diminuir as forças de corte, melhorando a rugosidade e aumentando a vida do rebolo (DAI et al., 2015).

2.4. Mecanismo de formação do cavaco

No processo de retificação, o mecanismo de formação do cavaco pode ser dividido em três fases ou regiões (DENKENA; KÖHLER; KÄSTNER, 2012), conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Estágios de formação do cavaco no processo de retificação.



Fonte: Adaptado de (KLOCKE, 2013).

Onde:

- Região I - Deformação elástica: contato inicial entre grão e superfície da peça, iniciando a deformação elástica. Maior parte da energia do processo é dissipada na forma de atrito, calor e deformações.
- Região II – Deformações elástica e plástica: grão abrasivo continua a penetrar na peça, aumentando a espessura de cavaco não deformado (h_{cu}), de forma que as tensões compressivas se elevam. Com isso, o material da peça é empurrado à frente e para as laterais do grão abrasivo, promovendo assim, aumento da deformação elástica e início da deformação plástica. Esta etapa também é conhecida em retificação como

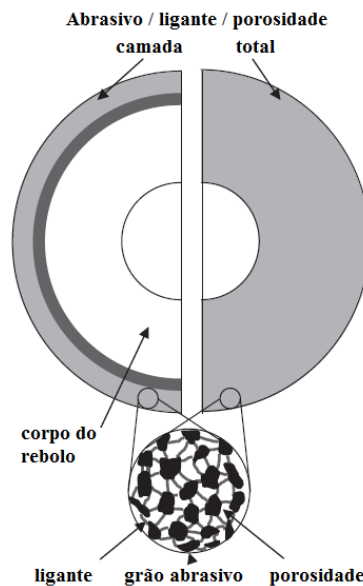
riscamento. Grande parte da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor;

Região III - Deformações elástica e plástica e formação de cavaco: nesta etapa, o grão abrasivo atinge um valor de penetração crítico, que por consequência gera uma pressão crítica, definida como a pressão mínima para que ocorra a ruptura do material da peça por cisalhamento. Neste momento inicia-se a formação do cavaco e grande parte da energia do processo passa a ser consumida pelo cisalhamento do material. Com a continuação do movimento de rotação do rebolo, o grão termina o seu contato com a peça removendo o cavaco gerado, que é alojado na porosidade da ferramenta, enquanto um novo grão entra em contato com a superfície da peça, reiniciando o ciclo. Segundo Daneshi, Müller e Azarhoushang (2018), durante o processo de formação do cavaco, as energias consumidas pelo atrito e pelo riscamento são consideravelmente maiores que as consumidas pelo corte efetivo de material, sendo as principais responsáveis pela elevada geração de calor característica do processo de retificação.

2.5. Rebolos

O rebolo é a ferramenta de corte utilizada em processos de retificação. Segundo Wegener et al. (2011), rebolos são compostos por três elementos básicos: o grão abrasivo, responsável pela remoção de material da superfície da peça, o ligante, que possui a função de reter os grãos na ferramenta, e a porosidade ou espaço intergranular, que tem a função de armazenar os cavacos removidos e permitir o fluxo de fluido de corte através da superfície da ferramenta. Já na definição de (WEBSTER; TRICARD, 2004), os rebolos são formados por quatro elementos básicos, sendo os três descritos acima acrescidos do quarto elemento, o projeto do rebolo, que considera as resistências mecânica e química e o material do corpo da ferramenta (como em rebolos de CBN e diamante, onde apenas uma pequena camada externa do rebolo é composta de material abrasivo/ligante/poros, sendo o restante do corpo da ferramenta de material metálico). Os elementos básicos que constituem o rebolo estão representados na Figura 9.

Figura 9: Estruturas típicas de um rebolo: a) superabrasivo e b) convencional



Fonte: Adaptado de (WEGENER et al., 2011)

Segundo Malkin e Guo (2008), o desempenho da ferramenta está relacionado ao tipo, tamanho e distribuição dos grãos abrasivos, às propriedades do material ligante e à porosidade do conjunto.

De acordo com Rowe (2014), a preparação adequada do rebolo deve ser feita pelos processos de balanceamento e dressagem. Segundo Hadad e Sharbati (2017), o desempenho do processo de retificação é influenciado significativamente pela preparação do rebolo. Além do perfil de rebolo necessário, o processo de dressagem deve produzir a topografia apropriada da superfície de corte, que influencia a rugosidade e morfologia da superfície da em função do número e formato das arestas cinemáticas, do volume de poros e do comportamento de desgaste da camada abrasiva. O processo de dressagem deve permitir um processo de retificação o mais consistente possível, levando em consideração o desgaste do rebolo.

Tradicionalmente, a topografia da superfície de corte possui natureza estocástica, devido à distribuição aleatória dos grãos de diversos formatos na matriz ligante. Entretanto, nas últimas décadas, um número crescente de pesquisas tem sido realizado para diminuir ou até eliminar a natureza estocástica da topografia do rebolo, criando os chamados rebolos texturizados, onde os grãos e a porosidade são fabricados de forma orientada, com o objetivo de obter-se melhor performance, através de maior previsibilidade do processo e melhor transporte de fluido de corte através da superfície da ferramenta (LI; AXINTE, 2016).

2.5.1. Rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN) com ligante vitrificado

Nesta seção, o rebolo de CBN com ligante vitrificado, escolhido para a realização da pesquisa, será o foco da revisão bibliográfica.

2.5.1.1. Grãos abrasivos de nitreto de boro cúbico (CBN)

Segundo Winter et al. (2015), os grãos abrasivos são classificados quanto ao material utilizado para sua fabricação, sendo divididos em dois grupos: convencional, onde são utilizados óxido de alumina (Al_2O_3), óxido de zircônia (ZrO_2) e carbetto de silício verde ou preto (SiC); e superabrasivo, onde são empregados nitreto de boro cúbico (CBN) e diamante natural ou sintético para fabricação dos grãos.

De acordo com Jackson e Mills (2000), a escolha de um abrasivo é baseada nas suas características de resistência ao impacto, resistência à fadiga, compressão, friabilidade e a resistência ao lascamento, os quais ocorrem sob a influência de cargas térmicas. Segundo Cai e Rowe (2004), a dureza é a propriedade mais importante de um abrasivo, devendo ser mantida sob altas temperaturas.

Além disso, conforme Malkin e Guo (2008), é importante que o abrasivo não reaja quimicamente ou sofra difusão facilmente ao interagir com o material da peça a ser usinada. Segundo os autores, as propriedades térmicas dos grãos abrasivos influenciam a resistência ao desgaste do abrasivo e as temperaturas durante a retificação. A condutividade térmica dos superabrasivos é significativamente superior à dos abrasivos convencionais. A Tabela 1 apresenta as características dos principais tipos de abrasivos utilizados na fabricação de rebolos.

Tabela 1: Características dos principais materiais utilizados na fabricação de grãos abrasivos

Material abrasivo	Dureza Knoop (kgf/mm ²)	Ponto de fusão (°C)	Estrutura Cristalina	Densidade (g/cm ³)	Resistência à compressão (kN/cm ²)	Cond. térmica (cal/°C.cm.s)
Diamante	8000	3700	Cúbica	3,52	870	5.0
CBN	4500	3700	Cúbica	3,48	650	3.3
Al_2O_3	2500	2040	Hexagonal	3,98	350	0.08
SiC	2700	2830	Hexagonal	3,22	150	0.2
WC	2100	2870	Hexagonal	17,05	350	0.08

Fonte: Adaptado de (MALKIN; GUO, 2008).

O nitreto de boro cúbico (CBN) tem sido amplamente utilizado na fabricação de grãos abrasivos para rebolos devido às suas excelentes propriedades de elevada dureza, alta condutividade térmica, boa estabilidade térmica e alta resistência ao desgaste, sendo

classificado como um material superabrasivo, devido às suas características superiores em relação aos abrasivos convencionais, como óxido de alumina (Al_2O_3) e carbetto de silício (SiC) (SATO et al., 2019). A dureza do CBN em temperatura ambiente é de aproximadamente 4,500 kg/mm², cerca de metade da dureza do diamante e o dobro em relação aos abrasivos convencionais (MARINESCU et al., 2006). Além disso, devido à sua alta estabilidade térmica mesmo em temperaturas elevadas, o CBN pode ser uma alternativa até mesmo ao diamante na retificação de materiais de elevada dureza (MALKIN; GUO, 2008).

Segundo Jackson (2011), a vida de um rebolo de CBN pode ser de 10 a até 100 vezes maior que a de rebolos convencionais, compensando seu preço mais elevado. De acordo com Cai e Rowe (2004), rebolos de CBN são mais caros do que os convencionais, porém a justificativa para utilizá-los está não apenas nos benefícios de uma melhor qualidade superficial e precisão geométrica da peça, mas também nos menores custos do processo devido ao seu potencial de alcançar elevadas velocidades de corte (que podem ser até 4 vezes maiores que a de rebolos convencionais), maiores intervalos de dressagem e elevadas taxas de remoção de material, o que compensa o custo inicial, tornando o processo mais econômico.

No início da aplicação de rebolos de CBN, diversos problemas de empastamento do rebolo, sobretudo na retificação de materiais dúcteis, foram reportados. No entanto, com o desenvolvimento de novas técnicas de distribuição de grãos abrasivos e a utilização de novos materiais ligantes tem minimizado estas ocorrências (DING et al., 2017). Sendo assim, segundo Lopes et al. (2019b), a aplicação de rebolos de CBN tem aumentado significativamente, principalmente na retificação de peças de difícil usinagem, como aços endurecidos e onde excelente acabamento superficial e precisão geométrica são necessários.

De acordo com Hadad et al. (2012), a partição de energia, ou seja, a quantidade de energia que é dissipada pela peça, na retificação com lubrificação abundante e rebolo de CBN é de 14%, enquanto que com rebolo convencional é de 36%. Quando utilizada a técnica de MQL, a diferença foi ainda maior, sendo de 46% com o rebolo de CBN e 77% com o rebolo convencional. Sendo assim, devido à sua excelente condutividade térmica, a utilização de rebolo de CBN minimiza significativamente a quantidade de calor dissipada pela peça, reduzindo os riscos de danos térmicos à peça, justificando a aplicação deste tipo de ferramenta, principalmente em conjunto com a técnica de MQL, que tem como a baixa capacidade de refrigeração um de seus principais problemas.

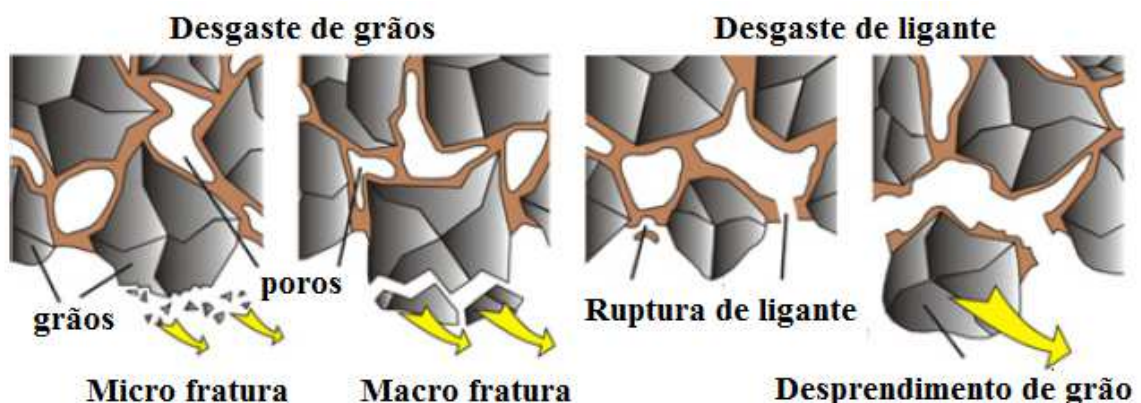
2.5.1.1.1. Friabilidade e mecanismos de desgaste do rebolo

O conceito de friabilidade corresponde à facilidade do grão abrasivo em se quebrar em pedaços menores sob uma determinada força ou impacto de modo a gerar novas arestas de corte. Desta forma, quanto maior a friabilidade de um determinado grão, mais facilmente este se quebrará mediante força ou impacto e maior será a geração de novas arestas de corte (LINKE, 2015). Segundo Jackson (2011), a friabilidade é dependente das propriedades do grão abrasivo, como tamanho e morfologia do cristal, impurezas, inclusões, trincas pré-existentes e formato. Além disso, o nível e a natureza das forças aplicadas ao grão durante a retificação e os fatores do ambiente do processo, tal como choque térmico devido ao fluido de corte, também exercem grande influência neste parâmetro.

Durante a operação de retificação, devido às elevadas cargas mecânicas e térmicas presentes da interface de corte, é natural que os componentes do rebolo (grãos abrasivos e ligante) sofram um processo de desgaste (ZHU et al., 2019). Segundo Wegener et al. (2011), o desgaste do rebolo pode então ser classificado em duas categorias:

- micro-desgaste, relacionado aos grãos e ao ligante, onde quatro situações podem ocorrer: pequenas fraturas de grão e/ou ligante (micro-fraturas), o que mantém sua afiação, permitindo a remoção efetiva de material por um período mais prolongado; e fraturas mais significativas de grão e/ou ligante (macro-fraturas), fazendo até com que um grão inteiro seja destacado do rebolo, fatores que contribuem para o desgaste prematuro da ferramenta, visto que estes grãos se desprendem da ferramenta sem atingir toda sua capacidade de remoção de material. A Figura 10 ilustra os principais mecanismos de micro-desgaste do rebolo que podem ocorrer durante o processo de retificação.

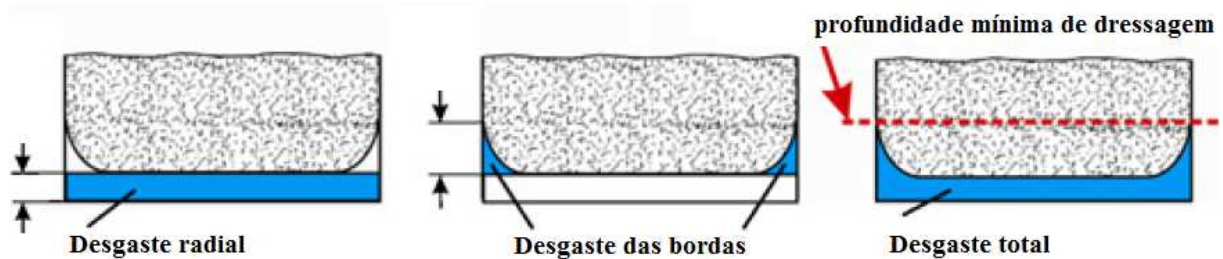
Figura 10: Mecanismos de desgaste de grãos e ligante.



Fonte: Adaptado de (WEGENER et al., 2011).

- macro-desgaste, relacionado à deterioração da macro-geometria do rebolo, ou seja, às alterações no perfil da superfície de corte da ferramenta, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Macro-desgaste do rebolo



Fonte: Adaptado de (WEGENER et al., 2011).

Quanto maiores as cargas mecânicas e térmicas no processo de corte, maior a ocorrência de macro-desgaste e, conseqüentemente, menor a vida do rebolo (TAWAKOLI et al., 2007).

Segundo Agarwal (2019), a combinação entre as características dos grãos e do ligante e das condições de corte determinam como se dará o processo de desgaste da ferramenta. Em um cenário ideal, os grãos devem sofrer apenas micro-fraturas, mantendo suas arestas de corte afiadas por maior período com o mínimo de desgaste. No entanto, se o grão apresentar elevada tenacidade e o ligante baixa dureza, ou as forças de corte forem muito elevadas, pode ocorrer fratura no ligante, levando ao desprendimento do grão antes mesmo que este realize remoção de material, o que favorece o desgaste prematura. Se o ligante for muito duro e as forças de corte elevadas, o grão poderá sofrer macro-fraturas, o que também leva ao desgaste acelerado. Finalmente, no caso de grão tenaz, ligante duro e forças moderadas ou baixas, pode ocorrer elevado desgaste por atrito, levando ao “cegamento” dos grãos, o que diminui a capacidade de corte da ferramenta e eleva as temperaturas na interface ferramenta/peça, podendo acarretar danos térmicos à peça. Desta forma, a escolha de ferramentas e parâmetros de corte adequados é essencial para manter o desgaste da ferramenta em níveis aceitáveis (DING et al., 2017).

Segundo Fujimoto, Ichida e Sato (2007), o grão de CBN é altamente resistente à fratura e ao desgaste, prevalecendo o mecanismo de micro-fraturas, o que o torna ideal para aplicações com alta remoção de material e elevadas forças de corte, aliando elevada produtividade com excelente acabamento superficial, superiores aos apresentados pelos rebolos convencionais.

2.5.1.2. Ligante vitrificado

As propriedades dos rebolos são de suma importância para a determinação da produtividade e qualidade do processo de retificação. O tamanho do grão abrasivo, a concentração, bem como o tipo de ligante são os fatores que vão indicar o comportamento da ferramenta. Entretanto, as propriedades dos ligantes ainda têm sido pouco estudadas (DANKENA et al., 2016).

As propriedades do material ligante possuem um papel fundamental no reboło. A utilização de materiais de elevada dureza como ligante faz com que os grãos abrasivos fiquem presos ao reboło por maior período, aumentando sua área de contato devido à planificação das arestas de corte, mas se o ligante utilizado for mole, os grãos podem se desprender facilmente da matriz, resultando em um desgaste excessivo (LINKE; KLOCKE, 2010).

Segundo Rowe (2014), existem três principais tipos de ligantes utilizados na fabricação de rebolos: resinoide, vitrificado e metálico. O ligante do tipo vitrificado, utilizado no reboło da presente pesquisa, apresenta as características de adequada resistência ao desgaste e de maior facilidade de dressagem quando comparado aos dos tipos metálico e resinoide (HERMAN; KRZOS, 2009). Além disso, a possibilidade de controlar a estrutura e a porosidade quando se utiliza o ligante vitrificado permite que os fabricantes projetem ferramentas com diferentes características relacionadas à resistência, remoção de cavacos e cargas mecânicas. Desta forma, a topografia desse tipo de ferramenta pode ser definida para uma ampla gama de taxas de remoção de material e acabamentos de superfície (KOPAC; KRAJNIK, 2006).

De acordo com Bianchi et al. (2011), o ligante vitrificado é frágil, muito resistente ao desgaste e de boa estabilidade térmica e, portanto, apresenta vantagem significativa em rebolos de CBN. Adicionalmente, suas características de elevada porosidade e boas propriedades de auto afiação simplificam o método de condicionamento, o que torna o ligante vitrificado a principal escolha na fabricação de rebolos de CBN.

2.6. Lubrificação

O processo de retificação é caracterizado pela elevada geração de energia, devido principalmente às altas velocidades de corte e à intensa interação entre as múltiplas arestas de corte e a superfície da peça (SETTI et al., 2015). Grande parte desta energia é dissipada como calor, principalmente na região de corte e, portanto, as altas temperaturas atingidas durante o processo podem ocasionar danos térmicos à peça, como piora da rugosidade, transformações microestruturais, microtrincas, queimas e tensões residuais de tração e, além disso, o calor

gerado pode alterar as características dos grãos abrasivos e do ligante, reduzindo a vida e o desempenho do rebolo (BAUMGART; HEIZER; WEGENER, 2018).

Neste contexto, fluidos de corte têm sido amplamente utilizados em processos de retificação. Suas principais funções são lubrificar, refrigerar e remover os cavacos da interface de corte, promovendo assim melhora na qualidade da peça e o aumento da vida do rebolo (BRINKSMEIER et al., 2015). Segundo Lavissee et al. (2018), vazão e velocidade baixas diminuem a eficiência do fluido, entretanto, o aumento de vazão ou velocidade só é útil até determinado valor, a partir do qual não há mais ganho de eficiência de lubrificação-refrigeração, levando ao desperdício. Desta forma, o controle dos parâmetros de aplicação do fluido é essencial para a performance do processo.

No entanto, a aplicação de fluidos de corte de maneira abundante, como tipicamente ocorre na retificação, também apresenta algumas desvantagens significativas, como altos custos, elevado potencial de contaminação ambiental e de danos à saúde dos trabalhadores envolvidos na operação. De acordo com Debnath, Reddy e Yi (2014), as despesas relacionadas à aquisição, armazenamento, conservação e descarte dos fluidos de corte representam cerca de 16% do total de despesas de usinagem, enquanto os custos de ferramentas giram em torno de 4%. Além disso, 85% dos fluidos de corte são de origem mineral, ou seja, não são biodegradáveis, o que requer manutenção e tratamentos de disposição dispendiosos para minimizar os impactos ambientais e à saúde (BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017). A proliferação de fungos e bactérias pode ocorrer no fluido, causando doenças nos operadores, como dermatites e problemas respiratórios (SHOKOOHI; KHOSROJERDI; SHIADHI, 2015). O fluido pode também ser vaporizado durante o processo de usinagem devido às altas pressões e temperaturas envolvidas, formando uma névoa de partículas de fluido, que podem ser inaladas pelos operadores. Essa névoa nas vias aéreas pode causar uma série de doenças, como asma e até alguns tipos de câncer (SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012). Portanto, a aplicação convencional de fluidos de corte é considerada atualmente o problema ambiental e de saúde mais crítico da indústria metalúrgica. Essa questão ganhou relevância crescente nas últimas décadas e leis mais rigorosas foram implementadas em todo o mundo (GOINDI; SARKAR, 2017).

Visando a resolução deste problema, diversas técnicas tem sido sugeridas e testadas pelos pesquisadores para reduzir o consumo de fluidos de corte nos processos de retificação, como usinagem à seco, lubrificação sólida, fluidos biodegradáveis, nano fluidos, resfriamento criogênico, mínima quantidade de lubrificação (MQL), entre outras (LIEW et al., 2017). A retificação à seco seria a escolha ideal, visto que nenhum fluido é utilizado, entretanto, os testes

realizados não apresentaram resultados satisfatórios, devido principalmente ao aumento do calor na zona de corte que leva à piora da qualidade da peça e desgaste acelerado da ferramenta, inviabilizando sua aplicação (DEBNATH; REDDY; YI, 2014). Desta forma, foi proposta a técnica de mínima quantidade de lubrificante, normalmente denominada como MQL na literatura científica, que consiste na aplicação de uma mínima quantidade de fluido (30 ml/h a 200 ml/h) diretamente na interface de corte, através de um jato de ar comprimido. De acordo com Boswell et al. (2017), a principal vantagem desta técnica alternativa é a redução substancial do consumo de fluidos, de cerca de 99,9% (600 l/h para 0,2 l/h), reduzindo assim os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores.

2.6.1. Técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL)

A técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), também denominada em alguns trabalhos como usinagem quase a seco (“near dry machining”), foi desenvolvida com o objetivo de melhorar a performance do processo de usinagem a seco utilizando a menor quantidade possível de fluido de corte. Desde então, segundo Sharma, Tiwari e Dixit (2016), esta técnica é considerada por diversos pesquisadores como a mais adequada para substituir o método convencional de lubrificação abundante, uma vez que apresenta benefícios de excelente lubrificação, redução substancial do consumo de fluidos e baixos custos de implementação e manutenção em comparação com outras técnicas alternativas. No método MQL, uma pequena quantidade de fluido (geralmente entre 50 e 200 ml/h) é aplicada diretamente à interface ferramenta/peça através de um jato de ar comprimido (ZHANG et al., 2017). A lubrificação é garantida pelo fluido que, devido à alta pressão e velocidade de aplicação, pode penetrar a barreira de ar formada ao redor do rebolo e alcançar a interface de corte, criando um filme lubrificante entre a peça e a ferramenta, garantindo excelentes características de lubrificação ao processo, enquanto o resfriamento é realizado principalmente pelo jato de ar comprimido (BELENTANI et al., 2013).

Segundo Pervaiz, Kannan, Kishawy (2018), as principais vantagens da técnica MQL são: menores custos com fluidos, devido a eliminação dos sistemas de armazenamento, tratamento e descarte de fluidos, obtenção de resultados similares aos do método convencional, menor consumo de energia devido ao sistema de aplicação mais simples, redução dos riscos ambientais e à saúde dos trabalhadores. Entretanto, os autores também citam algumas desvantagens, como remoção de cavacos ineficiente, alterações de performance significativas devido aos parâmetros de aplicação (posicionamento do bocal de aplicação, vazão etc.) e presença de névoa de fluidos (apesar de em menor quantidade em comparação ao método

convencional). Já Benedicto, Carou e Rubio (2017) acrescentam que os cavacos produzidos são praticamente isentos de fluidos de corte, facilitando sua reciclagem. Os autores também destacam que a troca do método convencional pela técnica de MQL não é trivial, sendo necessários diversos estudos e testes sobre os parâmetros de aplicação desta técnica, para que a qualidade da peça não seja prejudicada.

Segundo Sharma, Singh e Sorby (2015), a técnica de MQL não apenas melhora a questão ambiental, mas também pode melhorar a qualidade do processo. Entretanto, os parâmetros de usinagem, como profundidade de corte, velocidade de corte, etc. em interação com o grande número de parâmetros do MQL, como o tipo de lubrificante, a quantidade de bicos, posição, vazão, etc. tendem a tornar complexo o entendimento do processo, tornando necessário um melhor estudo desses fatores para possibilitar a ampla aplicação industrial desta técnica.

Vários estudos também mostraram que é possível obter resultados compatíveis ou até melhores com a técnica MQL em relação ao método convencional em processos convencionais de usinagem, como torneamento e furação (MEENA; EL MANSORI, 2011; MIA et al., 2018). Entretanto, no caso da retificação, onde há elevada geração de energia e altas temperaturas são atingidas, os resultados são divergentes, sendo que alguns estudos apontam que a técnica MQL pode apresentar desvantagens significativas, como a baixa capacidade de refrigeração e a remoção ineficiente de cavacos da interface de corte, o que ainda impede sua aplicação industrial completa, enquanto que outros trabalhos afirmam que a técnica MQL apresentou desempenho similar ou até superior ao do método convencional, sendo responsável por diminuir as forças de corte, o desgaste do rebolo e melhorar a qualidade da peça. Esta divergência ilustra que a aplicação de MQL na retificação ainda não é uma unanimidade, sendo necessários mais estudos acerca do tema. A seguir, alguns exemplos serão discutidos demonstrando conclusões antagônicas a respeito desta técnica em casos de retificação.

Segundo Hadad e Sadeghi (2012), apesar de apresentar excelente lubrificação, a técnica de MQL não é capaz de competir com o método convencional quanto à capacidade de refrigeração, o que pode ser o principal fator limitando para a utilização da técnica em processos de retificação em escala industrial. Resultados similares também foram obtidos por (Hadad et al. (2012), em seu trabalho sobre retificação plana do aço 100Cr6 endurecido, com rebolos convencional e de CBN. Neste estudo, os autores realizaram diversos testes experimentais e simulações computacionais do processo, calculando a partição de energia, ou seja, a quantidade de energia dissipada por cada componente (rebolo, peça, fluido e cavaco) durante o processo sob diversas condições de lubrificação (a seco, MQL e convencional). Eles concluíram

que a técnica MQL foi superior à usinagem à seco e se equiparou ao método convencional em certas condições. No entanto, os autores demonstraram que, na técnica MQL, a energia dissipada pela peça foi de 77% para o rebolo convencional e 46% para o rebolo de CBN, o que é muito superior em relação ao método convencional de lubrificação abundante, onde os resultados foram de 36% para o rebolo convencional e 14% para o CBN. Sendo assim, os autores afirmaram que a técnica MQL é uma potencial substituta do método convencional em processos de retificação, principalmente se aliada à rebolos superabrasivos, com ligante vitrificado e elevada porosidade, mas que a refrigeração insuficiente pode ser um importante fator limitante, sendo necessárias novas soluções para aprimoramento desta questão. No trabalho de (MAO et al., 2012) sobre a retificação plana de aço ABNT 52100, os autores chegaram à conclusões similares e afirmaram que o MQL é superior à usinagem à seco, porém ainda não é capaz de competir com o método convencional de aplicação abundante. Segundo Shokrani, Dhokia e Newman (2012), em sua revisão sobre processos de fabricação de materiais de difícil usinagem, a técnica de MQL deve ser considerada como um método de lubrificação ao invés de refrigeração, e que sua aplicação deve ser evitada em casos onde há elevada geração de calor.

No estudo de Oliveira et al. (2012), os autores constataram que a técnica MQL apresenta capacidade insuficiente de remoção de cavacos da interface de corte, o que pode levar ao empastamento da ferramenta, acelerando o seu desgaste e piorando a qualidade da peça usinada. Bianchi et al. (2018a) também chegaram a conclusões similares em seu trabalho de retificação cilíndrica de aço ABNT 4340 endurecido com rebolo convencional, onde os resultados obtidos com a técnica de MQL foram significativamente inferiores aos do método convencional, devido, segundo os autores, ao empastamento severo do rebolo.

Já Tawakoli et al. (2011) reportaram em seu trabalho de retificação plana do aço 100Cr6 endurecido com rebolo de CBN que a técnica MQL, sob certas condições, foi capaz de entregar resultados melhores que o método convencional, reduzindo as forças de corte e aumentando a qualidade superficial obtida. No trabalho de Barczak, Batako e Morgan (2010), os autores testaram a técnica MQL nos aços EN8, M2 e EN31, em diferentes condições de usinagem, e concluíram que o MQL é muito superior à usinagem à seco e pode se equiparar ou até mesmo superar o método convencional em certos casos, mas que para aços mais duros a aplicação desta técnica alternativa pode ser limitada, sugerindo mais estudos acerca do tema. Entretanto, Silva et al. (2020), em seu trabalho sobre retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 endurecido com rebolo convencional, observaram que a técnica MQL apresentou boa performance, sendo muito

superior a usinagem à seco e compatível com o método convencional e sugeriram que mais pesquisas devem ser realizadas para ampliar o entendimento sobre o processo.

Desta forma, pode-se constatar que a eficiência da técnica MQL em processos de retificação ainda não foi totalmente comprovada, não sendo unanimidade entre os pesquisadores da área. O grande número de variáveis envolvidas na aplicação da técnica, relacionadas ao bocal (tipo, posição, quantidade), ao fluido (tipo, vazão, pressão), ao rebolo (tipo, porosidade) e ao material usinado (dúctil, duro, tratado termicamente), influenciam diretamente os resultados obtidos, fazendo com que os mesmos variem consideravelmente de um trabalho para outro. De qualquer forma, as características de excelente lubrificação e baixas capacidades de refrigeração e de remoção de cavacos costuma ser observada na grande maioria dos trabalhos sobre retificação com a técnica MQL. Portanto, são necessárias novas pesquisas e soluções visando minimizar estes problemas e, conseqüentemente, aumentar a sua aplicação em processos de retificação.

Ao longo da última década, diversas soluções têm sido propostas para o aumento da eficiência da técnica MQL na retificação, como nano-fluidos (SHOKOOHI; SHEKARIAN, 2016), óleos de base vegetal (WANG et al., 2016a), refrigeração criogênica (ELANCHEZHIAN; PRADEEP KUMAR, 2018), refrigeração com tubo de vórtice (LOPES et al., 2019c; SABERI et al., 2016) e sistema de limpeza do rebolo (CAMERON; BAUER; WARKENTIN, 2010; OLIVEIRA et al., 2012).

A aplicação de nano-fluidos na técnica MQL tem apresentado diversos resultados interessantes, entretanto, o custo para sua fabricação é extremamente alto, e eventuais danos e impactos à saúde e ao meio ambiente causados por nanopartículas ainda não são totalmente compreendidos pelos pesquisadores (NAJIHA; RAHMAN; KADIRGAMA, 2016). A aplicação de óleos de base vegetal na técnica MQL também foi responsável por melhora de performance. Segundo Wang et al. (2016b), óleos vegetais apresentam melhores propriedades de lubrificação que os minerais, devido à presença de ácidos oleicos e ricinoleicos, além de serem biodegradáveis e, portanto, uma escolha mais sustentável. Baseado nestas conclusões, um fluido de base vegetal foi escolhido para utilização na técnica MQL deste trabalho, descrito na seção de Materiais e Métodos.

No caso da refrigeração criogênica, apesar do aumento de performance também apresentado, os problemas de elevado custo e riscos à saúde do operador (devido aos refrigerantes em baixíssimas temperaturas, geralmente gás carbônico ou nitrogênio) são grandes barreiras para aplicação desta técnica em escala industrial. Já a utilização de tubo de vórtice para refrigeração do ar é uma técnica mais economicamente viável, porém este

dispositivo apresenta algumas limitações significativas, como o fato de a pressão ser dependente da temperatura, ou seja, quanto menor a temperatura desejada, menor será a pressão de saída do dispositivo, o que pode comprometer o desempenho do processo (SABERI et al., 2016).

Finalmente, a utilização de um sistema para limpeza da superfície de corte do rebolo tem demonstrado resultados interessantes, sendo responsável por aumento da performance da técnica de MQL.

2.7. Sistema de Limpeza da superfície de corte do rebolo

A principal função de um sistema de limpeza do rebolo é a remoção dos cavacos da superfície da ferramenta, mantendo-a livre de impurezas e, conseqüentemente, preservando sua capacidade de corte por maior período, reduzindo a frequência de dressagem (SINOT; CHEVRIER; PADILLA, 2006). Desta forma, com a utilização da limpeza impede-se que os cavacos se misturem ao fluido e se alojem nos poros do rebolo, fenômeno conhecido como empastamento, que é extremamente prejudicial ao processo, visto que prejudica a lubrificação, diminui a capacidade de corte da ferramenta, aumenta a área de contato entre ferramenta e peça, levando ao aumento das forças e temperaturas na interface de corte (DI ILIO; PAOLETTI, 2000). O sistema consiste basicamente na aplicação de um jato de determinado fluido, geralmente o próprio fluido de corte ou ar comprimido, com elevada velocidade e pressão, diretamente na superfície de corte do rebolo, fazendo assim com que os cavacos gerados durante o processo de corte sejam transportados para fora da interface ferramenta/peça. Esta técnica apresenta uma interessante relação entre custo e benefício, visto que sua implantação e manutenção são simples e, no caso de utilização em conjunto com o MQL, onde notadamente existe o problema de baixa eficiência na remoção de cavacos, se torna uma excelente alternativa.

Cameron, Bauer e Warkentin (2010) pesquisaram a utilização de um jato de limpeza simultaneamente ao método convencional de aplicação de fluidos, na retificação plana do aço ABNT 4340 com rebolo de Al_2O_3 . Eles utilizaram fluido de corte para realizar a limpeza do rebolo, ao invés de ar comprimido. Os autores concluíram que a aplicação do sistema de limpeza melhorou significativamente o desempenho do processo. Heinzl e Antsupov (2012) também estudaram a utilização de jatos de fluido de corte como sistema de limpeza em conjunto com a aplicação convencional de fluidos, na retificação plana da liga de níquel Inconel 718, testando diferentes tipos de bocal de aplicação e concluíram que a utilização do sistema auxiliar de limpeza contribuiu para redução significativa do empastamento e, conseqüentemente, das

forças de corte. No entanto, com a crescente demanda por métodos mais sustentáveis de manufatura, a utilização de fluidos de corte para realizar a limpeza do rebolo não é a técnica mais adequada.

Lee et al. (2002) estudaram a aplicação de um jato de ar comprimido em conjunto com o método convencional de aplicação de fluidos, na retificação de carbetto de tungstênio com rebolo de diamante e constataram que a utilização do sistema de limpeza foi benéfica ao processo, reduzindo o empastamento do rebolo. Os autores destacaram que jatos de maior velocidade e pressão produzem melhores resultados, mas, no entanto, a aplicação do jato introduz uma força de resistência à rotação do rebolo e, dependendo da pressão adotada, pode induzir a ocorrência de vibrações, piorando a qualidade da peça obtida, portanto se faz necessária a utilização de pressões não excessivamente elevadas.

Oliveira et al. (2012) foram um dos pioneiros na proposição do sistema de limpeza através de um jato de ar comprimido em conjunto com a técnica de MQL. Os autores estudaram a aplicação deste sistema em diversas posições em relação ao rebolo na retificação cilíndrica de aço ABNT 4340 com rebolo de CBN, e concluíram que o ângulo de incidência de 30° em relação ao raio do rebolo apresentou os melhores resultados. Desde então, esta configuração tem sido utilizada em diversos trabalhos onde este sistema de limpeza por jato de ar comprimido é utilizado.

Rodriguez et al. (2019) avaliaram a aplicação de um jato de ar comprimido para limpeza do rebolo simultaneamente ao MQL (referida na literatura como MQL+WCJ) na retificação de aço ABNT 4340 endurecido, com um rebolo de Al_2O_3 . Os autores concluíram que a utilização do sistema de limpeza reduziu substancialmente o empastamento do rebolo, melhorando a qualidade da peça e prolongando a vida útil da ferramenta. O desempenho desta técnica foi superior ao do MQL tradicional e próximo ao do método convencional. Resultados similares também foram obtidos por Bianchi et al. (2018a, 2018b) em trabalhos que também pesquisaram a utilização do sistema de limpeza, porém com diferentes parâmetros de usinagem.

2.8. Variáveis de saída do processo de retificação

2.8.1. Rugosidade

A rugosidade corresponde ao conjunto de micro irregularidades presentes na superfície da peça resultantes do processo de fabricação (MARINESCU et al., 2006). A rugosidade é uma variável de saída extremamente importante no processo de retificação, visto que o principal objetivo deste processo é fabricar peças com excelente acabamento superficial e tolerância

geométrica (ZHOU et al., 2017). Além disso, a rugosidade tem influência direta na resistência à fadiga e à corrosão da peça (SHAO et al., 2015). O processo de retificação é indicado para operações de acabamento, em materiais geralmente endurecidos por tratamentos térmicos, com a finalidade de obter valores de rugosidade média no intervalo de $0,1\mu\text{m}$ a $1,6\mu\text{m}$, ou seja, baixa rugosidade e estreita tolerância (PUERTO et al., 2013).

Na retificação, a rugosidade é influenciada pela combinação de diversos fatores, como: tipo de grão, do tamanho da malha e do diâmetro do rebolo; do tipo e grau de recobrimento do dressador; das características estruturais e dinâmicas da máquina; da profundidade de corte, da velocidade do rebolo, do material da peça e do tipo de lubrificação (HECKER; LIANG, 2003). Segundo Puerto et al. (2013), os principais fatores que influenciam na rugosidade de uma peça retificada são os parâmetros de corte, as forças de corte, as condições de dressagem e o desgaste diametral do rebolo. O tamanho e a forma dos grãos na ferramenta de corte também apresentam relação direta com a redução da rugosidade, uma vez que quanto maior o número de arestas de corte em contato com a superfície a ser retificada, menor é a rugosidade obtida (BIGERELLE; GILJEAN; MATHIA, 2011).

De acordo com Weck, Hennes e Schulz (2001), a aplicação de fluido de corte reduz as forças e a temperatura do processo, e conseqüentemente, diminui a rugosidade da peça. Sieniawski e Nadolny (2016) observaram em sua pesquisa sobre retificação plana do aço CrV12 que a rugosidade aumenta quando a vazão de fluido de corte diminui e destacaram a importância da aplicação adequada da lubrificação para garantia da qualidade da peça usinada.

Holesovsky e Hrala (2004) destacaram que o material da peça a ser retificada, bem como os tratamentos térmicos aos quais foi submetida, devem ser considerados, pois as propriedades do material, tais como resistência mecânica, dureza e condutividade térmica também influenciam na qualidade superficial.

Atualmente, existem diversos parâmetros para quantificar a rugosidade de uma superfície, sendo o mais comum a rugosidade média (R_a), que consiste na média aritmética dos valores absolutos de picos e vales ao longo do percurso de medição. Entretanto, em função das características desejadas para a peça usinada, diversos outros parâmetros podem ser utilizados, inclusive tridimensionais (RUZZI et al., 2020).

2.8.2. Circularidade

Segundo Cho e Tu (2001), a circularidade é uma variável importante em processos de retificação, visto que afeta diretamente o acoplamento de peças. O campo de tolerância da

circularidade é limitado na seção de medição por dois círculos concêntricos, afastados de uma distância t , que é o valor de tolerância, especificado em função do projeto do componente.

De acordo com Kwak (2005), a circularidade de uma peça em processos de retificação é afetada principalmente por efeitos térmicos e pela rigidez do equipamento. O processo de retificação gera alta energia, que em grande parte é dissipada pela peça, ocasionando dilatações térmicas.

Segundo Souza et al. (2004), os desvios de circularidade podem ser interpretados como as diferenças entre os diâmetros da peça fabricada e da peça projetada, que devem ser menor que a tolerância especificada pelo projeto. Os autores destacaram a importância da utilização de fluidos de corte, principalmente em processos de elevada geração de energia, como a retificação, para refrigeração e lubrificação da interface de corte, reduzindo assim as forças e temperaturas do processo e, conseqüentemente, os desvios de circularidade da peça usinada.

Saglam, Unsacar e Yaldiz (2005) estudaram a retificação cilíndrica do aço ABNT 1050, variando velocidade da peça, velocidade de avanço e profundidade de corte e concluíram que a circularidade é mais influenciada por velocidade de corte, força de retificação e profundidade de corte, enquanto a rugosidade é mais relacionada à velocidade de avanço e velocidade da peça.

Segundo Batako e Goh (2014), a ocorrência de vibrações durante o processo de retificação cilíndrica de mergulho é um problema crítico, afetando a precisão geométrica da peça usinada. Fricker, Speight e Pearce (2006) citam como principais fatores para o aumento dos desvios de circularidade a ocorrência de vibrações externas e o desbalanceamento do rebolo, mas que esta variável também é sensível a mudanças nas condições de usinagem, como velocidades de corte e da peça.

De acordo com Lopes et al. (2018), os desvios de circularidade são de grande importância em processos de retificação cilíndrica, sendo causados principalmente por deformações elásticas do conjunto ferramenta-peça, perfil irregular do rebolo e remoção irregular de material. Entretanto, os autores afirmam que a aplicação de um tempo de centelhamento (“spark-out”) e a dressagem adequada da ferramenta podem minimizar estes problemas, reduzindo os desvios de circularidade.

Segundo Rodriguez et al. (2019), os principais fatores que influenciam a circularidade de uma peça estão bem estabelecidas na literatura, sendo: fixação da peça, desbalanceamento do rebolo, rigidez do equipamento e deformações elásticas da peça. Além disso, o empastamento do rebolo reduz sua capacidade de corte e aumenta a área de contato entre

ferramenta e peça, aumentando as forças de corte e, conseqüentemente, os desvios de circularidade.

2.8.3. Desgaste diametral do rebolo

De acordo com Xu (2001), o desgaste diametral do rebolo ocorre basicamente devido às interações tribológicas entre as superfícies da ferramenta e da peça, que geram altas cargas mecânicas e térmicas, resultando na degradação dos grãos abrasivos e do material ligante e, conseqüentemente, no desgaste da ferramenta. Segundo Marinescu et al. (2006), os principais mecanismos de desgaste presente no processo são atrito, adesão, interação química e difusão. Oliveira, França e Wang (2008) demonstraram que a presença de vibrações durante o processo aumenta o desgaste do rebolo.

O desgaste do rebolo é uma variável de extrema relevância na indústria metalmeccânica, visto que está diretamente ligado à produtividade do processo. Quanto menor o desgaste, menor a necessidade de dressagens e de substituições de ferramenta e, portanto, maior a produtividade (RODRIGUEZ et al., 2019).

Diversas técnicas podem ser utilizadas para quantificar o desgaste do rebolo, como as de contato, através de equipamento específico que realiza medições diretamente na superfície de corte da ferramenta, similares à um rugosímetro; ou através de método indireto, como o de impressão do perfil do rebolo desgastado em um corpo de prova de aço de baixa dureza (geralmente ABNT 1020), que posteriormente é analisado utilizando-se um rugosímetro; e as técnicas de não contato, através de microscopia óptica ou eletrônica de varredura, que apresentam como principal desvantagem a necessidade de retirada de amostra do rebolo, inutilizando a ferramenta, ou ainda através do monitoramento de sinais de emissão acústica e potência, que podem ser relacionados ao desgaste e da utilização de scanners de alta resolução, que mapeiam a superfície do rebolo, permitindo a observação e quantificação do desgaste. Sendo assim, diversas pesquisas têm como objetivo o desenvolvimento de novos métodos de medição do desgaste do rebolo, priorizando técnicas não destrutivas (MCDONALD; BAUER; WARKENTIN, 2016).

Segundo Malkin e Guo (2008), o desgaste total do rebolo é frequentemente expresso através da relação G , definida como a taxa volumétrica de material removido em relação ao volume desgastado do rebolo, conforme demonstrado na Equação 11. Quanto maior o valor da relação G , mais eficiente o processo de retificação. :

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (11)$$

Onde: Z_w e Z_s correspondem ao volume do material removido e volume gasto do rebolo, respectivamente.

De acordo com Malkin e Guo (2008), o desgaste do rebolo é associado à qualidade da peça usinada, sendo que quanto maior o desgaste da superfície de corte da ferramenta, menor a qualidade obtida. A utilização de fluidos de corte pode aumentar a relação G , pois reduz as temperaturas do processo, minimizando a degradação térmica aos grãos abrasivos e material ligante.

Segundo Choi et al. (2008), o desgaste do rebolo afeta negativamente a performance do processo, e está diretamente relacionado com o parametro de espessura equivalente de corte (h_{eq}). Quanto maior a espessura, maior o desgaste e, portanto, menor a relação G .

Agarwal (2019) enfatiza a influência do empastamento no desgaste da ferramenta. Os cavacos alojados nos poros do rebolo dificultam a penetração do fluido de corte, reduzindo a lubrificação, e podem também cobrir parcialmente os grãos abrasivos, diminuindo a capacidade de corte da ferramenta e aumentando a área de contato entre ferramenta e peça, o que leva ao aumento das forças e temperatura do processo, causando degradações térmicas nos grãos abrasivos e no material ligante, que aceleram o processo de desgaste. Além do mais, as elevadas forças e temperaturas podem causar uma série de danos térmicos à peça usinada, como queimas, microtrincas, alterações microestruturais e tensões residuais de tração. Sendo assim, o controle do desgaste do rebolo é de vital importância na retificação, visto que afeta negativamente o processo.

De acordo com Wegener et al. (2011), a dressagem adequada do rebolo é de fundamental importância, influenciando, entre outros fatores, o desgaste do rebolo. A dressagem tem como principal objetivo retirar a camada desgastada da superfície da ferramenta, restaurando sua capacidade de corte.

2.8.4. Potência elétrica consumida

Segundo Guo et al. (2007), a potência no processo de retificação é formada por três componentes: deformação elástica, deformação plástica e formação de cavacos. Além do mais, Oliveira et al. (2009) classificam a potência consumida como uma variável relevante a ser considerada nas análises de sustentabilidade de processos de usinagem, visto os impactos e custos ambientais associados à geração de eletricidade.

De acordo com Bianchi et al. (2018a), a potência consumida durante o processo de retificação pode ser monitorada através da aquisição dos dados de energia elétrica consumida, transformando os sinais de corrente e tensão elétrica emitidos pelo motor da retificadora em sinal de potência.

Desta forma, o monitoramento da potência de corte durante o processo de retificação se caracteriza como uma técnica não destrutiva, podendo auxiliar na estimativa das forças e temperaturas na zona corte e na prevenção de danos térmicos, visto que alterações na potência podem indicar danos causados à peça (BATISTA DA SILVA et al., 2018).

Kwak, Sim e Jeong (2006) concluíram que a profundidade de corte interfere de forma mais expressiva no consumo de potência do que os demais parâmetros avaliados de rotação da peça e velocidade de corte. De acordo com Sutowski (2017), a área de contato entre o rebolo e a peça aumenta com o aumento da profundidade de corte, fazendo com que as forças de corte normal e tangencial sejam aumentadas, exigindo maior potência para formação do cavaco.

Malkin e Guo (2007) destacam que o aumento na potência consumida também pode estar relacionado à formação de camada branca na superfície da peça retificada, ao comparar dados de microdureza com de potência consumida em peças com e sem formação de camada branca.

Recentemente, Macerol, Franca e Krajnik (2020) observaram a influência do formato dos grãos abrasivos na retificação com rebolos de CBN com ligante vitrificado, e constataram que grãos mais longos ou afiados consomem menor potência, devido à menor área de contato entre grãos e superfície da peça.

2.8.5. Emissão acústica

A emissão acústica (EA) está diretamente relacionada aos fenômenos físicos que ocorrem durante o processo, como atrito, deformações elásticas e plásticas e formação de cavacos, além de estar associada às condições de superfície da ferramenta e da peça (KISHAWY et al., 2018).

De acordo com He et al. (2019), o monitoramento da emissão acústica é frequentemente utilizado em processos de retificação, visto que é uma técnica não invasiva que permite o acompanhamento da operação em tempo real. Aguiar et al. (2006), destaca como uma de suas principais aplicações a prevenção e detecção de queimas.

Segundo Lee et al. (2006), a utilização uso de EA como ferramenta de caracterização e monitoramento de processo em tempo real pode servir como um meio de vincular estreitamente os estágios de fabricação e controle de qualidade e, com o desenvolvimento de novas

tecnologias, em um ambiente de fabricação totalmente automatizado, a etapa de controle de qualidade poderá ser totalmente eliminada com monitoramento e controle do processo ideais.

Já Babel, Koshy e Weiss (2013) destacam que a emissão acústica em retificação vêm ganhando relevância nos últimos anos, devido ao aprimoramento dos sensores, permitindo aplicações no monitoramento de condições do rebolo, vibrações e danos térmicos. Batako e Goh (2014) propõem um potencial uso da emissão acústica na detecção de desvios de circularidade em processos de retificação cilíndrica.

Lopes et al. (2017) apresentaram em seu estudo sobre dressagem uma técnica que permite determinar o correto momento de finalizar o processo, através do monitoramento dos sinais de emissão acústica gerados durante a operação.

2.8.6. Microscopias e microdureza

As técnicas de microscopia são importantes ferramentas para a análise da integridade de superfícies retificadas, amplamente utilizadas para verificação de possíveis danos térmicos à peça, como a ocorrência de queimas ou micro trincas (MALKIN; GUO, 2008). Dentre as mais utilizadas, destaca-se as técnicas de microscopia óptica, que permite a visualização da microestrutura do material, e a de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que torna possível a visualização da superfície usinada em alta resolução e com percepção de profundidade.

Recentemente, a microscopia confocal também tem sido utilizada por pesquisadores em análises na área de retificação, por permitir uma visualização tridimensional da superfície usinada, o que colabora para a melhor compreensão dos mecanismos de interação entre grãos abrasivos e superfície da peça, como, por exemplo, nos trabalhos de (ZHAO et al., 2019) e (ZHOU et al., 2018).

Além das aplicações relativas à superfície usinada, as técnicas de microscopia também podem ser aplicadas na superfície de corte do rebolo, permitindo diversas análises, como quantificação de grãos, de desgaste e geração de modelos para utilização em simulações computacionais (BUTLER et al., 2002).

Neste trabalho, estas três técnicas de microscopia foram utilizadas em conjunto na análise das superfícies retificadas, enquanto que a superfície de corte do rebolo foi avaliada por microscopia óptica, permitindo uma ampla análise da integridade superficial das peças retificadas e da superfície da ferramenta que, em conjunto com a avaliação das demais variáveis monitoradas, possibilitam um melhor entendimento do processo.

De modo complementar às análises microscópicas, usualmente são realizados testes de microdureza nas peças, que podem ser tanto na própria superfície usinada da peça quanto em sua seção transversal, em diferentes distancias em relação à superfície usinada. A alteração da microestrutura do material, que pode ocorrer devido às altas temperaturas envolvidas nos processos de usinagem, acarreta mudanças significativas em sua dureza e, mesmo em casos onde não houve mudança de fase, pode ocorrer o super-revenimento do material, levando ao seu amolecimento e, conseqüentemente, perda de resistência mecânica. Os testes de microdureza permitem a detecção destas situações (BATISTA DA SILVA et al., 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados e descritos os equipamentos e materiais utilizados, os procedimentos realizados, os parâmetros de entrada aplicados e as variáveis de saída analisadas durante e após a execução dos experimentos. Os ensaios de retificação foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) – UNESP.

3.1. Equipamentos, Materiais e Procedimentos

3.1.1. Retificadora

As operações de retificação foram realizadas em uma retificadora cilíndrica externa de mergulho, modelo RUAP515H, fabricada pela companhia Sulmecânica, equipada com comando numérico computadorizado (CNC) fornecido pela empresa Fagor, utilizado no acionamento do eixo “X”. Foram utilizadas duas programações CNC distintas, para realização dos ensaios de retificação e para impressão do perfil do rebolo desgastado, apresentadas respectivamente no Apêndice A: Programa para retificação dos corpos de prova e Apêndice B: Programa para impressão do desgaste do rebolo.

3.1.2. Rebolo e dressador

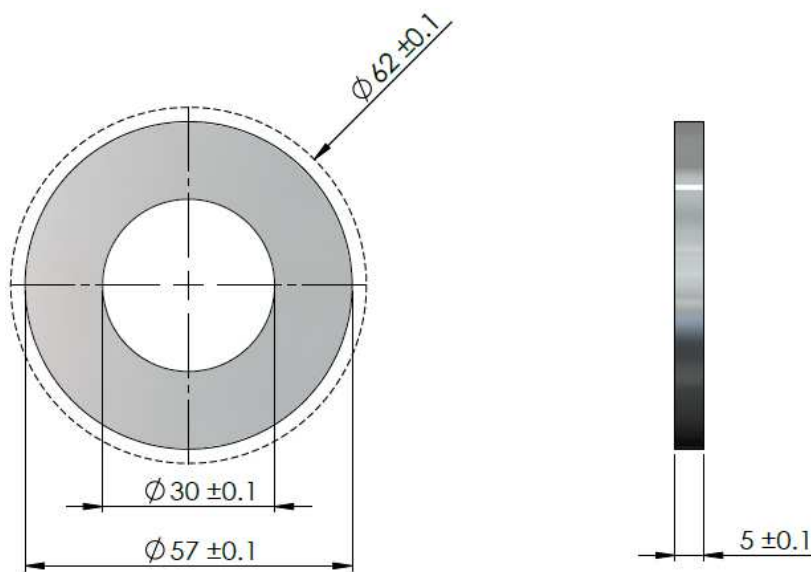
Na realização dos ensaios de retificação, foi utilizado um rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN), com ligante vitrificado, modelo SBN151Q12VR2, da fabricante Nikon Ferramentas de Corte, com 350 mm de diâmetro externo, 127 mm de diâmetro interno, 15 mm de largura e 5 mm de espessura da camada abrasiva. A velocidade de corte (v_s) utilizada foi de 32 m/s e a velocidade de avanço (v_f) foi de 0,50 mm/min.

O procedimento de dressagem foi realizado com um dressador multigranular do tipo conglomerado, fabricado pela empresa Master Diamond. Trata-se de um afiador composto por diamantes em uma matriz metálica de forma paralelepipedica, de dimensões 15 mm x 8 mm x 10 mm. As condições de dressagem utilizadas foram: velocidade de corte (v_s) = 32 m/s, velocidade de dressagem (v_d) = 500 mm/min, profundidade de dressagem por passada (a_d) = 2 μ m, ciclos de dressagem = 40 e profundidade de dressagem total = 80 μ m.

3.1.3. Corpos de prova

Os corpos de prova foram fabricados com aço ABNT 4340, fornecido pela empresa Villares Metals S.A, em formato anelar, com $62 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ de diâmetro externo, $30 \pm 0.1 \text{ mm}$ de diâmetro interno e $5 \pm 0.1 \text{ mm}$ de espessura, conforme apresentado na Figura 12:

Figura 12: Dimensões dos corpos de prova (em milímetros).



Fonte: Autor, 2020.

A composição química do material utilizado é apresentada na Tabela 2:

Tabela 2: Composição química do aço ABNT 4340.

Elemento	C	Cr	Mn	Mo	Ni	Si
(% em peso)	0.40	0.80	0.70	0.25	1.80	0.25

Fonte: Villares Metals S.A, 2020.

Após a fabricação, os corpos de prova foram submetidos aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, para aumento de dureza, realizados pela empresa JSC Tratamento Térmico em Metais Ltda. A têmpera consistiu no aquecimento a 845°C por 60 minutos, de maneira a obter a austenitização total da estrutura, seguido por resfriamento em óleo à temperatura ambiente, o que resultou em estrutura final martensítica ao material. Na sequência, para alívio de tensões, foi realizado o revenimento, onde as peças foram aquecidas a 350°C por 120 minutos e resfriadas na sequência em atmosfera à temperatura ambiente, obtendo a estrutura final de martensita revenida.

Os corpos de prova foram ensaiados para determinação de suas respectivas durezas Rockwell C (HR_C), conforme a norma ASTM E18-08b, antes e depois da realização dos tratamentos térmicos. Foram realizadas cinco medições em cada peça para maior confiabilidade dos resultados. A Tabela 3 apresenta os valores médios obtidos para cada condição:

Tabela 3: Dureza dos corpos de prova antes e após tratamentos térmicos.

Material	Dureza
Aço ABNT 4340, sem tratamento térmico	21 HR _C (243 HV)
Aço ABNT 4340, temperado e revenido	55 HR _C (600 HV)

Fonte: Autor, 2020.

3.1.4. Sistema de lubrificação convencional

O sistema de lubrificação convencional foi composto por reservatório de fluido com capacidade de 100 litros, bomba centrífuga, medidor de vazão, válvulas de esfera, mangueira e bocais de aplicação. Nesta técnica, o fluido é aplicado de maneira abundante e com baixa pressão. O controle da vazão foi realizado através de válvulas de esfera, posicionadas na entrada do medidor de vazão e antes do bocal. Conforme se abria ou se fechava as válvulas, a vazão era aferida no display do medidor de vazão tipo turbina, modelo SVTG DMY-2030, da marca Contech.

O fluido de corte utilizado foi o óleo emulsionável semissintético Rocol Ultracut 370 concentrado, fabricado pela empresa ITW Chemical Products Ltda., diluído em água na proporção de 3%, ou seja, uma parte de óleo para cada trinta e duas partes de água, conforme orientação do fabricante.

Os bocais de aplicação de fluido utilizados foram os originais da retificadora, do tipo Fixoflex, de seção circular com 6,3 mm de diâmetro. A vazão utilizada foi de 17 l/min e a pressão de 0,2 MPa.

3.1.5. Sistema de lubrificação por mínima quantidade de lubrificante (MQL)

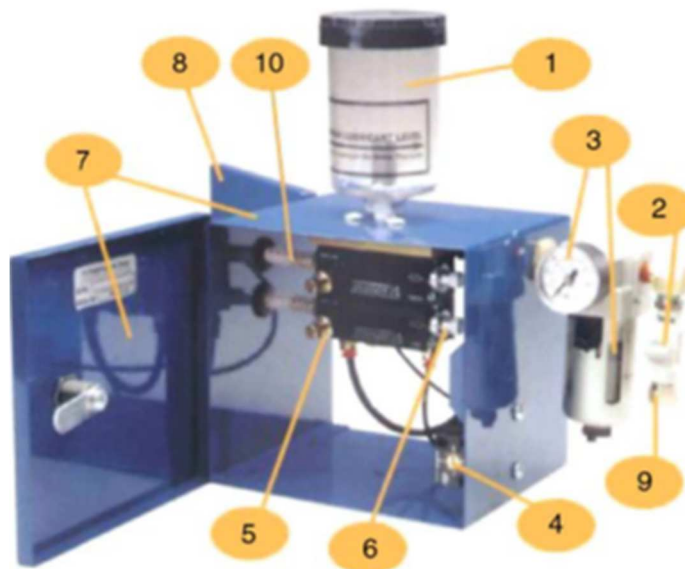
O sistema de lubrificação através da técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) utilizado foi composto por compressor de ar, filtro de ar, regulador de pressão do ar, medidor de vazão de ar, mangueiras, dispositivo dosador de fluido e bocal de aplicação.

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 0,7 MPa e a velocidade utilizada foi de 32 m/s, mesmo valor da velocidade de corte, para possibilitar que o fluido rompa a barreira aerodinâmica criada pela rotação do rebolo e penetre adequadamente na interface de corte.

O dispositivo dosador utilizado era do modelo Accu-Lube 79053D, fabricado pela ITW Chemical Products Ltda, conforme ilustrado na Figura 13. Neste dispositivo, fluido e ar comprimido são conduzidos separadamente até o bocal de aplicação e suas vazões são controladas individualmente.

Figura 13: Dispositivo dosador MQL Accu-Lube 79053D: 1) Reservatório de fluido de corte, 2) válvula, 3) filtro de ar com manômetro, 4) gerador de frequência, 5) bombas pneumáticas para ar e fluido de corte, 6) botões de ajuste de vazão de ar e fluido, 7) chassi metálico, 8) base magnética para fixação rápida, 9) entrada de ar comprimido, 10) saídas de ar e fluido.

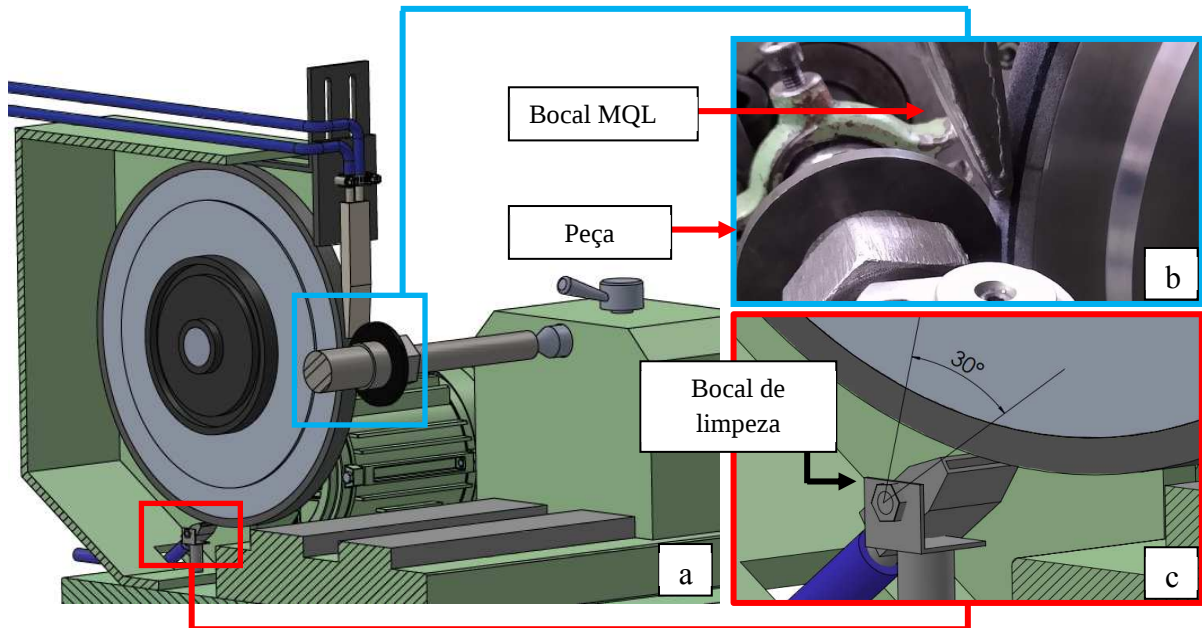


Fonte: Adaptado de (DA SILVA et al., 2007).

O fluido de corte utilizado no sistema MQL era composto a partir de óleo vegetal, biodegradável, associado a aditivos antioxidantes, modelo Accu-Lube LB1100, fabricado pela ITW Chemical Products Ltda. As vazões de fluido de corte adotadas foram de 40 ml/h, 80 ml/h e 160 ml/h.

O bocal utilizado para aplicação do fluido pela técnica MQL era semelhante ao empregado por (SILVA et al., 2005), fabricado em aço carbono. Neste dispositivo, ar e óleo entram separadamente, através de dois difusores, que possuem um furo central, por onde entra o óleo, e seis furos adjacentes, por onde entra o ar, conforme ilustrado na Figura 14. O ar e o óleo somente se misturam no interior do bocal, onde ocorre a atomização do fluido e,

Figura 15: Visão esquemática: a) operação de retificação com MQL e Limpeza: b) Detalhe do bocal de MQL, c) Detalhe do bocal de Limpeza.



Fonte: Autor, 2020.

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 à 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.

3.1.8. Sistema de aquisição de dados de emissão acústica

Para o monitoramento da emissão acústica gerada durante o processo de retificação, foi utilizado um sensor piezoelétrico conectado a uma unidade de tratamento de sinais, modelo DM 42, fabricados pela empresa SENSIS. Estes equipamentos são capazes de monitorar em tempo real o sinal de emissão acústica emitido através do seu valor quadrático médio - RMS (Root Mean Square). O sensor capta as variações das tensões de deformação provenientes da retificação e as envia para o módulo de tratamento de sinais, que as converte em sinais de

tensões elétricas, que são então transmitidos à uma placa de aquisição de dados A/D, instalada em um notebook de maneira direta, sem a necessidade de nenhuma manipulação de dados. Optou-se pelo posicionamento do sensor o mais próximo possível da peça, no cabeçote móvel da retificadora, próximo ao contraponto, minimizando possíveis interferências. Foram realizados diversos ensaios preliminares para determinar a melhor regulagem do sistema de medição da EA e obter boa resposta do nível do sinal RMS sem que este saturasse. Os parâmetros utilizados foram: ganho de sinal = 5; redução de ruído = 0; filtro passa alta frequência de corte = 10 K e constante de tempo = 1 ms. Finalmente, os sinais são tratados pelo software LabView® 7.1 (Laboratory Virtual Instrument), da empresa National Instruments, obtendo-se os valores de emissão acústica emitidos durante o ensaio.

3.2. Procedimento de ensaio e parâmetros de entrada

Os ensaios realizados foram de retificação cilíndrica externa de mergulho. Todas as condições de usinagem foram mantidas constantes, com exceção da técnica de lubrificação aplicada (convencional, MQL e MQL com sistema de limpeza) e da vazão de fluido de MQL (40 ml/h, 80 ml/h e 160 ml/h), somando sete condições e, para cada condição, três ensaios foram realizados para aumentar a confiabilidade estatística das análises, totalizando vinte e uma operações de retificação. As condições de usinagem estão descritas na Tabela 4. A matriz experimental dos ensaios está demonstrada na Figura 16. A programação CNC utilizada está descrita no Apêndice A: Programa para retificação dos corpos de prova.

Tabela 4: Condições de retificação.

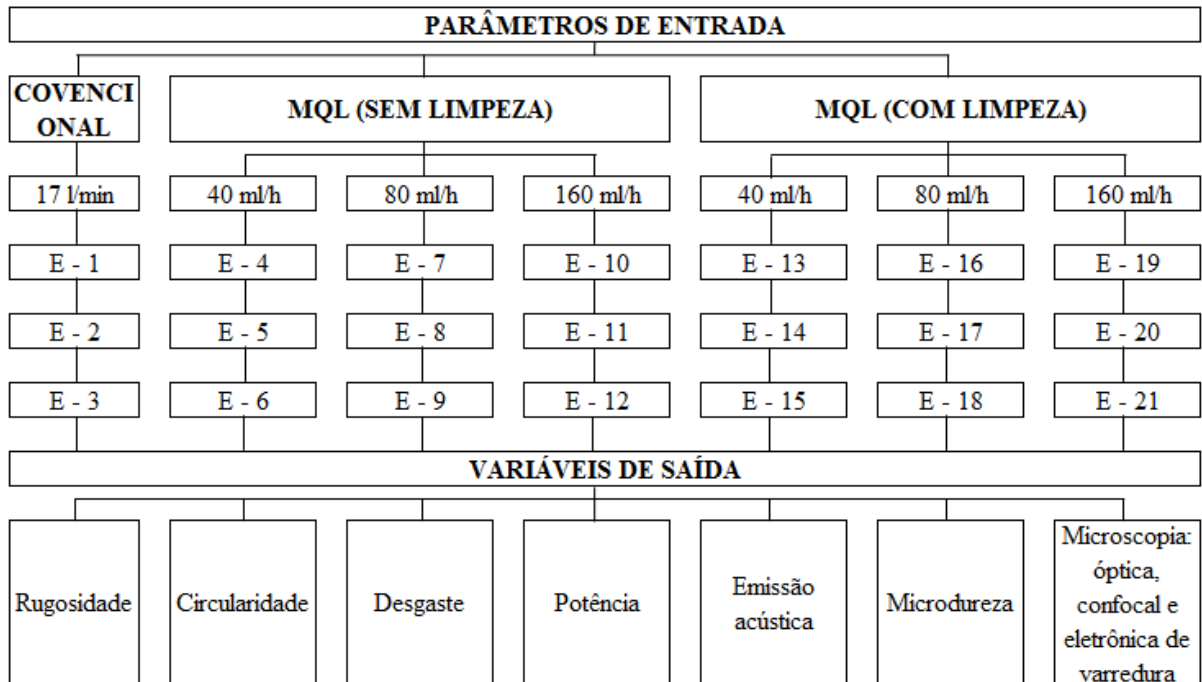
Equipamento	Retificadora cilíndrica externa de mergulho, modelo RUAP515H, fabricada pela companhia Sulmecânica, equipada com comando numérico computadorizado (CNC) fornecido pela empresa Fagor
Processo de retificação	Cilíndrica externa de mergulho
Rebolo	Nitreto de boro cúbico (CBN), com ligante vitrificado, modelo SBN151Q12VR2, da fabricante Nikon Ferramentas de Corte, com 350 mm de diâmetro

	externo, 127 mm de diâmetro interno, 15 mm de largura e 5 mm de espessura da camada abrasiva
Velocidade do rebolo (v_s)	32 m/s
Avanço radial (v_f) / Taxa de remoção	0.50 mm/min / 1.62 mm ³ /s
Profundidade de corte (a) / Quantidade de ciclos de retificação	0.1 mm / 50 ciclos, totalizando 5 mm de redução no diâmetro da peça
Largura de retificação (b)	5 mm
Peça	Fabricada em aço ABNT 4340, temperado e revenido, em formato anelar, com 62 mm $\pm$ 0.1 mm de diâmetro externo, 30 $\pm$ 0.1 mm de diâmetro interno e 5 $\pm$ 0.1 mm de espessura
Rotação da peça (n_w)	81 rpm
Condição de lubrificação	Convencional
	MQL (40 ml/h)
	MQL (40 ml/h) + Sistema de limpeza
	MQL (80 ml/h)
	MQL (80 ml/h) + Sistema de limpeza
	MQL (160 ml/h)
	MQL (160 ml/h) + Sistema de limpeza
Fluido de corte para método convencional	Óleo semissintético emulsificável Rocol Ultracut 370, fornecido pela ITW Chemical Products Ltda, diluído em água na concentração de 3% (1:32)

Vazão de fluido de corte no método convencional	17 l/min
Fluido de corte para técnica de MQL	Óleo vegetal biodegradável associado a aditivos antioxidantes Accu-Lube LB1100, fabricado pela ITW Chemical Products Ltda.
Vazão de fluido de corte na técnica de MQL	40 ml/h 80 ml/h 160 ml/h
Pressão do ar na técnica de MQL	0.7 MPa
Velocidade do ar na técnica de MQL	32 m/s
Sistema de limpeza do rebolo	Jato de ar comprimido
Pressão do ar no sistema de limpeza do rebolo	0.8 MPa
Ângulo de incidência do Sistema de limpeza do rebolo	30°
Tempo de centelhamento (t_s)	8 s
Dressador	Conglomerado de diamante, dimensões de 15 mm x 8 mm x 10 mm
Profundidade de dressagem (a_d)	0.080 mm (40 ciclos – 0,002 mm por ciclo)
Velocidade de dressagem (v_d)	500 mm/min

Fonte: Autor, 2020.

Figura 16: Matriz de ensaios.



Fonte: Autor, 2020.

Inicialmente, o rebolo foi devidamente balanceado, instalado na retificadora e dressado conforme condições apresentadas na Tabela 4. O corpo de prova então foi posicionado e fixado pela sua lateral em um eixo e colocado na retificadora em um sistema entre pontas. O rebolo foi então aproximado à peça até tocá-la, e afastado a uma distância de 0,1 mm na direção radial. Feito isso, os sistemas de aquisição de emissão acústica e consumo de potência elétrica foram ligados e a retificadora acionada com a condição de lubrificação desejada, iniciando-se a operação de retificação. Cada ensaio tinha a duração de 50 ciclos, com profundidade de corte de 0,1 mm por ciclo, totalizando 5 mm de redução no diâmetro da peça e, entre cada ciclo, um tempo de centelhamento de 8 segundos foi aplicado. Ao término dos ensaios, a retificadora e os sistemas de aquisição de emissão acústica e de potência elétrica eram desligados. Ao término de cada ensaio, a peça foi retirada e, utilizando-se um gravador com ponta de aço temperado, foi identificada de acordo com a condição de lubrificação utilizada e, em seguida, limpa e armazenada para posteriores análises. Além disso, a região utilizada da superfície de corte do rebolo foi inspecionada e fotografada com microscópio óptico portátil. Como a largura do rebolo era maior que a da peça, foi possível realizar dois ensaios utilizando a superfície de corte antes da execução de nova dressagem, somente deslocando-se a posição relativa entre ferramenta e peça. Então, sempre após dois ensaios, o perfil do rebolo desgastado foi impresso no corpo de prova de aço ABNT 1020, devido à baixa dureza desse material, para posterior

análise de desgaste diametral e, na sequência, foi realizada nova dressagem para continuidade dos próximos testes, de modo que a condição inicial da superfície de corte fosse sempre a mesma no início de cada ensaio. A programação CNC utilizada na impressão do perfil desgastado do rebolo é apresentada no Apêndice B - Programa para impressão do desgaste do rebolo.

3.3. Análise das variáveis de saída

Nesta seção, serão apresentadas e descritas as análises utilizadas para a caracterização das peças obtidas e comparação dos diferentes métodos de lubrificação aplicados.

As variáveis de saída avaliadas após os ensaios foram: rugosidade, desvios de circularidade, desgaste diametral do rebolo, microdureza, microscopias óptica, eletrônica de varredura e confocal das peças retificadas e microscopia óptica da superfície de corte do rebolo.

As variáveis monitoradas durante os ensaios foram: emissão acústica e potência elétrica consumida.

3.3.1. Rugosidade

A rugosidade da superfície retificada foi medida em um rugosímetro portátil, modelo Surtronic 3⁺ e um software TalyProfile, versão Lite 3.1.4, fornecidos pela empresa Taylor Hobson. Este instrumento possui agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 5 μm , resolução de 0,01 μm e trabalha com carga de 150 a 300 gf. O conjunto é anexado a um microcomputador, utilizando-se a interface de transmissão para coleta de dados RS232. O equipamento é capaz de fazer medições de rugosidade nos parâmetros Ra, Ry, Rz e Rq, sendo possível configurar o comprimento de amostragem (cut-off) e o número de cut-offs de uma medição. No presente trabalho, o parâmetro Ra (rugosidade média aritmética) foi escolhido para análise da rugosidade. O equipamento foi aferido e calibrado antes das medições, configurado com cut-off de 0,25 mm, comprimento de amostragem de 1,25 mm e com filtro 2CR - fase corrigida. O apalpador do equipamento foi posicionado de forma que a medição fosse praticada no sentido axial da peça. Antes da aferição da rugosidade, os corpos de provas foram limpos através de uma sequência de banhos, respeitando a ordem crescente de volatilidade dos líquidos, na seguinte sequência: querosene, thinner, álcool etílico P. A. e álcool metílico P. A.

Para a realização das medições, o corpo de prova foi fixado em um eixo, que por sua vez foi preso em um bloco em “V”. Foram executadas 3 medições em cada peça, em regiões

distintas e equidistantes, ou seja, com 120 graus de espaçamento entre elas, e o valor médio e o desvio padrão foram calculados.

3.3.2. Desvios de circularidade

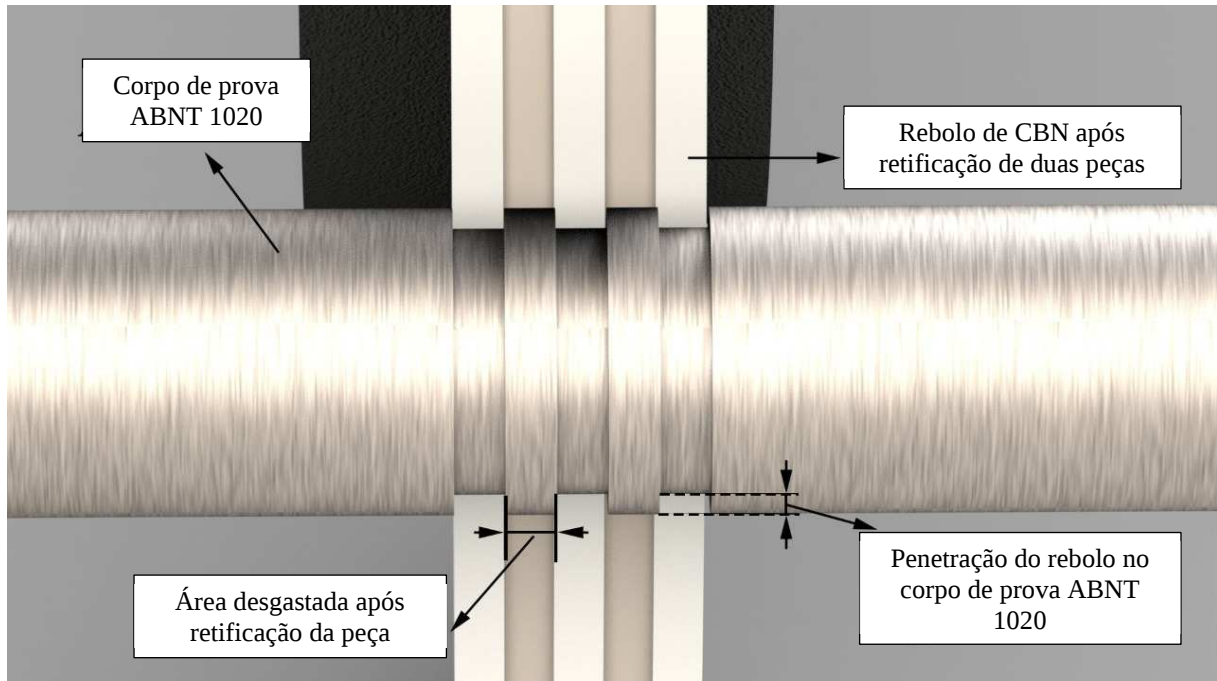
Os desvios de circularidade foram medidos através de um circularímetro Talyrond 31C, fabricado pela empresa Taylor Hobson, aferido e calibrado antes do início das medições. A precisão deste equipamento é de 0,03 μm e sua capacidade máxima de medição é de 370 mm de diâmetro e 225 mm de altura. O equipamento é composto por um conjunto braço/coluna, que possibilita o movimento nos eixos vertical e horizontal, um apalpador com ponta de rubi, que realiza o contato com a peça para obtenção dos desvios de circularidade e uma mesa giratória, que é alimentada através de um sistema de ar comprimido. Antes da entrada no equipamento, o ar comprimido passa por um registro e um filtro de ar, permitindo a regulação da pressão do sistema.

Assim como realizado nas medições de rugosidade, as peças foram submetidas a banhos de limpeza antes da aferição dos desvios de circularidade, para impedir que pequenas partículas abrasivas influenciassem na medição deste parâmetro. Após a limpeza, a peça foi fixada em uma placa de três castanhas e foram executadas três medições distintas, deslocadas de 0,75 mm no sentido axial entre cada medição, e o valor médio e o desvio padrão foram calculados.

3.3.3. Desgaste diametral do rebolo

A medição do desgaste diametral do rebolo foi realizada utilizando-se o método indireto. Nesta técnica, após o término de dois ensaios, o rebolo desgastado era utilizado para retificação de um corpo de prova de aço ABNT 1020, com 35 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento. Desta forma, o perfil da ferramenta era impresso na peça, tornando-se possível a análise do desgaste ocorrido durante os ensaios, ao comparar-se as regiões gastas com as não gastas da ferramenta, conforme ilustrado na Figura 17. A retificação do corpo de prova foi realizada com lubrificação convencional, profundidade de corte de 0.5 mm, e todos os demais parâmetros de entrada iguais aos utilizados nos ensaios, apresentados anteriormente na Tabela 4.

Figura 17: Visão esquemática da impressão do perfil do rebolo desgastado no corpo de prova de aço ABNT 1020.



Fonte: Autor, 2020.

Após a retificação, o cilindro de aço ABNT 1020 contendo o perfil da ferramenta foi analisado utilizando-se o rugosímetro portátil, modelo Surtronic 3+ e o software TalyMap, versão Lite 3.1.4, fornecidos pela empresa Taylor Hobson. Os parâmetros adotados foram cut-off de 0,25 mm, comprimento de amostragem de 1,25 mm e filtro tipo Gaussiano, para separar rugosidade, ondulação e erro de forma das amostras. Foram executadas 3 medições em cada peça, em regiões distintas e equidistantes, ou seja, com 120 graus de espaçamento entre elas, e o valor médio e o desvio padrão foram calculados.

3.3.4. Preparação das amostras para análise metalográfica e microdureza

Para a realização das análises de microscopia óptica e de microdureza, foi necessária a preparação prévia dos corpos de prova. Para cada condição de lubrificação utilizada, uma peça foi escolhida, totalizando 7 amostras (convencional, MQL – 40 ml/h, MQL + limpeza – 40 ml/h, MQL – 80 ml/h, MQL + limpeza – 80 ml/h, MQL – 160 ml/h e MQL + limpeza – 160 ml/h). Durante todo o procedimento de preparação das amostras, a temperatura do laboratório foi mantida em 25 °C e a umidade em 45%, sendo que estas condições foram aferidas através de um termohigrômetro digital, modelo HT – 208, da marca Icel Manaus. Todos os processos

descritos a seguir foram realizados no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia – UNESP – Bauru/SP.

Inicialmente, as amostras foram retiradas dos corpos de prova utilizando uma máquina de corte metalográfico da marca Struers. Em seguida, uma máquina de microcorte de precisão, modelo Mecatome 180, da empresa Presi, foi utilizada para acabamento das amostras, obtendo-se dimensões finais de 10 mm x 10 mm x 5 mm. Em ambos os equipamentos, foram utilizados discos de corte abrasivo de carbetto de silício (SiC), com aplicação de fluido de maneira abundante e baixa velocidade de avanço, a fim de evitar alterações microestruturais.

Após os cortes, para facilitar sua manipulação, as amostras foram embutidas em resina fenólica (baquelite), utilizando-se uma prensa para embutimento metalográfico, modelo EM30D, fabricado pela Teclago, com temperatura de 180 °C, pressão mínima de 9,81 MPa e resfriamento de 10 minutos, de maneira que a lateral da peça ficou exposta, pois as medições de microdureza e análise de microscopia óptica seriam realizadas nessa superfície. Em seguida, empregando-se um gravador com ponta de aço temperado, as amostras foram identificadas com os mesmos números das peças das quais haviam sido cortadas.

Na sequência, foi realizado o lixamento das superfícies, utilizando-se lixadeira manual da marca Struers, com lixas de carbetto de silício (SiC) de granulometrias 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1000, 1200, 1500 e 2000 mesh, nesta sequência. Em todas as etapas, foi utilizada água filtrada como lubrificante, refrigerante e meio de remoção de partículas. Ao término do lixamento, as amostras foram lavadas com detergente neutro e álcool hidratado 92,8 °INPM e secadas com jatos de ar quente oriundos de um soprador térmico modelo D26414, da empresa Dewalt.

Após, foi realizado o polimento das amostras, em quatro etapas, duas utilizando pastas à base de diamante de 6 µm e 3 µm e duas com óxido de alumínio (Al₂O₃, alumina) em suspensão de 1 µm e 0,3 µm. Entre cada etapa, a amostra era lavada com água e detergente neutro e seca com o soprador térmico. As operações com pasta de diamante foram realizadas em uma politriz metalográfica rotativa, modelo APL-4, da marca Arotec, enquanto uma politriz modelo AP 2, da marca Buehler, foi utilizada para as etapas com alumina, ambas com rotação do prato de 500 rpm, durante 3 minutos por etapa. Os panos de polimento eram da marca Arotec, modelo DBM para os de alumina e Gold para os de diamante. Ao término do polimento, os riscos oriundos do lixamento foram eliminados e as amostras ficaram espelhadas.

Finalmente, para conclusão do processo de preparação, as amostras foram limpas utilizando-se uma cuba de ultrassom digital microprocessada para limpeza, modelo Clear Machine 3560, fornecida pela Yaxun. As amostras foram imersas em álcool isopropílico na

temperatura de 25 °C e agitadas por 10 minutos, e na sequência foram secas com o soprador térmico.

3.3.5. Microscopia óptica das peças

Para visualização da microestrutura do material, foi necessário primeiramente realizar o ataque químico das amostras, utilizando-se uma solução de Nital 2% (álcool etílico P.A. com 2% de ácido nítrico P.A.) na temperatura de 25 °C por cinco segundos. Para neutralizar a ação do reagente químico, as amostras foram lavadas com água, detergente neutro e álcool etílico e secas com o soprador térmico.

Na sequência, a análise foi realizada com um microscópio óptico, modelo BX51, fornecido pela Olympus, acoplado a uma câmera digital, modelo EC-3, e software fotográfico Leica Application Suite EZ -versão 2.0, ambos da marca Leica, com ampliação de 500x e, após o correto ajuste fino do foco, as imagens selecionadas foram salvas pelo software.

3.3.6. Microdureza Vickers

Os testes de microdureza Vickers foram realizados após as análises de microscopia óptica, utilizando-se as mesmas amostras previamente preparadas conforme item 3.2.4. No entanto, para garantir a qualidade da superfície a ser analisada, as amostras foram submetidas a novos processos de polimento, utilizando-se pasta à base de alumina de 1 µm, de lavagem e de secagem e só então foram encaminhadas aos ensaios de microdureza, onde foram analisadas em um microdurômetro digital, modelo HM-211, da marca Mitutoyo. A medição foi realizada a partir da impressão produzida por um indentador Vickers padrão com ponta de diamante em forma de pirâmide de base quadrada, com ângulo de 136° entre as faces, utilizando carga de 300 gf por 40 segundos, depois de atingido o valor total da carga. A medição da microdureza superficial baseou-se nas normas (ASTM E140-12B(2019)e1, 2019; ASTM E384-17, 2017; ASTM E92-17, 2017). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia – UNESP – Bauru/SP.

As análises ocorreram na lateral da peça, ou seja, na superfície perpendicular à que foi retificada. Para cada amostra, foram realizadas três indentações em cada uma das cinco distâncias em relação à superfície retificada analisadas, de 60 µm, 120 µm, 180 µm, 240 µm e 300 µm, totalizando quinze ensaios por amostra. A medição mais próxima da superfície (60 µm) foi adotada em função da distância mínima estabelecida em norma entre a borda do material e o centro da indentação, que é de 2,5 vezes o valor médio do comprimento das

diagonais. Uma amostra não retificada também foi analisada seguindo o mesmo procedimento para servir de referência. Finalmente, a média aritmética e o desvio padrão foram calculados para cada distância em relação à superfície.

3.3.7. Potência elétrica consumida

A potência elétrica consumida durante o processo de retificação foi monitorada utilizando-se o sistema descrito no item 3.1.6. O sistema foi acionado antes do início do teste e desligado logo após sua conclusão. Os dados coletados foram então tratados e obteve-se a potência média e o desvio padrão para cada ensaio.

3.3.8. Emissão acústica

A emissão acústica gerada durante o processo de retificação foi monitorada utilizando-se o sistema descrito no item 3.1.7. O sistema foi acionado antes do início do teste e desligado logo após sua conclusão. Os dados coletados foram então tratados e obteve-se a emissão acústica média e o desvio padrão para cada ensaio.

3.3.9. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para realização desta análise, as peças foram cortadas e as superfícies retificadas foram lixadas, polidas e limpas conforme procedimento descrito no item 3.2.4. As mesmas peças que já haviam sido cortadas para realização de microscopia óptica e microdureza foram novamente utilizadas para obtenção destas novas amostras.

As superfícies retificadas, após esta preparação, foram analisadas com a utilização de um microscópio eletrônico de varredura, modelo EVO LS15, da marca Carl Zeiss, utilizando-se ampliação de 500x, acoplado a um computador equipado com o software fornecido pelo fabricante para processamento das imagens. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Departamento de Física da UNESP – Bauru/SP.

3.3.10. Microscopia confocal

Na realização desta análise, foram utilizadas as mesmas amostras da microscopia eletrônica de varredura. Para obtenção de imagens tridimensionais das superfícies retificadas, as amostras foram analisadas com um microscópio confocal, modelo LEXT OLS4100, da marca Olympus, utilizando-se ampliação de 1.000x, acoplado a um computador equipado com o 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.

3.3.11. Microscopia óptica da superfície de corte do rebolo

A superfície de corte do rebolo foi analisada utilizando-se um microscópio óptico portátil, modelo DigiMicro Scale, da marca Dnt, conectado a um notebook que possuía o software fornecido pelo fabricante instalado. O procedimento foi realizado inicialmente após o primeiro processo de dressagem, ou seja, antes do início dos ensaios, para servir de parâmetro de comparação e sempre ao término de cada teste de retificação, utilizando-se uma ampliação de 200x em todos os casos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo os resultados obtidos durante e após os ensaios de retificação serão apresentados e discutidos. As variáveis de saída analisadas para cada condição foram: rugosidade (R_a), desvios de circularidade, desgaste diametral do rebolo, emissão acústica, potência elétrica consumida e microdureza Vickers. As superfícies retificadas foram analisadas através de microscopias óptica, eletrônica de varredura e confocal, e a superfície de corte da ferramenta foi analisada por microscopia óptica após cada ensaio.

Os resultados foram compilados na forma de gráficos de barras, que apresentam a média das medições realizadas e seu respectivo desvio padrão de cada variável de saída para cada condição testada.

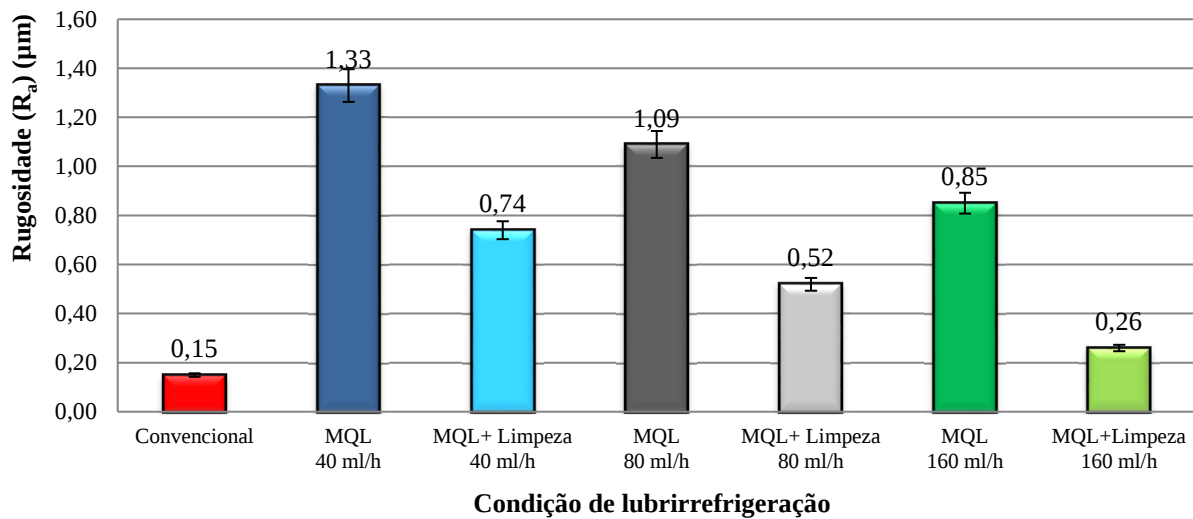
4.1. Rugosidade

No processo de retificação, a rugosidade da peça é diretamente ligada à diversos fatores, como condições de lubrificação, forma dos grãos abrasivos, taxa de remoção de material, condições de dressagem e tempo de centelhamento (SILVA et al., 2013). Neste trabalho, todos os parâmetros foram mantidos constantes, exceto a técnica de lubrificação aplicada. Desta forma, foi possível avaliar a influência de cada método testado na rugosidade da peça.

Além disso, a rugosidade é altamente relacionada à resistência à fadiga da peça. Quanto maior a rugosidade, mais irregular a superfície e, portanto, maior a quantidade de pontos concentradores de tensão, que facilitam a nucleação e propagação de micro trincas, reduzindo portanto a resistência à fadiga do componente (BERETTA; ROMANO, 2017). Desta forma, segundo Novovic et al. (2004), a análise e controle da rugosidade de uma peça é de extrema importância na indústria metal-mecânica, principalmente para as que irão ser submetidas à esforços cíclicos e elevadas temperaturas, como grande parte das peças fabricadas em aço ABNT 4340 endurecido, objeto de estudo do presente trabalho.

A Figura 18 apresenta os resultados obtidos para a rugosidade (R_a) para cada condição testada. Pode-se observar que todos os valores foram inferiores à 1.6 μm , reportado na literatura como um valor máximo aceitável para operações de retificação (BIANCHI et al., 2018a).

Figura 18: Rugosidade (R_a) em função da condição de lubrificação.



Fonte: Autor, 2020.

Na Figura 18, observa-se que os melhores resultados, ou seja, a menor rugosidade (0,15 μm), foram obtidos pelo método convencional, seguido pelo MQL com limpeza e finalmente pelo MQL, que apresentou os piores resultados dentre as condições testadas.

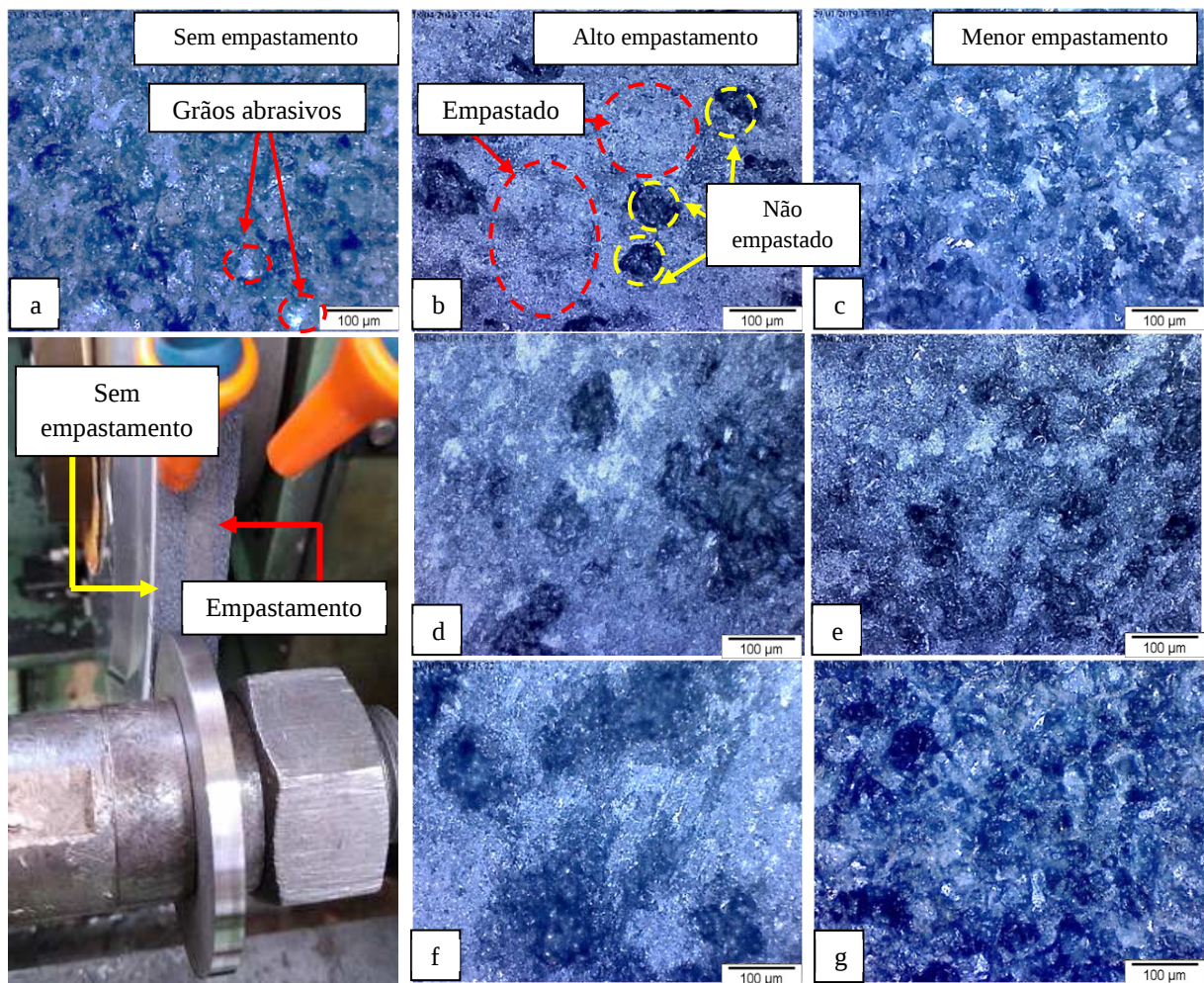
No método convencional, a aplicação abundante de fluido de corte proporcionou maiores lubrificação, refrigeração e remoção de cavacos da interface de corte, justificando os melhores resultados obtidos.

Segundo Hadad et al. (2012), a técnica de MQL, apesar de proporcionar excelente lubrificação da interface de corte que diminui as forças de corte, possui baixa capacidade de refrigeração, muito inferior à apresentada pelo método convencional, o que limita significativamente a ampla aplicação desta técnica. Além disso, conforme demonstrado por Belentani et al. (2013), a técnica MQL é ineficiente na remoção dos cavacos da interface de corte entre ferramenta e peça, o que facilita e aumenta a ocorrência do fenômeno de empastamento do rebolo, que causa, entre outros problemas, que serão discutidos nas próximas seções, a piora na qualidade superficial da peça. Durante o processo de usinagem, os cavacos gerados, quando não removidos de forma adequada, se misturam ao fluido de corte e formam uma espécie de borra, que, devido às altas temperaturas, apresenta grande ductilidade, podendo então deformar-se e se alojar nos poros do rebolo (OLIVEIRA et al., 2012). Com o aumento deste fenômeno, esta borra passa a cobrir também grãos ativos, consequentemente tornando o processo de corte mais irregular. Com a diminuição da capacidade de corte da ferramenta e piora na lubrificação (devido ao entupimento dos poros), as contribuições de atrito e deformação plástica também aumentam, o que leva ao aumento das temperaturas na interface

de corte, que por sua vez facilita a ocorrência de mais empastamento, prejudicando o processo de maneira cíclica. Finalmente, os cavacos aderidos aos poros do rebolo também podem riscar e deformar a peça. Todos estes fatores, somados à baixa capacidade de refrigeração, explicam os resultados significativamente piores da técnica MQL em relação ao método convencional.

Na Figura 18, nota-se também que a utilização do sistema de limpeza associado à técnica MQL melhorou significativamente os resultados obtidos em relação ao MQL tradicional (reduções na rugosidade de 44%, 52% e 69% para as vazões de 40 ml/h, 80 ml/h e 160 ml/h, respectivamente). O sistema de limpeza contribuiu para a redução substancial da ocorrência do empastamento do rebolo, através da efetiva remoção dos cavacos gerados da interface de corte, impedindo, portanto, sua aderência aos poros da ferramenta, conforme demonstrado na Figura 19, que apresenta imagens de microscopia óptica da superfície de corte do rebolo após o término de cada operação de retificação nas diferentes condições testadas.

Figura 19: Superfície de corte do rebolo após retificação sob diferentes condições de lubrificação: a) convencional, b) MQL - 40 ml/h, c) MQL + Limpeza - 40 ml/h, d) MQL - 80 ml/h, e) MQL + Limpeza - 80 ml/h, f) MQL - 160 ml/h, g) MQL + Limpeza - 160 ml/h.



Fonte: Autor, 2020.

Na Figura 19, pode-se notar que, após a retificação com o método convencional, a superfície de corte do rebolo continua limpa, não tendo ocorrido empastamento (Figura 19-a). Constata-se também que o empastamento foi substancialmente menor quando utilizado o sistema de limpeza associado ao MQL (Figura 19-c, e, g) em comparação com o MQL tradicional (Figura 19-b, d, f). Consequentemente, os riscos e deformações causados pelos cavacos aderidos aos poros do rebolo à superfície da peça diminuem, levando à melhora da qualidade da superfície obtida, como observado acima nos resultados de rugosidade.

Finalmente, da Figura 18, pode-se notar que a rugosidade diminuiu consideravelmente com o aumento da vazão de fluido de corte, devido à maior refrigeração e, principalmente, ao aumento da lubrificação da interface de corte, proporcionados pela maior quantidade de óleo aplicada. Segundo Rabiei et al. (2015), a penetração eficiente do lubrificante na interface de

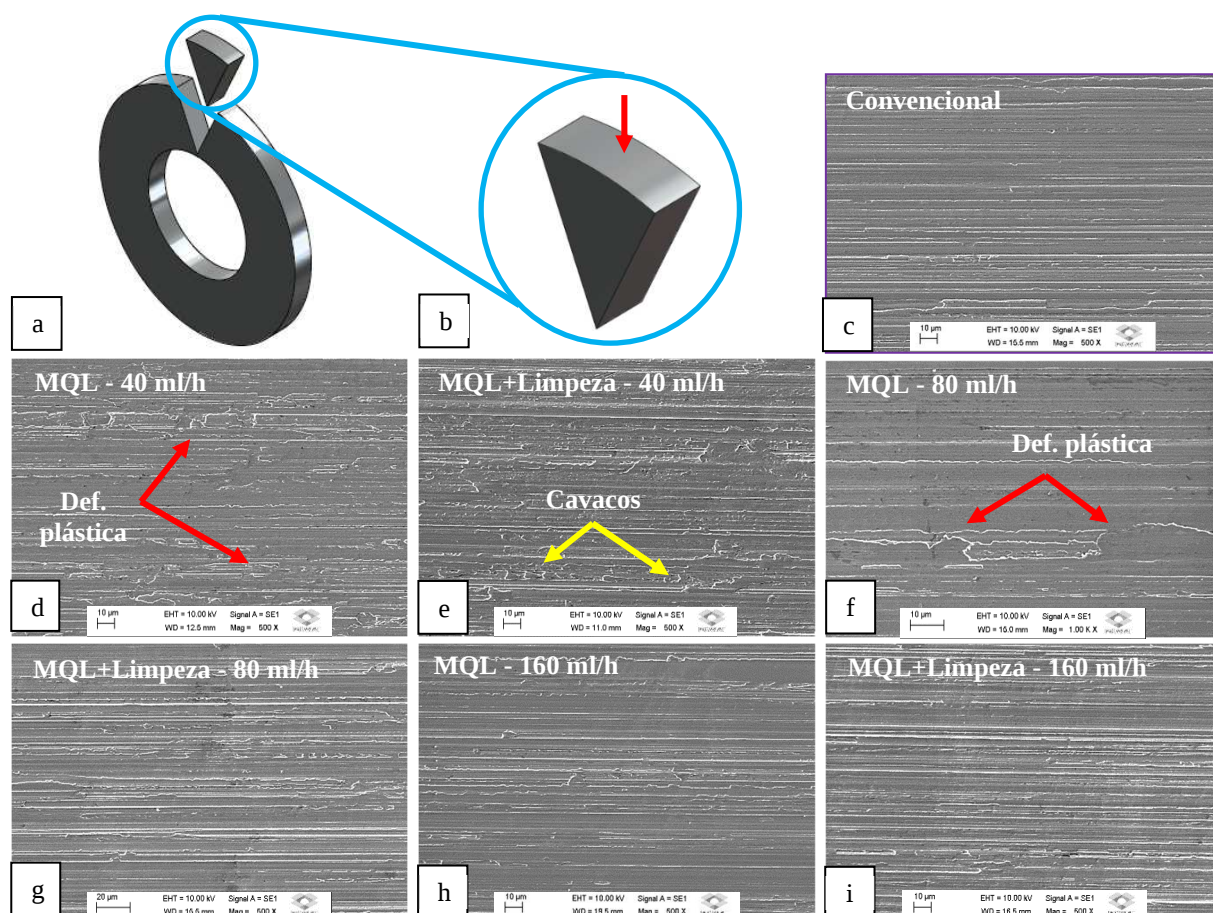
corte cria um tribo-filme entre ferramenta e peça, que diminui o atrito, melhorando as condições de corte. Estes resultados estão de acordo com outros trabalhos da área, que estudaram a influência de diversos parâmetros do MQL em processos de retificação, como Tawakoli, Hadad e Sadeghi (2010) e Huang et al. (2018).

A técnica de MQL, com vazão de 160 ml/h e associada ao sistema de limpeza apresentou excelente resultado de rugosidade ($0,26 \mu\text{m}$), sendo o mais próximo ao do método convencional ($0,15 \mu\text{m}$), mas, ainda assim, cerca de 73% maior. Contudo, dependendo da qualidade requerida para a peça, pode-se concluir que é possível substituir o método convencional pela técnica de MQL associada ao sistema de limpeza, com a importante vantagem da drástica redução do consumo de fluido de corte, na ordem de 99%. Nesta técnica alternativa, a combinação do aumento da vazão de fluido (maior lubrificação) com a utilização do sistema de limpeza (redução do empastamento), promoveu melhora significativa ao processo de retificação, indicando ser possível sua aplicação industrial para obtenção de peças com excelente qualidade superficial, em condições similares às estudadas neste trabalho. Além disso, analisando o comportamento da rugosidade em função do aumento de fluido na Figura 18, pode-se notar que a tendência é de que a rugosidade obtida pelo MQL + Limpeza possa se igualar ou ser até menor que a do método convencional para vazões ligeiramente superiores à 160 ml/h.

4.2. Análise das superfícies retificadas

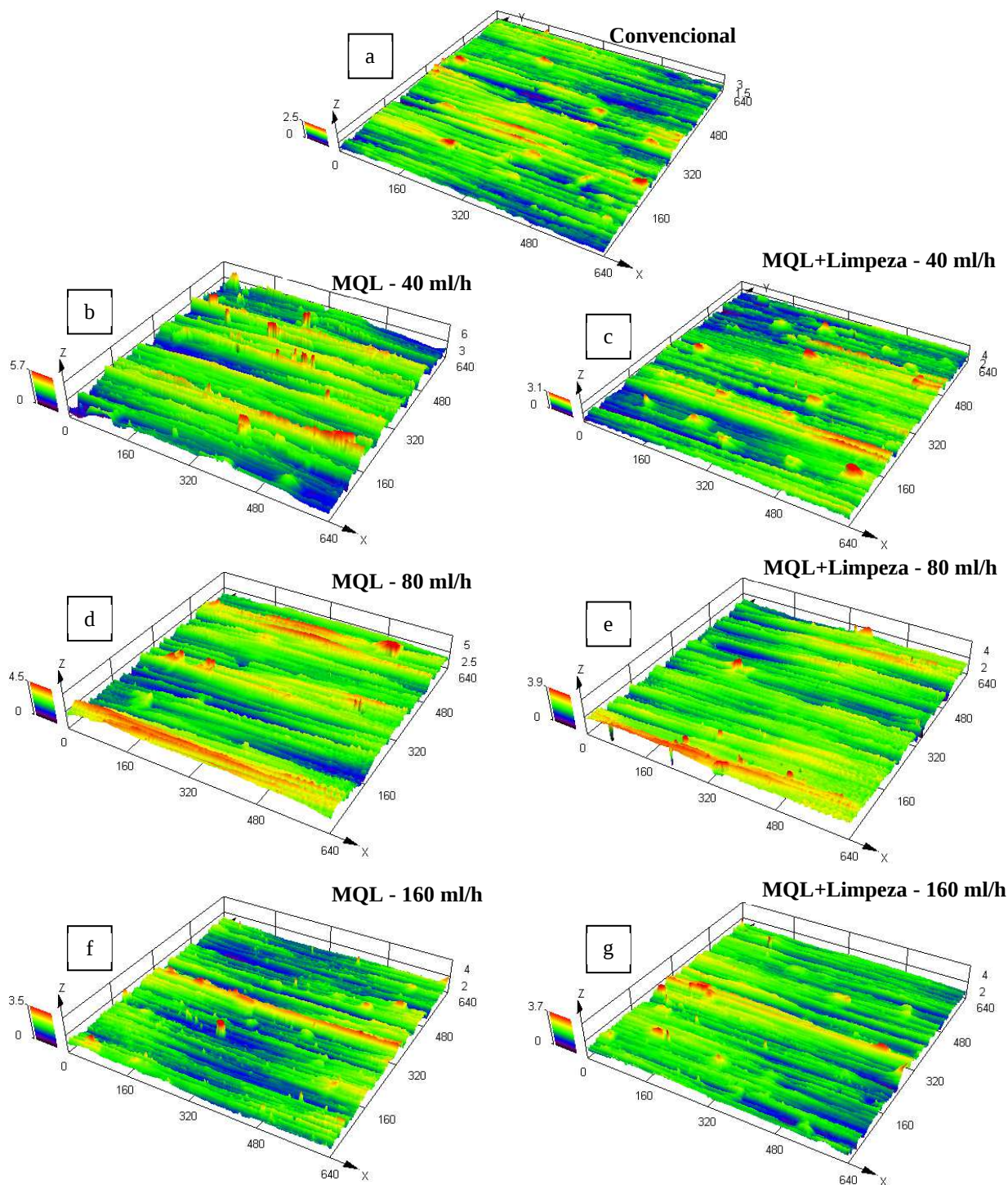
A microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a microscopia confocal são técnicas poderosas, permitindo a análise da superfície da peça com percepção de profundidade. Dessa forma, é possível avaliar de maneira mais ampla a influência de cada método de lubrificação na qualidade da peça retificada. As imagens obtidas por MEV e microscopia confocal são mostradas na Figura 20 e Figura 21, respectivamente.

Figura 20: Microscopia óptica de varredura (MEV) das superfícies retificadas: a) Visão esquemática da amostra, b) Localização da microscopia, c) Convencional, d) MQL - 40 ml/h, e) MQL + Limpeza - 40 ml/h, f) MQL - 80 ml/h, g) MQL + Limpeza - 80 ml/h, h) MQL - 160 ml/h, i) MQL + Limpeza - 160 ml/h.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 21: Microscopia confocal das superfícies retificadas: a) Convencional, b) MQL - 40 ml/h, c) MQL + Limpeza - 40 ml/h, d) MQL - 80 ml/h, e) MQL + Limpeza - 80 ml/h, f) MQL - 160 ml/h, g) MQL + Limpeza - 160 ml/h.



Fonte: Autor, 2020.

Como esperado, o método convencional foi responsável pelos melhores resultados devido às suas capacidades mais significativas de resfriamento e de remoção de cavacos. As superfícies usinadas por esse método apresentaram menores variações na topografia e a

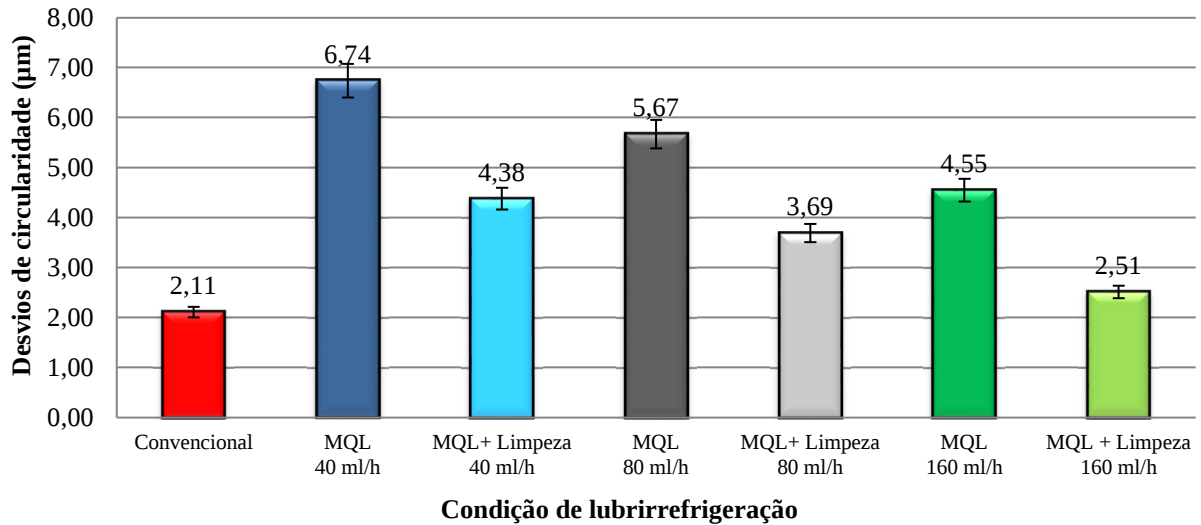
ausência de cavacos aderidos à peça de trabalho (Figura 20-c e Figura 21-a). Também é possível observar que a quantidade de sulcos diminuiu, ou seja, a qualidade da superfície da peça foi aprimorada, com o aumento da vazão nas técnicas de MQL (Figura 20-d, f, h e Figura 21-b, d, f) e, principalmente, com o uso do sistema de limpeza (Figura 20-e, g, i e Figura 21-c, e, g), corroborando com os resultados obtidos de rugosidade (R_a). A utilização do sistema de limpeza reduziu o empastamento, diminuindo a ocorrência de deformações na superfície da peça causadas por cavacos alojados nos poros do rebolo, tornando-a mais homogênea e, portanto, com menor rugosidade. Observa-se também, nas imagens de microscopia confocal (Figura 21), que as superfícies se tornam mais homogêneas (verde), ou seja, a ocorrência e a distância entre picos (vermelho) e vales (azul) diminuem à medida que a vazão de fluido é aumentada e o sistema de limpeza é aplicado.

4.3. Desvios de circularidade

Os desvios de circularidade indicam a diferença entre a forma circular real e a ideal da superfície da peça. No processo de retificação, esse parâmetro é diretamente relacionado à vários aspectos, como condições de corte e de lubrificação, cargas térmicas, rigidez da máquina, balanceamento do rebolo, vibrações do conjunto máquina/ferramenta e fixação da peça (ROWE, 2014). Segundo Kwak (2005), as dilatações térmicas sofridas pela peça durante o processo e a rigidez do sistema utilizado (conjunto máquina/ferramenta) são os principais fatores que influenciam os desvios de circularidade. No presente estudo, a única diferença adotada entre os testes foi o método de lubrificação aplicado e, portanto, foi possível avaliar a influência de cada técnica neste parâmetro.

A Figura 22 demonstra os valores médios de desvios de circularidade obtidos para cada método de lubrificação testado. Pode-se observar que os resultados deste parâmetro apresentaram padrão similar aos de rugosidade e, novamente, a aplicação da técnica convencional obteve a melhor performance ($2,11\mu\text{m}$), enquanto a técnica MQL apresentou os maiores desvios de circularidade ($6,74\mu\text{m}$, $5,67\mu\text{m}$ e $4,55\mu\text{m}$ para vazões de 40 ml/h, 80 ml/h e 160 ml/h, respectivamente) e a aplicação do MQL associado ao sistema de limpeza apresentou valores intermediários ($4,38\mu\text{m}$, $3,69\mu\text{m}$ e $2,51\mu\text{m}$ para vazões de 40 ml/h, 80 ml/h e 160 ml/h, respectivamente).

Figura 22: Desvios de circularidade em função da condição de lubrificação.



Fonte: Autor, 2020.

Na técnica MQL, a refrigeração não ocorre de maneira satisfatória, o que aumenta a quantidade de calor presente na interface de corte, elevando a temperatura da região e, portanto, aumentando as dilatações térmicas sofridas pela peça durante o processo, o que leva aos maiores desvios de circularidade obtidos. Hadad et al. (2012) estudaram a retificação plana do aço 100Cr6 endurecido e demonstraram que, mesmo com a utilização de um rebolo de CBN, que apresenta condutividade térmica consideravelmente maior que os rebolos convencionais, a temperatura da peça durante a retificação com a técnica de MQL é cerca de 2,5 vezes maior em relação ao método convencional. Outro fator que deve ser considerado é a ocorrência de empastamento do rebolo com a técnica de MQL, que foi significativa. Conforme já discutido, os cavacos aderidos aos poros do rebolo reduzem a capacidade de corte da ferramenta, aumentando as forças de corte e, consequentemente, a temperatura do processo, o que contribui para piora da qualidade da peça. Além disso, o rebolo nessas condições possivelmente apresentou desvios geométricos e um pequeno desbalanceamento, o que pode ter aumentando as vibrações do sistema, contribuindo também para o aumento dos desvios de circularidade, mesmo que de forma menos relevante. Segundo Oliveira, França e Wang (2008), o aumento na velocidade de vibração resulta em piora dos resultados de circularidade e rugosidade.

A utilização do sistema de limpeza associado ao método MQL melhorou os resultados obtidos, ou seja, diminui os desvios de circularidade em relação à técnica MQL tradicional. Ao limpar de forma efetiva a superfície de corte da ferramenta, o sistema de limpeza associado à técnica MQL aumentou a eficiência da retificação e, consequentemente, contribuiu para os melhores resultados obtidos.

Finalmente, observa-se que para ambas as técnicas alternativas, o aumento na vazão de fluido diminui os desvios de circularidade. A maior quantidade de fluido de corte presente na interface de corte aumenta a capacidade de refrigeração do processo, reduzindo a temperatura e consequentemente melhorando os resultados. Segundo Emami, Sadeghi e Sarhan (2013), o aumento da vazão de fluido aumenta a taxa de deposição de gotículas de óleo na superfície do rebolo, reduzindo o atrito e, consequentemente, a temperatura, na interface de corte.

Novamente, a técnica de MQL com vazão de 160 ml/h e associada ao sistema de limpeza apresentou o resultado (2,51 μm) mais próximo ao do método convencional (2,11 μm), demonstrando a possibilidade de sua aplicação industrial em condições similares às testadas neste trabalho.

4.4. Desgaste diametral do rebolo

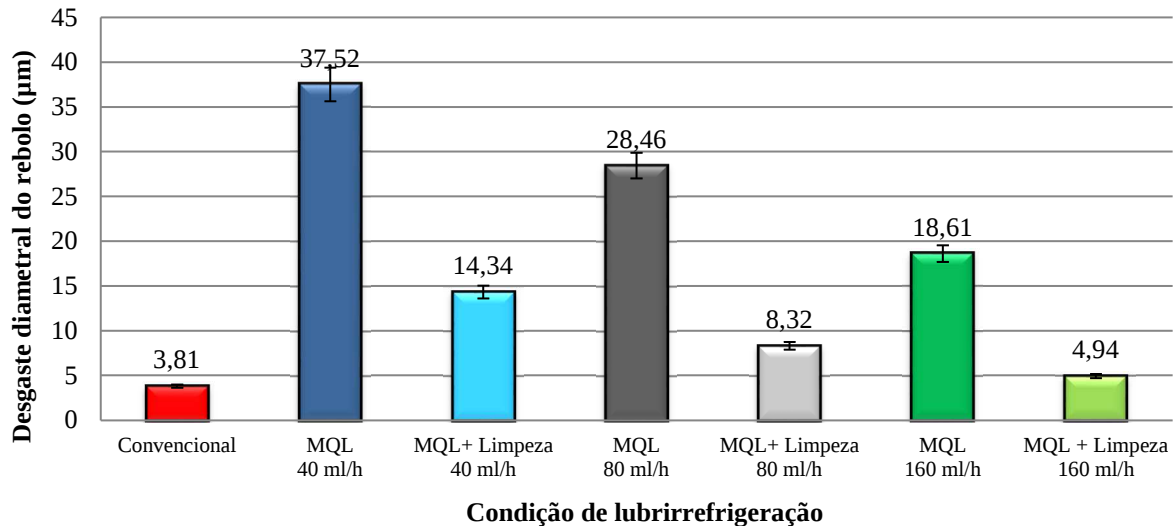
O desgaste da ferramenta é um parâmetro relevante na indústria metalúrgica, pois está diretamente relacionado à produtividade. No caso da retificação, quanto menor o desgaste do rebolo, maior a sua vida e, consequentemente, menores os custos associados. O desgaste do rebolo ocorre devido às interações tribológicas entre as superfícies da ferramenta e da peça, que produzem altas cargas mecânicas e térmicas na interface de corte, resultando na degradação de grãos abrasivos e do material do ligante (XU, 2001).

Na retificação, o desgaste do rebolo pode ser classificado em duas categorias: micro-fraturas, onde o grão sofre pequenas fraturas, o que mantém sua afiação, permitindo a remoção efetiva de material por um período mais prolongado; e macro-fraturas, onde ocorrem fraturas mais significativas nos grãos e até mesmo fraturas no material ligante, fazendo com que o grão seja destacado do rebolo, fatores que contribuem para o desgaste prematuro da ferramenta (TAWAKOLI et al., 2007). Quanto maiores as cargas mecânicas e térmicas no processo de corte, maior a ocorrência de macro-fraturas e, consequentemente, menor a vida do rebolo. Nesse sentido, lubrificação e refrigeração eficientes são essenciais para prolongar a vida da ferramenta, a primeira para reduzir as forças de corte e a segunda para diminuir a temperatura da interface de corte, permitindo assim que os grãos permaneçam conectados ao material ligantes por maior período (SILVA et al., 2005).

Além disso, a ocorrência do fenômeno de empastamento também contribui para o desgaste acelerado, visto que a entrada de fluido na interface de corte é prejudicada, dificultando a lubrificação e, consequentemente, aumentando o atrito, o que leva ao aumento da temperatura (AGARWAL, 2019).

A Figura 23 apresenta os valores médios de desgaste diametral do rebolo para cada condição de lubrificação testada.

Figura 23: Desgaste diametral em função da condição de lubrificação.



Fonte: Autor, 2020.

A partir da Figura 23, é possível observar que o método convencional apresentou o melhor desempenho, enquanto o MQL foi o pior. Além disso, os resultados apresentados pelo MQL foram significativamente maiores (9,8x, 7,4x e 4,8x para vazões de 40, 80 e 160 ml/h, respectivamente) do que o método convencional, o que inviabilizaria sua aplicação industrial, devido à constante necessidade de dressagem e troca de rebolo, o que aumentaria consideravelmente os custos de produção. A aplicação convencional de fluido é substancialmente mais eficaz que o MQL no resfriamento e na remoção dos cavacos, mantendo temperaturas mais baixas e evitando entupimento dos poros (empastamento), fatores que favorecem a redução do desgaste do rebolo. Nesta técnica, a aplicação abundante de fluido garante que a interface de corte seja lubrificada, formando um filme de fluido nessa região, e que o resfriamento e a remoção de cavacos também ocorram satisfatoriamente, reduzindo as cargas mecânicas e térmicas na interface rebolo/peça. Assim, pode-se inferir que, quando utilizado o método convencional de lubrificação, houve predomínio de micro-fraturas, ou seja, os grãos abrasivos permaneceram afiados e aderidos ao material ligante por mais tempo, mantendo a superfície de corte do rebolo mais regular e com maior quantidade de grãos ativos e, consequentemente, reduzindo o desgaste da ferramenta.

Também é importante mencionar que o rebolo com menor desgaste também apresentou os melhores resultados para rugosidade (Figura 18) e desvios de circularidade (Figura 22),

demonstrando a influência significativa deste parâmetro em relação aos demais, ou seja, a superfície de corte com as melhores condições (lubrificação, refrigeração e remoção de cavacos adequadas) produziu peças da melhor qualidade com o menor desgaste. No entanto, vale lembrar que, no método convencional, há elevado consumo de fluidos de corte, o que motiva os pesquisadores a procurar técnicas alternativas.

Embora a técnica MQL também apresente uma capacidade de lubrificação adequada, a refrigeração é significativamente menor que o método convencional, levando a um aumento da temperatura do processo e, conseqüentemente, a uma diminuição da resistência dos grãos abrasivos e do material ligante devido à degradação térmica. Hadad et al. (2012) estudaram a retificação superficial de aço temperado 100Cr6, com rebolos de Al_2O_3 e CBN, e demonstraram que a temperatura atingida no MQL é substancialmente mais alta que o método convencional para ambas as ferramentas. Mesmo com o rebolo de CBN, que possui condutividade térmica expressivamente mais alta que o de Al_2O_3 , a temperatura máxima atingida com o MQL foi cerca de 2,5x maior que a do método convencional. A remoção de cavacos nesta técnica também é insatisfatória, facilitando o entupimento dos poros do rebolo, o que, como mencionado anteriormente, também contribui para o aumento do atrito e da temperatura, levando a um ciclo prejudicial ao processo. Assim, com maiores cargas mecânicas e térmicas presentes, pode-se inferir que durante a aplicação do MQL houve predomínio de macro-fraturas, ou seja, os grãos sofreram fraturas de maior proporção ou se descolaram do material ligante de forma precoce, acelerando o processo de desgaste. Além disso, a mistura de óleo e cavacos, que não foi removida adequadamente, aderiu aos poros do rebolo e, na medida que o processo ocorria, cobriu parte dos grãos abrasivos, o que reduziu o número de grãos ativos, diminuindo o corte efetivo de material e aumentando a ocorrência de deformações elásticas e plásticas, o que favorece também o aumento da temperatura e a redução de resistência do material ligante.

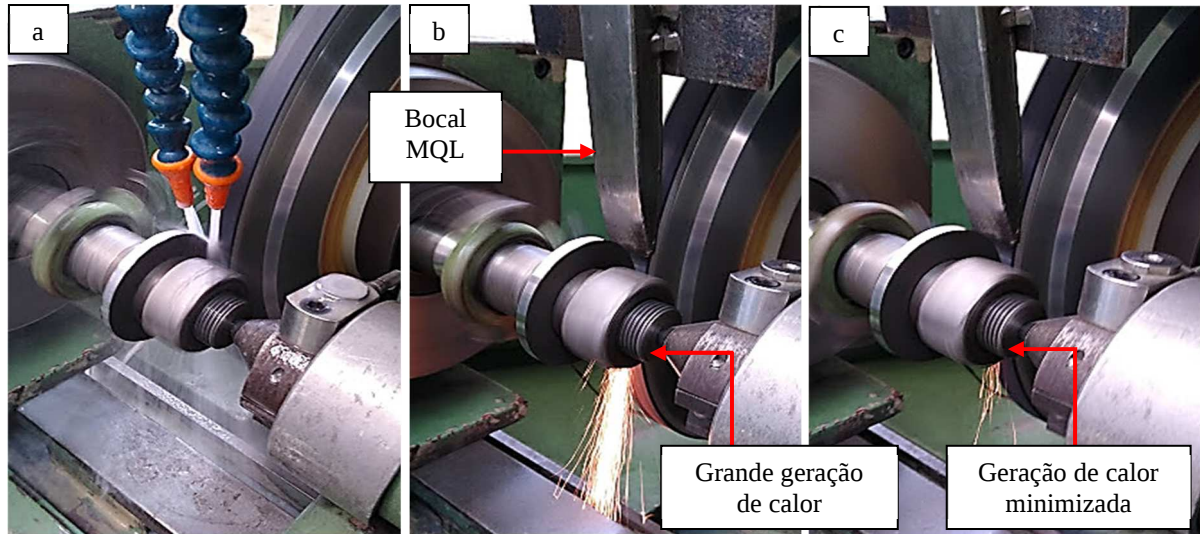
Novamente, a condição da superfície de corte da ferramenta pode ser associada à qualidade obtida da peça, ou seja, a condição MQL com vazão de 40 ml/h, que apresentou o maior desgaste, também foi responsável pelos piores resultados de rugosidade e desvios de circularidade, como visto nas seções anteriores (Figura 18 e Figura 22, respectivamente). O desgaste excessivo torna a superfície de corte mais irregular, a qual é transmitida à peça, aumentando a sua rugosidade. Os cavacos aderidos ao rebolo arranham e deformam a superfície da peça, contribuindo também para uma maior rugosidade. Finalmente, o aumento da temperatura também favorece a ocorrência de dilatações térmicas, aumentando os desvios de circularidade.

A aplicação da técnica MQL associada ao sistema de limpeza apresentou desempenho intermediário. Nesse contexto, a adição da limpeza reduziu significativamente o desgaste do rebolo (reduções de 62%, 71% e 73% para vazões de 40, 80 e 160 ml/h, respectivamente) em comparação ao MQL tradicional. A eficiência do jato de limpeza na remoção dos cavacos da interface de corte minimizou o empastamento e suas consequências prejudiciais mencionadas anteriormente, o que reduziu o desgaste da ferramenta. Observa-se que a utilização do sistema de limpeza influenciou o desgaste de maneira mais significativa que o aumento da vazão de fluido, uma vez que a condição MQL + Limpeza com vazão de 40 ml/h apresentou melhor desempenho que o MQL com vazão de 160 ml/h. Nesse sentido, pode-se supor que a limpeza efetiva da superfície de corte do rebolo é mais significativa que o aumento da lubrificação para reduzir o desgaste na aplicação da técnica MQL, para a faixa de vazão testada.

Ainda através da análise da Figura 23, percebe-se que o aumento da vazão do fluido nas técnicas de MQL e MQL + Limpeza contribuiu significativamente para a melhora dos resultados. Na técnica de MQL sem limpeza, as reduções foram de 24,1% e 34,6% para os aumentos de vazão de 40 para 80 ml/h e de 80 para 160 ml/h, respectivamente. No total, ao aumentar a vazão de 40 para 160 ml/h, a redução obtida no desgaste foi de 50,4%. Já na técnica de MQL + Limpeza, os efeitos do aumento da vazão de fluido foram ainda mais destacados, visto que foram obtidas reduções de 42,0% e 40,6% para os aumentos de vazão de 40 para 80 ml/h e de 80 para 160 ml/h, respectivamente e a diminuição total do desgaste observada foi de 65,6% com o aumento de 40 para 160 ml/h da vazão. Este fato está relacionado ao aumento da quantidade de óleo na interface de corte, que promove uma melhor lubrificação, minimizando o atrito e a temperatura, reduzindo assim o desgaste do rebolo. O efeito mais pronunciado do aumento da vazão quando utilizada MQL + Limpeza pode ser justificado pela menor ocorrência de empastamento nesta técnica, o que mantém os poros desobstruídos, facilitando a entrada do fluido em uma maior área, o que aumenta a lubrificação, consequentemente diminuindo o desgaste. Desta forma, pode-se afirmar que, dentro da faixa testada (40 a 160 ml/h), a vazão mais indicada é a de 160 ml/h para ambas as técnicas, devido aos resultados obtidos terem sido significativamente melhores. Destaca-se que, mesmo com um aumento de 4x na vazão de fluido (de 40 para 160 ml/h), a quantidade aplicada ainda expressivamente menor que a utilizada no método convencional (17 l/min).

Para ilustrar a geração de calor durante o processo, a Figura 24 mostra as operações de retificação sob três diferentes condições testadas.

Figura 24: Processo de retificação sob diferentes condições de lubrificação: a) Convencional, b) MQL, c) MQL + Limpeza.



Fonte: Autor, 2020.

Observa-se um número significativo de centelhas na técnica MQL tradicional (Figura 24-b), indicando altas temperaturas na interface de corte (condições mais severas), o que não ocorre no método convencional (Figura 24-a). Também é possível observar que a adição do sistema de Limpeza ao MQL (Figura 24-c) reduziu substancialmente a quantidade de centelhas, indicando que a geração de calor foi minimizada.

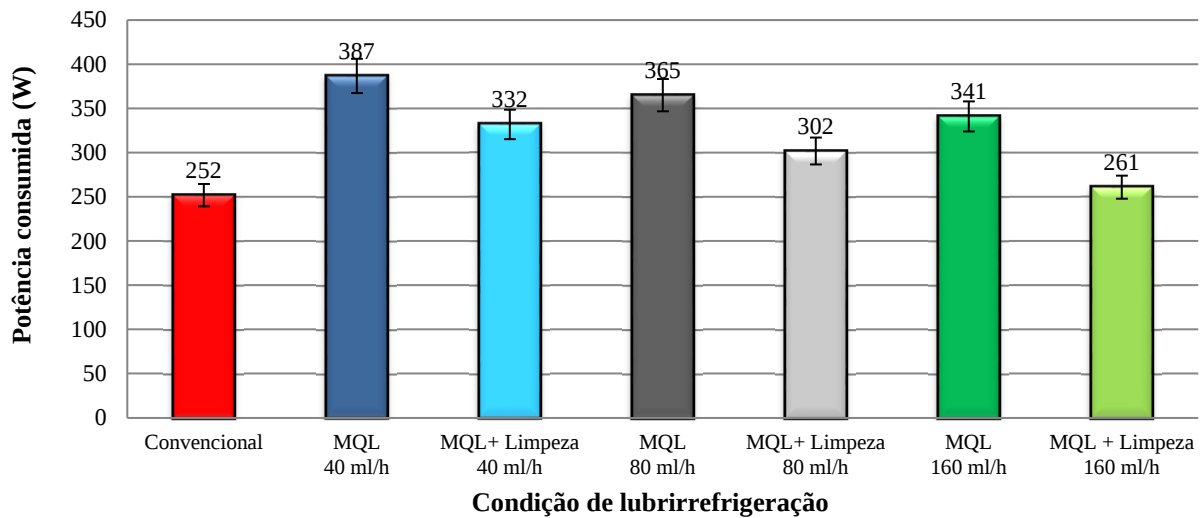
Finalmente, pode-se afirmar que o uso da técnica de MQL + Limpeza com vazão de 160 ml/h apresentou, mais uma vez, resultados mais próximos ao método convencional em relação ao desgaste diametral do rebolo, demonstrando os efeitos benéficos da combinação entre aplicação do jato de limpeza e aumento da vazão de fluido.

4.5. Potência elétrica consumida

O monitoramento da potência elétrica é amplamente utilizado em processos de retificação, por apresentar baixo custo de instalação e manutenção e a possibilidade de acompanhamento do processo em tempo real (TIAN et al., 2017).

A Figura 25 demonstra os valores médios de potência elétrica consumida coletados durante os ensaios para as diferentes condições de lubrificação utilizadas.

Figura 25: Potência elétrica consumida em função da condição de lubrificação.



Fonte: Autor, 2020.

Novamente, pode-se observar um padrão similar aos obtidos nos parâmetros anteriores. A técnica convencional apresentou a menor potência consumida durante os ensaios (252 W) devido às já discutidas maiores capacidades de lubrificação e remoção de cavacos em relação aos outros métodos, que reduziram o atrito na interface entre ferramenta e peça e mantiveram a capacidade de corte da ferramenta, consequentemente favorecendo as condições de usinagem e reduzindo a potência necessária para realização do processo.

Na técnica de MQL sem limpeza, os piores resultados foram observados, ou seja, as maiores potências foram registradas durante estes ensaios (387 W, 365 W e 341 W para vazões de 40 ml/h, 80 ml/h e 160 ml/h, respectivamente). Segundo Singh, Rao e Ghosh (2012), a potência elétrica total consumida no processo de retificação é constituída basicamente pela soma das energias das interações que ocorrem entre os grãos abrasivos e a superfície da peça: atrito, deformações elástica e plástica e corte (formação de cavaco). Durante os ensaios com a técnica MQL, foi observado intenso empastamento do rebolo, que, conforme já comentado, reduziu a capacidade de corte da ferramenta e aumentou a área de contato entre peça e ferramenta, aumentando o atrito e as deformações elásticas e plásticas e, consequentemente, a potência consumida pelo processo.

Na técnica de MQL associada ao sistema de limpeza, resultados intermediários foram obtidos (332 W, 302 W e 261 W para vazões de 40 ml/h, 80 ml/h e 160 ml/h, respectivamente). Pode-se notar, portanto, que a utilização da limpeza contribuiu para a redução da potência elétrica consumida na técnica de MQL (reduções de 14,2%, 17,3% e 23,5% para vazões de 40 ml/h, 80 ml/h e 160 ml/h, respectivamente, em relação ao MQL sem limpeza). Entretanto, a

melhoria obtida com a utilização da limpeza, ou seja, o menor consumo de potência, foi menos significativa que a observada nos demais parâmetros de saída analisados. Isto se deve ao fato de que o jato de ar comprimido é aplicado em sentido contrário ao da rotação do rebolo, com um ângulo de incidência de 30°, criando uma resistência extra à rotação da ferramenta e, portanto, aumentando a potência necessária para tal. Por outro lado, o efeito de limpeza proporcionado pelo jato de ar comprimido permite que a lubrificação penetre de maneira eficiente através da porosidade do rebolo e que um maior número de grãos ativos permaneça exposto, o que melhora a lubrificação e reduz o atrito, a temperatura e, conseqüentemente, a potência necessária para realização da operação. Como a potência consumida pelo MQL associado à limpeza foi menor que a observada no MQL tradicional para uma mesma vazão, pode-se concluir que o decréscimo de potência devido à redução do empastamento proporcionado pelo sistema de limpeza foi mais significativo que o aumento da potência causado pela aplicação do jato de ar comprimido contra a ferramenta.

Observa-se também que o aumento na vazão de fluido de corte nas técnicas de MQL levou à diminuição da potência consumida. Na técnica MQL tradicional, as reduções observadas foram de 5,7% e 6,6% para aumento de vazões de 40 ml/h para 80 ml/h e de 80 ml/h para 160 ml/h, respectivamente, e uma redução total de 11,9% para o aumento de vazão de 40 ml/h para 160 ml/h. Já para a técnica de MQL associada ao sistema de limpeza, as reduções foram de 9,0% e 13,6% para aumento de vazões de 40 ml/h para 80 ml/h e de 80 ml/h para 160 ml/h, respectivamente, e uma redução total de 21,4% para o aumento de vazão de 40 ml/h para 160 ml/h. O melhor desempenho obtido com a maior vazão de fluido pode ser relacionado ao aumento das capacidades de lubrificação e refrigeração que ocorrem com a maior da quantidade de fluido presente na interface entre ferramenta e peça, favorecendo as condições de corte e, conseqüentemente, reduzindo a potência necessária. É interessante observar que a melhora de performance devido ao aumento da vazão foi mais intensa (redução da potência consumida foi cerca de duas vezes maior) quando aplicado o sistema de limpeza, provavelmente pelo fato de que, nesta condição, com a superfície do rebolo em melhores condições (sem obstrução dos poros), o fluido de corte foi capaz de lubrificar a interface de corte de maneira mais eficiente.

Finalmente, pode-se concluir que a aplicação da técnica de MQL com vazão de 160 ml/h e associada ao sistema de limpeza apresentou o consumo de potência mais próximo (261 W) ao do método convencional (252 W), sendo apenas 3,6% superior, indicando que os processos ocorreram de forma semelhante, ou seja, as interações de atrito, deformações e corte entre grãos abrasivos e peça foram similares durante a usinagem com estas duas condições de lubrificação. Segundo Oliveira et al. (2009), o consumo de energia elétrica, assim como

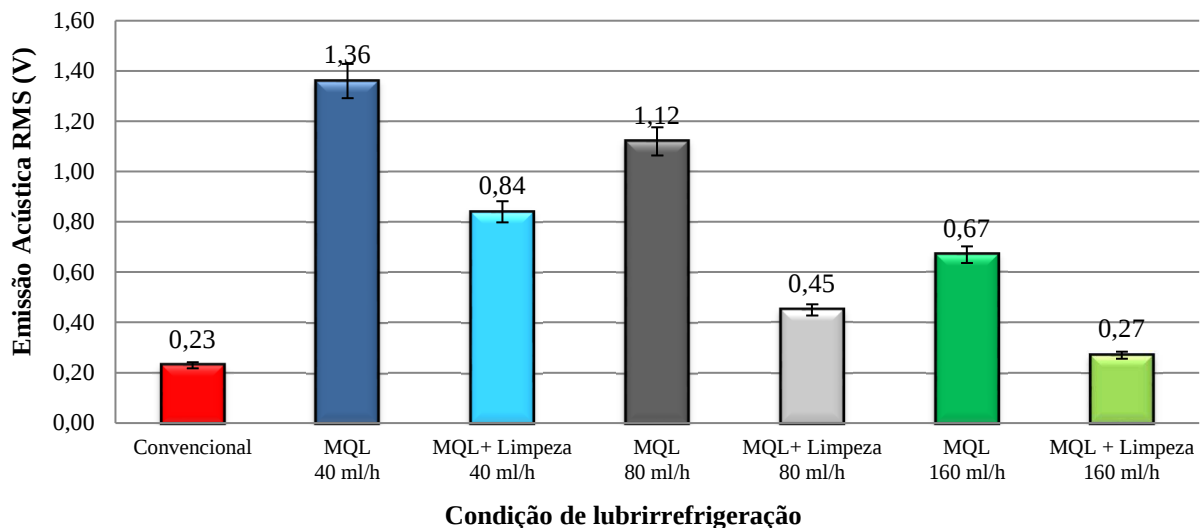
a utilização de fluidos de corte, são parâmetros que vêm ganhando cada vez mais importância nas últimas décadas, pois estão intrinsicamente ligados à aspectos ambientais e aos custos do processo. Desta forma, reforça-se a potencial aplicação industrial desta técnica alternativa em operações de retificação, que concilia as características de potência consumida similar e de drástica redução de consumo de fluidos em relação ao método convencional.

4.6. Emissão acústica

Os sinais de emissão acústica gerados durante os processos de usinagem estão diretamente ligados aos fenômenos físicos que ocorrem resultantes da interação entre ferramenta e peça, como atrito, deformações elásticas e plásticas e formação de cavacos (KISHAWY et al., 2018). Neste trabalho, foi possível avaliar o comportamento deste parâmetro em função da técnica de lubrificação aplicada, visto que todas as demais condições foram mantidas constantes.

A Figura 26 mostra os valores médios da emissão acústica quadrática média (RMS) obtidos durante os ensaios de retificação para cada condição de lubrificação testada.

Figura 26: Emissão acústica (RMS) em função da condição de lubrificação.



Fonte: Autor, 2020.

Pode-se observar que a emissão acústica seguiu padrão similar ao observado para os outros parâmetros analisados. O método convencional apresentou os melhores resultados, ou seja, os menores valores foram obtidos nesta condição (0,23 V). A técnica MQL apresentou os piores resultados (1,36 V, 1,12 V e 0,67 V para vazões de 40 ml/h, 80 ml/h e 160 ml/h, respectivamente), enquanto a técnica de MQL com limpeza obteve desempenho intermediário

(0,84 V, 0,85 V e 0,27 V para vazões de 40 ml/h, 80 ml/h e 160 ml/h, respectivamente), sendo superior ao MQL tradicional, quando comparados para uma mesma vazão, porém inferior ao método convencional.

Além disso, nota-se que os valores de emissão acústica diminuíram consideravelmente com o aumento da vazão de fluido nas técnicas de MQL. Na técnica de MQL tradicional, sem sistema de limpeza, as reduções observadas foram de 17,6% e 40,2% quando as vazões foram aumentadas de 40 ml/h para 80 ml/h e de 80 ml/h para 160 ml/h, respectivamente. Finalmente, observa-se que, para esta condição, o aumento de quatro vezes na vazão, de 40 ml/h para 160 ml/h, reduziu a emissão acústica à metade, de 1,36 V para 0,67 V. Já na técnica de MQL associada à limpeza, as reduções foram de 46,4% e 40% para os aumentos de vazão de 40 ml/h para 80 ml/h e de 80 ml/h para 160 ml/h, respectivamente e, na comparação entre as vazões de 40 ml/h e 160 ml/h, a redução total observada foi de 67,9%.

Comparando os resultados obtidos nas duas técnicas MQL (sem e com limpeza), pode-se concluir que o efeito do aumento da vazão foi mais pronunciado quando utilizado o sistema de limpeza. Como já discutido nas seções anteriores, nesta técnica a remoção dos cavacos ocorre de forma mais eficiente, o que mantém os poros do rebolo desobstruídos, possibilitando uma melhor penetração do fluido, o que favorece a lubrificação da interface de corte. Outra consideração importante é que, ao contrário da técnica de MQL sem limpeza, os grãos ativos não são cobertos pela borra formada pela mistura de cavacos não removidos e fluido e, portanto, a ferramenta mantém maior capacidade de corte por maior período, ou seja, as contribuições de atrito e deformações são menores, enquanto a parcela de corte efetivo de material é maior. Como consequência, as condições de corte se tornam mais favoráveis e os valores de emissão acústica obtidos são menores quando utilizado o sistema de limpeza em relação ao MQL tradicional. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Oliveira et al. (2012), que reportaram que a utilização do sistema de limpeza reduz a ocorrência de empastamento e, consequentemente, os níveis de emissão acústica do processo.

Nota-se também que o aumento de vazão de 80 ml/h para 160 ml/h foi mais significativo que o de 40 ml/h para 80 ml/h, o que pode indicar que, para vazões abaixo de 160 ml/h, o filme de lubrificante formado na interface de corte, entre rebolo e peça, foi insuficiente para garantir uma lubrificação eficiente. Com o aumento de vazão para 160 ml/h, esta camada tornou-se mais espessa e, portanto, mais estável, aumentando a lubrificação e, consequentemente, melhorando os resultados obtidos. Segundo Verma, Manojkumar e Ghosh (2017), a área molhada, ou seja, a área atingida pelo fluido, aumenta drasticamente com o aumento de vazão, o que melhora a lubrificação e, consequentemente, reduz forças de corte e temperatura. É interessante observar

que este mesmo comportamento ocorreu nos demais parâmetros de saída observados, ou seja, os resultados foram mais impactados com o aumento de 80 ml/h para 160 ml/h do que com o de 40 ml/h para 80 ml/h, o que reforça a hipótese de que a vazão indicada para esta técnica, em condições de usinagem similares, deve ser igual ou superior a 160 ml/h, onde os resultados foram significativamente melhorados.

Desta forma, conclui-se novamente que a técnica de MQL com vazão de 160 ml/h e sistema de limpeza foi a que apresentou performance mais próxima ao método convencional (0,27 V contra 0,23 V, respectivamente), ratificando seu potencial como possível substituta da aplicação abundante de fluido em processos de retificação com condições similares aos estudados neste trabalho.

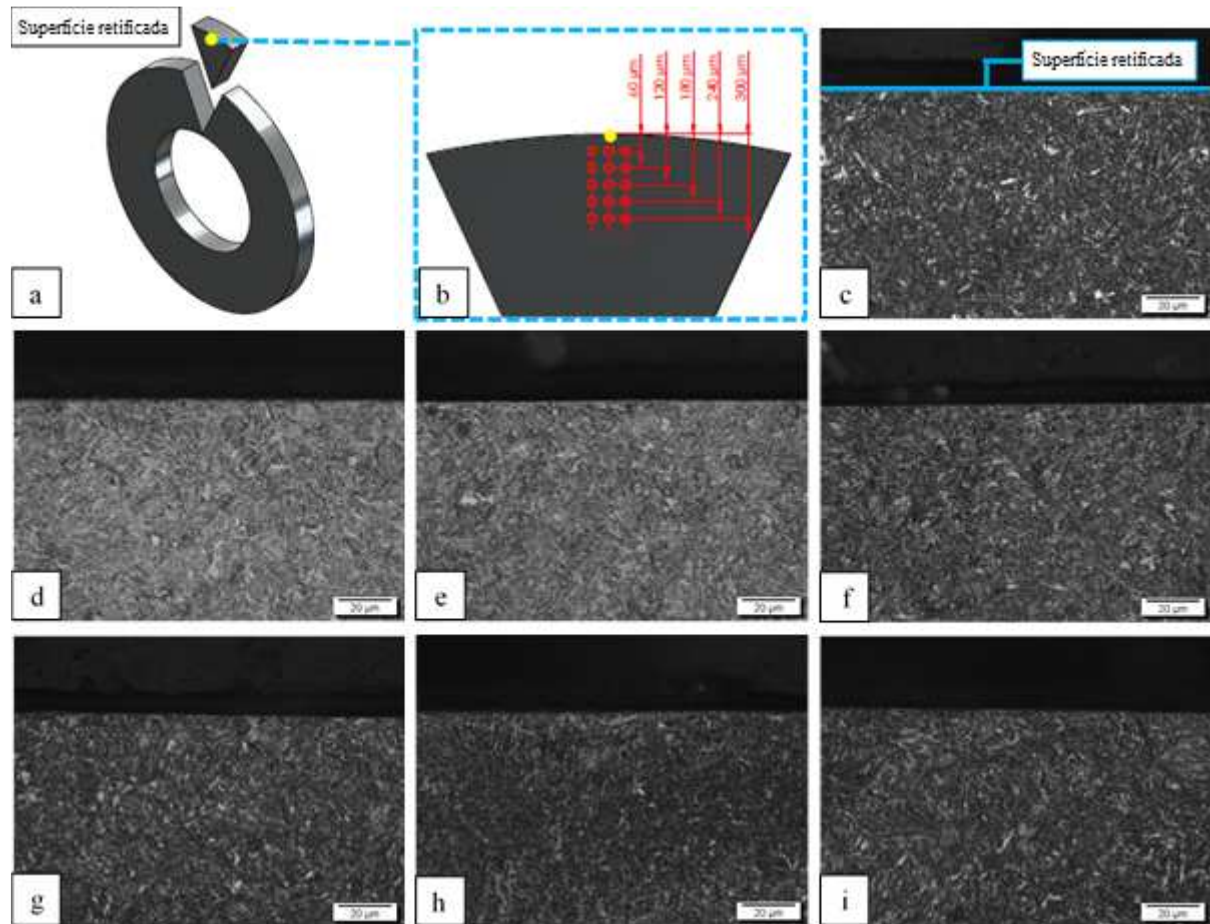
4.7. Microscopia óptica e microdureza

A microestrutura do material influencia diretamente as propriedades mecânicas da peça. Como a retificação é geralmente o último processo de fabricação, realizada após o tratamento térmico, é essencial que não ocorram alterações microestruturais e danos térmicos (como queimas superficiais, formação de camadas branca e escura, e micro trincas), o que resultaria no descarte da peça e no reinício de todo o processo de fabricação do componente (KLOCKE; BRINKSMEIER; WEINERT, 2005).

Neste contexto, as análises de microscopia óptica e de microdureza foram realizadas em todas as peças após os ensaios de retificação, para verificação de possíveis alterações na microestrutura do material e de eventuais danos térmicos.

A Figura 27 demonstra as imagens de microscopia óptica da lateral de uma peça de cada condição de lubrificação testada.

Figura 27: Microscopia óptica: a) Visão esquemática da amostra, b) Localização dos pontos de microscopia (amarelo) e microdureza (vermelho), c) Convencional, d) MQL - 40 ml/h, e) MQL + Limpeza - 40 ml/h, f) MQL - 80 ml/h, g) MQL + Limpeza - 80 ml/h, h) MQL - 160 ml/h, i) MQL + Limpeza - 160 ml/h.

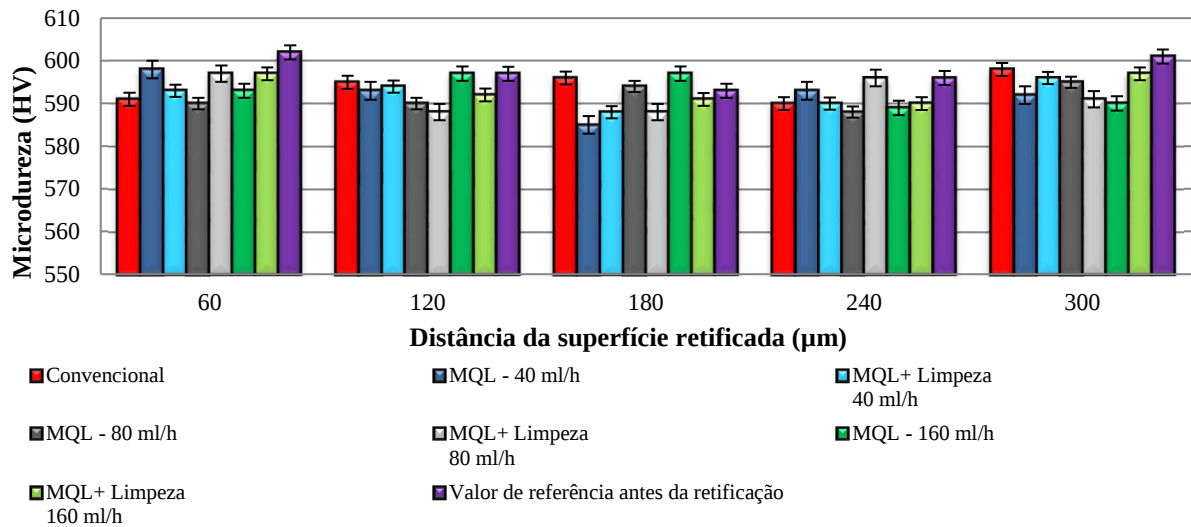


Fonte: Autor, 2020.

Pode-se observar que, para todas as condições de lubrificação testadas, não ocorreram alterações na microestrutura do material ou danos térmicos à peça, mantendo-se a estrutura martensítica típica do aço 4340 endurecido.

A Figura 28 mostra os valores médios das medições de microdureza realizadas para cada condição de lubrificação testada, em cinco diferentes distâncias da superfície retificada.

Figura 28: Microdureza em função da distância da superfície retificada e da condição de lubrificação.



Fonte: Autor, 2020.

A microdureza média das peças antes dos ensaios foi de 598 HV. Para todas as condições testadas, os valores obtidos de microdureza variaram entre 585 HV e 598 HV, o que representa uma pequena variação, de no máximo 2%, em relação aos valores observados antes do processo de retificação. Além disso, nota-se que as variações ocorreram de maneira aleatória, ou seja, sem a presença de algum tipo de padrão que poderia indicar a ocorrência de diminuição ou aumento de dureza devido ao processo. Desta forma, para todas as condições de lubrificação testadas, pode-se concluir que não ocorreram mudanças significativas na microdureza das peças.

Os resultados obtidos nas análises de microscopia e microdureza demonstram que, independentemente da técnica de lubrificação aplicada, não houve alterações microestruturais ou danos térmicos às peças.

Segundo Malkin e Guo (2007), quanto mais eficiente a lubrificação do processo, menor a ocorrência de danos térmicos à peça. De acordo com Bianchi et al. (2003), os rebolos superabrasivos de CBN apresentam elevada condutividade térmica e portanto dissipam maior quantidade de calor, reduzindo a temperatura na interface de corte e, consequentemente, diminuindo a possibilidade de ocorrência de danos térmicos.

Portanto, ao analisar os resultados obtidos nas análises de microscopia óptica e microdureza (Figura 27 e Figura 28, respectivamente), pode-se afirmar que todas as técnicas testadas apresentaram lubrificação e refrigeração suficiente para evitar a ocorrência de danos térmicos às peças. Em relação ao MQL, a combinação da lubrificação eficiente com a elevada

condutividade térmica do rebolo de CBN compensou a baixa capacidade de refrigeração desta técnica, de forma a evitar danos térmicos que levariam ao descarte da peça, porém não foram suficientes para obtenção de resultados satisfatórios o suficiente para substituição do método convencional, como observado nos resultados obtidos de rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, emissão acústica e potência consumida. Neste sentido, a utilização do sistema de limpeza associado ao MQL e o aumento da vazão de fluido que, mesmo em seu maior valor, ainda é drasticamente menor que o utilizado no método convencional, tornaram esta técnica consideravelmente mais competitiva em relação ao MQL tradicional (sem limpeza) e, portanto, uma potencial substituta à aplicação abundante de fluidos, que ainda hoje é a técnica mais utilizada industrialmente em processos de retificação.

5. CONCLUSÕES

Analizando os resultados obtidos após os ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340, temperado e revenido, com rebolo de CBN, em sete diferentes condições de lubrificação (convencional, MQL – 40 ml/h, MQL + Limpeza – 40 ml/h, MQL – 80 ml/h, MQL + Limpeza – 80 ml/h, MQL – 160 ml/h e MQL + Limpeza – 160 ml/h, pode-se concluir que:

- A utilização do sistema de limpeza aumentou significativamente a performance da técnica MQL, melhorando todos os parâmetros de saída analisados em relação ao MQL tradicional (sem limpeza), devido à maior eficiência na remoção dos cavacos gerados, que reduziu a ocorrência de empastamento. Ainda assim, o método convencional foi o responsável pelos melhores resultados, devido principalmente à sua melhor capacidade de refrigeração em relação às demais técnicas.
- O aumento da vazão de fluido de corte nas técnicas MQL (com e sem limpeza) contribuiu para a melhora dos resultados obtidos, devido à maior quantidade de fluido entregue pelo jato de ar comprimido diretamente na interface de corte, que aumentou a refrigeração e, principalmente, a lubrificação desta região, favorecendo o processo.
- Não foram observados danos térmicos, microtrincas ou alterações microestruturais em nenhuma amostra após a retificação, independente da condição aplicada, indicando que todas as técnicas foram suficientemente eficientes em lubrificar e refrigerar o processo de maneira a não modificar as propriedades das peças.
- Desta forma, a técnica MQL com vazão de 160 ml/h associada ao sistema de limpeza foi a que apresentou desempenho mais próximo ao do método convencional. Através da análise das microscopias eletrônica de varredura e confocal, foi possível constatar que as superfícies geradas por estas duas técnicas apresentaram formas similares, indicando que as condições de corte dos processos foram semelhantes.
- A utilização da técnica MQL associada ao sistema de limpeza por ar comprimido e ao rebolo de CBN é uma alternativa viável para substituição do método convencional na retificação de aço ABNT 4340, temperado e revenido. Desta forma, é possível obter-se resultados similares com a importante vantagem de drástica redução no consumo de fluido de corte, minimizando assim os riscos ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores e os custos envolvidos com aquisição, manutenção e descarte de fluidos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado no conhecimento adquirido durante a realização desta pesquisa, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros, visando aprofundar os estudos sobre a técnica de MQL em processos de retificação:

- Avaliar o desempenho da melhor condição dentre as técnicas alternativas estudadas (MQL + Limpeza com vazão de 160 ml/h) em maiores velocidades de avanço, calculando a energia específica total (considerando energia consumida pela retificadora e pelos sistemas de MQL e de limpeza) e comparando com o método convencional.
- Utilizar outros tipos de fluidos de corte nas técnicas de MQL, como óleos vegetais e nano-fluidos.
- Ampliar a faixa de vazão dos ensaios MQL (por exemplo, até 320 ml/h) para confirmar se é possível igualar ou até mesmo superar o desempenho da técnica convencional, tendência essa observada em todas as variáveis de saída analisadas.
- Realizar ensaios com rebolo convencional (Al_2O_3) e comparar os resultados com os obtidos com o rebolo de CBN, visando obter qual a condição seria de melhor custo-benefício para substituição do método convencional.
- Ampliar a análise dos corpos de prova, através de técnicas de difração por raio-X (para determinação de tensões residuais) e microscopia de força atômica (para determinação de atrito), visando expandir a compreensão sobre os efeitos causados pela técnica MQL sobre a peça usinada.
- Ampliar a análise da superfície de corte do rebolo, através de técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por energia dispersiva (EDS), microscopia óptica digital 3D e microscopia confocal, visando expandir a compreensão sobre os fenômenos de desgaste de grãos e material ligante e empastamento em função das condições de lubrificação aplicadas.
- Ampliar o monitoramento durante os ensaios, através da utilização de dinamômetro (para aferição das forças de corte) e termopares (para medição das temperaturas).

REFERÊNCIAS

AGARWAL, S. Optimizing machining parameters to combine high productivity with high surface integrity in grinding silicon carbide ceramics. **Ceramics International**, v. 42, n. 5, p. 6244–6262, 2016.

AGARWAL, S. On the mechanism and mechanics of wheel loading in grinding. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 41, p. 36–47, 2019.

AGUIAR, P. R. et al. In-process grinding monitoring through acoustic emission. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 28, n. 1, p. 118–124, 2006.

ANDERSON, D.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 204, n. 1–3, p. 269–278, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E18-08b**. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E384-17**. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E92-17**. Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E140-12B(2019)e1**. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness. West Conshohocken, PA, 2019.

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

BABEL, R.; KOSHY, P.; WEISS, M. Acoustic emission spikes at workpiece edges in grinding: Origin and applications. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 64, p. 96–101, 2013.

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.

BATAKO, A. D. L.; GOH, S. Y. Workpiece roundness profile in the frequency domain: An application in cylindrical plunge grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 1–4, p. 277–288, 2014.

DA SILVA, R. B. et al. Electromechanical impedance (EMI) technique as alternative to monitor workpiece surface damages after the grinding operation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, n. 9–12, p. 2429–2438, 2018.

BAUMGART, C.; HEIZER, V.; WEGENER, K. In-process workpiece based temperature measurement in cylindrical grinding. **Procedia CIRP**, v. 77, p. 42–45, 2018.

BELENTANI, R. D. M. et al. Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 88–96, 2013.

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

BERETTA, S.; ROMANO, S. A comparison of fatigue strength sensitivity to defects for materials manufactured by AM or traditional processes. **International Journal of Fatigue**, v. 94, p. 178–191, 2017.

BIANCHI, E. C. et al. Analysis of the performance of superabrasive and alumina grinding wheels with different bonds and machining conditions. **Materials Research**, v. 6, n. 2, p. 239–246, 2003.

BIANCHI, E. C. et al. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado. **Cerâmica**, v. 57, n. 344, p. 431–437, 2011.

BIANCHI, E. C. et al. Application of Minimum Quantity Lubrication in Grinding. In: DAVIM, J. P. (Ed.). **Sustainable Manufacturing**. 1^a ed. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, 2013. p. 111–172.

BIANCHI, E. C. et al. Plunge cylindrical grinding with the minimum quantity lubrication coolant technique assisted with wheel cleaning system. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 2907–2916, 2018a.

BIANCHI, E. C. et al. Evaluating the effect of the compressed air wheel cleaning in grinding the AISI 4340 steel with CBN and MQL with water. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 2855–2864, 2018b.

BIGERELLE, M.; GILJEAN, S.; MATHIA, T. G. Multiscale characteristic lengths of abraded surfaces: Three stages of the grit-size effect. **Tribology International**, v. 44, n. 1, p. 63–80, 2011.

BOSWELL, B. et al. A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 1–4, p. 321–340, 2017.

BRINKSMEIER, E. et al. Metalworking fluids - Mechanisms and performance. **CIRP Annals**, v. 64, n. 2, p. 605–628, 2015.

BUTLER, D. L. et al. The characterisation of grinding wheels using 3D surface measurement techniques. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 127, n. 2, p. 234–237, 2002.

CAI, R.; ROWE, W. B. Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 12–13, p. 1391–1402, 2004.

CAMERON, A.; BAUER, R.; WARKENTIN, A. An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 1, p. 126–130, 2010.

CHO, N.; TU, J. Roundness modeling of machined parts for tolerance analysis. **Precision Engineering**, v. 25, n. 1, p. 35–47, 2001.

CHOI, T. J. et al. Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 1, p. 61–72, 2008.

DA SILVA, L. R. et al. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant-MQL in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 2, p. 412–418, 2007.

DAI, J. et al. Understanding the effects of grinding speed and undeformed chip thickness on the chip formation in high-speed grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 5–8, p. 995–1005, 2015.

DANESHI, A.; MÜLLER, K.; AZARHOUSHANG, B. Cylindrical plunge grinding of twist free surfaces by structured wheels. **Precision Engineering**, v. 51, n. June 2017, p. 481–489, 2018.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33–47, 2014.

DENKANA, B.; KÖHLER, J.; KÄSTNER, J. Chip formation in grinding: An experimental study. **Production Engineering**, v. 6, n. 2, p. 107–115, 2012.

DI ILIO, A.; PAOLETTI, A. Comparison between conventional abrasives and superabrasives in grinding of SiC-aluminium composites. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 2, p. 173–184, 2000.

DING, W. et al. Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 30, n. 1, p. 109–134, 2017.

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

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2014.

DOGRA, M. et al. Environment-friendly technological advancements to enhance the sustainability in surface grinding- A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 218–231, 2018.

ELANCHEZHIAN, J.; PRADEEP KUMAR, M. Effect of nozzle angle and depth of cut on grinding titanium under cryogenic CO₂. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 33, n. 13, p. 1466–1470, 2018.

EMAMI, M.; SADEGHI, M. H.; SARHAN, A. A. D. Investigating the effects of liquid atomization and delivery parameters of minimum quantity lubrication on the grinding process of Al₂O₃ engineering ceramics. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 15, n. 3, p. 374–388, 2013.

FRICKER, D. C.; SPEIGHT, A.; PEARCE, T. R. A. The modelling of roundness in cylindrical plunge grinding to incorporate wave shift and external vibration effects. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 220, n. 8, p. 1347–1358, 2006.

FUJIMOTO, M.; ICHIDA, Y.; SATO, R. Wear characteristics of vitrified cBN grinding wheels. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**, v. 2, n. 4, p. 570-578, 2008.

GE, Y. C. et al. Study on material removal mechanism of electrochemical deep grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 271, p. 510–519, 2019.

GOINDI, G. S.; SARKAR, P. Dry machining: A step towards sustainable machining – Challenges and future directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1557–1571, 2017.

GUO, C. et al. Power and wheel wear for grinding nickel alloy with plated CBN wheels. **CIRP Annals**, v. 56, n. 1, p. 343-346, 2007.

HADAD, M. J. et al. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 54–55, p. 10–17, 2012.

HADAD, M.; SADEGHI, B. Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 63, p. 1–15, 2012.

HADAD, M.; SHARBATI, A. Analysis of the effects of dressing and wheel topography on grinding process under different coolant-lubricant conditions. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 9–12, p. 3727–3738, 2017.

HASSUI, A.; DINIZ, A. E. Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 855–862, 2003.

HE, B. et al. A survey of methods for detecting metallic grinding burn. **Measurement**, v. 134, p. 426–439, 2019.

HECKER, R. L.; LIANG, S. Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 755–761, 2003.

HEINZEL, C.; ANTUPOV, G. Prevention of wheel clogging in creep feed grinding by efficient tool cleaning. **CIRP Annals**, v. 61, n. 1, p. 323–326, 2012.

HERMAN, D.; KRZOS, J. Influence of vitrified bond structure on radial wear of cBN grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 14, p. 5377–5386, 2009.

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

HUANG, X. et al. Influence of minimum quantity lubrication parameters on grind-hardening process. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 33, n. 1, p. 69–76, 2018.

JACKSON, M. J. Grinding and finishing processes. In: DAVIM, J. P. (Ed.). **Modern Machining Technology: A Practical Guide**. 1^a ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. p. 305–333.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 108, n. 1, p. 114–124, 2000.

KISHAWY, H. A. et al. Application of acoustic emissions in machining processes: analysis and critical review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, n. 5–8, p. 1391–1407, 2018.

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

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. **CIRP Annals**, v. 54, n. 2, p. 22–45, 2005.

KOPAC, J.; KRAJNIK, P. High-performance grinding-A review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, n. 1–3, p. 278–284, 2006.

KUMAR, S.; SINGH, D.; KALSI, N. S. Analysis of Surface Roughness during Machining of Hardened AISI 4340 Steel using Minimum Quantity lubrication. **Materials Today**:

Proceedings, v. 4, n. 2, p. 3627–3635, 2017.

KWAK, J. S. Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 3, p. 327–334, 2005.

KWAK, J. S.; SIM, S. B.; JEONG, Y. D. An analysis of grinding power and surface roughness in external cylindrical grinding of hardened SCM440 steel using the response surface method. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 3–4, p. 304–312, 2006.

LAVISSE, B. et al. The effects of the flow rate and speed of lubricoolant jets on heat transfer in the contact zone when grinding a nitrided steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 35, n. February, p. 233–243, 2018.

LEE, D. E. et al. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 2, p. 176–188, 2006.

LEE, S. W. et al. The effect of high pressure air jet on form accuracy in slot grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 128, n. 1–3, p. 67–72, 2002.

LI, H. N.; AXINTE, D. Textured grinding wheels: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 109, p. 8–35, 2016.

LIEW, P. J. et al. An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 114, p. 380–394, 2017.

LINKE, B.; KLOCKE, F. Temperatures and wear mechanisms in dressing of vitrified bonded grinding wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 6, p. 552–558, 2010.

LINKE, B. S. A review on properties of abrasive grits and grit selection. **International Journal of Abrasive Technology**, v. 7, n. 1, p. 46–58, 2015.

LINKE, B. S. et al. Grinding Energy Modeling Based on Friction, Plowing, and Shearing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 139, n. 12, p. 121009, 2017.

LOPES, J. C. et al. Application of minimum quantity lubrication with addition of water in the grinding of alumina. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, n. 5–8, p. 1951–1959, 2018.

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

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

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

LOPES, W. N. et al. Digital signal processing of acoustic emission signals using power spectral density and counts statistic applied to single-point dressing operation. **IET Science, Measurement and Technology**, v. 11, n. 5, p. 631–636, 2017.

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

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

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

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

MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. 1^a ed. New York: CRC Press, 2006.

MARINESCU, I. D. et al. **Tribology of Abrasive Machining Processes**. 2^a ed. [s.l.]: William Andrew, 2013.

MCDONALD, A.; BAUER, R.; WARKENTIN, A. Design and validation of a grinding wheel optical scanner system to repeatedly measure and characterize wheel surface topography. Measurement: **Journal of the International Measurement Confederation**, v. 93, p. 541–551, 2016.

MEENA, A.; EL MANSORI, M. Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications. **Wear**, v. 271, n. 9–10, p. 2412–2416, 2011.

MIA, M. et al. An approach to cleaner production for machining hardened steel using different cooling-lubrication conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 1069–1081, 2018.

NAJIHA, M. S.; RAHMAN, M. M.; KADIRGAMA, K. Performance of water-based TiO₂ nanofluid during the minimum quantity lubrication machining of aluminium alloy, AA6061-T6. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 1623–1636, 2016.

NGUYEN, T.; ZHANG, L. C. Realisation of grinding-hardening in workpieces of curved surfaces Part 1: Plunge cylindrical grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 4, p. 309–319, 2011.

NOVOVIC, D. et al. The effect of machined topography and integrity on fatigue life. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 2–3, p. 125–134, 2004.

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

OLIVEIRA, J. F. G. et al. Industrial challenges in grinding. **CIRP Annals**, v. 58, n. 2, p. 663–680, 2009.

OLIVEIRA, J. F. G.; FRANÇA, T. V.; WANG, J. P. Experimental analysis of wheel/workpiece dynamic interactions in grinding. **CIRP Annals**, v. 57, n. 1, p. 329–332, 2008.

PERVAIZ, S.; KANNAN, S.; KISHAWY, H. A. An extensive review of the water consumption and cutting fluid based sustainability concerns in the metal cutting sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 134–153, 2018.

PUERTO, P. et al. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **Procedia Engineering**, v. 63, n. 1996, p. 174–182, 2013.

PUSAVEC, F. et al. Transitioning to sustainable production - Part II: Evaluation of sustainable machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 12, p. 1211–1221, 2010.

RABIEI, F. et al. 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.

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

ROM, M. et al. Mathematical modeling of ceramic bond bridges in grinding wheels. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 147, p. 220–236, 2018.

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**. 2^a ed. [s.l.]: William Andrew, 2013.

RUZZI, R. de S. et al. Topographical analysis of machined surfaces after grinding with different cooling-lubrication techniques. **Tribology International**, v. 141, p. 105962, 2020.

SABERI, A. et al. Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 728–738, 2016.

SAGLAM, H.; UNSACAR, F.; YALDIZ, S. An experimental investigation as to the effect of cutting parameters on roundness error and surface roughness in cylindrical grinding. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 11, p. 2309–2322, 2005.

SARIKAYA, M.; GÜLLÜ, A. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 604–616, 2014.

SATO, B. K. et al. Grinding performance of AISI D6 steel using CBN wheel vitrified and resinoid bonded. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 5–6, p. 2167–2182, 2019.

SETTI, D. et al. Performance evaluation of Ti-6Al-4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 88, p. 237–248, 2015.

SHAO, Y. et al. Experimental Investigation of Residual Stress in Minimum Quantity Lubrication Grinding of AISI 1018 Steel. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 138, n. 1, p. 011009, 2015.

SHARIF, M. N.; PERVAIZ, S.; DEIAB, I. Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n. 5–8, p. 2447–2479, 2017.

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

SHARMA, V. S.; SINGH, G.; SORBY, K. A review on minimum quantity lubrication for machining processes. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 30, n. 8, p. 935–953, 2015.

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

SHOKOOHI, Y.; SHEKARIAN, E. Application of Nanofluids in Machining Processes -A Review. **Journal of Nanoscience and Technology**, v. 2, n. 21, p. 59–63, 2016.

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.

SIENIAWSKI, J.; NADOLNY, K. The effect upon grinding fluid demand and workpiece quality when an innovative zonal centrifugal provision method is implemented in the surface grinding of steel CrV12. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 960–972, 2016.

SILVA, L. R. et al. Study on the behavior of the minimum quantity lubricant - MQL technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 27, n. 2, p. 192–199, 2005.

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

SINGH, V.; RAO, P. V.; GHOSH, S. Development of specific grinding energy model. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 60, p. 1–13, 2012.

SINOT, O.; CHEVRIER, P.; PADILLA, P. Experimental simulation of the efficiency of high speed grinding wheel cleaning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 2, p. 170–175, 2006.

SOUZA, C. N. D. et al. Analysis of diametrical wear of grinding wheel and roundness errors in the machining of steel VC 131. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 26, n. 2, p. 209–212, 2004.

SUTOWSKI, P. The effect of process parameters on grinding forces and acoustic emission in machining tool steel 1.2201/NC10. **Journal of Mechanical and Energy Engineering**, v. 1, n. 1, p. 37–44, 2017.

TAWAKOLI, T. et al. Influence of the type of coolant lubricant in grinding with CBN tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 5, p. 734–739, 2007.

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**, v. 50, n. 6, p. 521–531, 2010.

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

TIAN, L. et al. The influence of speed on material removal mechanism in high speed grinding with single grit. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2015.

TIAN, Y. B. et al. Development of portable power monitoring system and grinding analytical tool. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 27, p. 188–197, 2017.

VERMA, N.; MANOJKUMAR, K.; GHOSH, A. Characteristics of aerosol produced by an internal-mix nozzle and its influence on force, residual stress and surface finish in SQCL grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 240, p. 223–232, 2017.

WANG, Y. et al. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 487–499, 2016a.

WANG, Y. et al. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in MQL grinding with different nanofluids. **Tribology International**, v. 99, p. 198–210, 2016b.

WEBSTER, J.; TRICARD, M. Innovations in abrasive products for precision grinding. **CIRP Annals**, v. 53, n. 2, p. 597–617, 2004.

WECK, M.; HENNES, N.; SCHULZ, A. Dynamic behaviour of cylindrical traverse grinding processes. **CIRP Annals**, v. 50, n. 1, p. 213–216, 2001.

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

WINTER, M. et al. Life cycle assessment of cubic boron nitride grinding wheels. **Journal of Cleaner Production**, v. 107, p. 707–721, 2015.

XU, X. Experimental study on temperatures and energy partition at the diamond-granite interface in grinding. **Tribology International**, v. 34, n. 6, p. 419–426, 2001.

ZHANG, Y. et al. Analysis of grinding mechanics and improved predictive force model based on material-removal and plastic-stacking mechanisms. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 122, p. 81–97, 2017.

ZHAO, B. et al. Effect of grain wear on material removal behaviour during grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy with single aggregated cBN grain. **Ceramics International**, v. 45, n. 12, p. 14842–14850, 2019.

ZHOU, L. et al. Theoretical analysis on effects of grain size variation. **Precision Engineering**, v. 50, p. 27–31, 2017.

ZHOU, W. et al. A comprehensive investigation of plowing and grain-workpiece micro interactions on 3D ground surface topography. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 144, n. June, p. 639–653, 2018.

ZHU, Y. et al. Effect of grinding wheel speed on self-sharpening ability of PCBN grain during grinding of nickel-based superalloys with a constant undeformed chip thickness. **Wear**, v. 426–427, p. 1573–1583, 2019.

APÊNDICES

Apêndice A: Programa para retificação dos corpos de prova.

LINHAS	FUNÇÕES
000	X 680.000
001	G 00.71
002	X (Posição de contato peça-rebolo + 0.2)
003	G 91
004	G 61
005	M 01
006	G 01.71
007	F 00001
008	G 04.02.00
009	X -0.2
010	G 04.05.00
011	X 0.01
012	X -0.11
013	G 04.08.00
014	X 0.01
015	X -0.11
016	G 04.08.00
017	G 25 N 11.16.99
018	G 25 N11.16.39
019	X 0.1
020	G 00.71
021	X 2.000
022	M 02
023	M 30

Observação: Na linha 002 do programa, é necessário inserir a posição na qual ocorre o contato do rebolo com o corpo de prova, somado 0.2 mm (fator de segurança). Assim, se, por exemplo, foi obtida a posição de contato em 392.700, deve-se colocar o comando X 392.900. A linha 7 da programação estabelece a velocidade de avanço, sendo necessário selecionar analogicamente a porcentagem do avanço a ser utilizado durante o processo (10% a 200%).

Apêndice B: Programa para impressão do desgaste do rebolo.

LINHAS	FUNÇÕES
033	X 680.000
034	G 00.71
035	X (Posição de contato cilindro-rebolo + 0.2)
036	G 91
037	G 61
038	M 01
039	G 01.71
040	F 00001
041	G 04.02.00
042	X -0.1
043	G 25 N 041.042.08
044	G 04.08.00
045	X 0.5
046	M 02
047	M 30

Observação: Na linha 035 do programa, é necessário inserir a posição na qual ocorre o contato do rebolo com o cilindro somado de 0.2 mm (fator de segurança). Assim, se, por exemplo, foi obtida a posição de contato em 392.700, deve-se colocar o comando X 392.900.