UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

JEAN MACHADO MACIEL DA SILVA

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA VÓRTICE PARA LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DO AÇO AISI 4340

BAURU - SP
2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

POSMAT
PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MATERIAIS

JEAN MACHADO MACIEL DA SILVA

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA VÓRTICE PARA LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DO AÇO AISI 4340

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais da Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho", Campus de Bauru, para obtenção do título de Doutor em Ciências e Tecnologia de Materiais, sob orientação do Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi.

BAURU - SP

2022

Silva, Jean Machado Maciel da.
Aplicação da tecnologia vórtice para limpeza da superfície de corte do rebolo na retificação do aço AISI 4340 / Jean Machado Maciel da Silva, 2022
96 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista. (Unesp) Faculdade de Ciências, Bauru, 2022

1. Retificação cilíndrica externa. 2. Mínima Quantidade de Lubrificante – (MQL). 3. Rebolo convencional. 4. Limpeza na zona de corte do rebolo. 5. Aço AISI 4340. 6. Tecnologia vórtice a baixa temperatura. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências. II. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

Faculdade de Ciências

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE JEAN MACHADO MACIEL DA SILVA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 14 dias do mês de outubro do ano de 2022, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de JEAN MACHADO MACIEL DA SILVA, intitulada **APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA VÓRTICE PARA LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DO AÇO AISI 4340** . A Comissão Examinadora foi constituida pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecanica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Professor Colaborador JOSÉ CLAUDIO LOPES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Câmpus de Bauru, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. NELSON KUWAHARA (Participação Virtual) do(a) DEG / Universidade Federal do Amazonas. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram doato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final Aprovado .

Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

DEDICATÓRIA

Além daqueles que comprazer laboram em prol da melhoria de vida do próximo, dedico à minha família e familiares.

AGRADECIMENTOS

Muito a agradecer. Muitas pessoas envolvidas. Muitas emoções sentidas. Deus, primeiramente, pois são muitas alegrias e benções concedidas. Permitiu equilíbrio, saúde e bem estar para assim poder concluir bom planejamento e conclusão da missão.

Gratidão demais por minha mãe Edujanildes Maria Machado. Já se foi, mas sempre está comigo, do ladinho, é só fechar os olhos. Ao meu pai João Caciano pelas palavras de motivação.

Kellen Mara Silva Froes, esposa e conselheira. Abençoado suporte.

Meus filhotes Juan Guilherme e Evelyn Jane que as vezes não entendiam horas e horas debruçado sobre um teclado digitando e clicando desmedidamente.

Ao meu querido orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi. Pacientemente guiando e esclarecendo o que antes eu não conseguia perceber. Não colocou nenhum impeditivo quanto a distância, ao contrário, estreitou ao depositar confiança em minha capacidade de vencer um período tão complicado quanto o da pandemia.

Ao Dr. José Claudio Lopes pelo incondicional apoio em todos os meus movimentos para escrita, ensaios e tabulação de resultados.

Ao Laboratórios de Usinagem por Abrasão (LUA) e de Materiais (LABMAT), que permitiu realização de ensaios.

Reitero a gratidão à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) pela oportunidade dada em cursar o programa de Doutorado Interinstitucional (DINTER) e também ao Depto. de Expressão gráfica na figura dos amigos de trabalho.

Não posso esquecer de estender ao (CFPWL) Centro de Formação Profissional Waldemiro Lustosa-SENAI AM. Local onde pude contribuir com conhecimento, mas acima de tudo aproveitar as oportunidades e aprender mais sobre metal mecânica.

Amigos, colegas, conhecidos, todos que direta ou indiretamente de alguma forma, do seu jeito, palavras, gesto, dica, enfim me apoiaram em todos os sentidos.

“Lâmpada para meus pés é tua palavra e luz para meus caminhos”

(Salmos 119:105)

RESUMO

Em decorrência do desenvolvimento da indústria metalmecânica e a crescente demanda por formas mais ecológicas de utilização e manutenção dos recursos naturais, tem-se a perspectiva de utilizar produtos que gerem a menor quantidade de resíduos, de modo a serem menos nocivos ao meio-ambiente e à saúde do colaborador. Os processos de usinagem têm procurado por fontes alternativas de lubrirrefrigeração, as quais reduzam os malefícios gerados ao ecossistema. Seguindo essa vertente existe a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), a qual preza-se por uma maior eficiência do processo ao utilizar menos fluido se comparada com o uso de líquidos lubrirrefrigerantes em abundância. Entretanto, a utilização de MQL demanda certos cuidados no que se refere à limpeza da zona de corte, às trocas térmicas entre rebolo e peça, e possibilidade da ocorrência de empastamento na superfície de corte do rebolo. Isto posto, o presente projeto, analisa o comportamento da técnica de MQL associada à tecnologia vórtice que visa inserir ar frio na superfície de corte do rebolo. Logo, evitando a ocorrência do fenômeno de empastamento e consequentemente contribuindo para uma melhoria no processo de retificação. Dessa forma, foram analisadas algumas variáveis de saída do processo, sendo: rugosidade média aritmética (Ra), desvio de circularidade, relação G (volume de material removido/volume de rebolo desgastado), microdureza, microscopia óptica, confocal e eletrônica da superfície da peça, além das análises de força tangencial de corte e emissão acústica provenientes do processo. Os resultados foram satisfatórios em todas as variáveis de saída analisadas, com destaque para rugosidade com diferença de 1 micrometro comparado ao método tradicional. O método de resfriamento com uso do tubo vórtice obteve resultado para variável desvio de circularidade menor que 1 micrometro se comparado ao mesmo método abundante de refrigeração. Obteve-se ainda o excelente resultado para saída do desgaste diametral, com uma lubrificação tão efetiva e menos grãos fraturados, a ponto de superar o método abundante que apresentou 7,24 micrometros comparado ao uso da tecnologia tubo vórtice com valor 4,3% menor. Realizou-se ainda avaliações comparativas entre aplicação da nova técnica de lubrirrefrigeração MQL + CWCJ (Tubo Vórtice de Resfriamento e Limpeza do Rebolo), e também com os outros sistemas promissores como MQL + WCJ (Jato de Ar Comprimido de Limpeza do Rebolo) e MQL + CA (Ar Frio). Os métodos apoiados por MQL, com excelente atuação na limpeza refrigerada

do rebolo combinado com o baixo consumo de fluido de corte, que não gerou resíduo ou contaminação durante e ao final no processo.

Palavras-chaves: Retificação cilíndrica externa, mínima quantidade de lubrificante (MQL), rebolo superabrasivo, limpeza refrigerada da superfície de corte do rebolo.

ABSTRACT

As a result of industrial development and more ecological forms of maintenance and mainly use of natural resources, processes with less waste generation are sought, while also observing worker health, since there are products that are harmful to their health. In this way, the industry seeks alternatives for lubrication and cooling that reduce the damage generated to the ecosystem. Machining processes have been looking for alternative sources of lubrication and cooling, which reduce the harm generated to the ecosystem. Following this trend, there is the technique of Minimum Quantity of Lubricant (MQL), which values a greater efficiency of the process by using less fluid compared to the use of lubricating liquids in abundance. However, the use of MQL demands certain care regarding the cleaning of the cutting area, the thermal exchanges between the grinding wheel and the workpiece, and the possibility of the occurrence of clogging on the cutting surface of the grinding wheel. That said, the present project analyzes the behavior of the MQL technique associated with the vortex technology that aims to insert cold air into the cutting surface of the grinding wheel. Therefore, avoiding the occurrence of the phenomenon of jamming and consequently contributing to an improvement in the grinding process. Thus, some process output variables were analyzed, namely: arithmetic mean roughness (Ra), circularity deviation, G ratio (volume of material removed/volume of worn grinding wheel), microhardness, optical, confocal and electron microscopy of the surface of the part, in addition to the analysis of tangential cutting force and acoustic emission from the process. The results were satisfactory in all analyzed output variables, with emphasis on roughness with a difference of 1 micrometer compared to the traditional method. The cooling method using the vortex tube obtained results for a variable deviation of roundness of less than 1 micrometer compared to the same abundant method of cooling. An excellent result was also obtained for diametral wear output, with such effective lubrication and fewer fractured grains, to the point of overcoming the abundant method that presented 7.24 micrometers compared to the use of vortex tube technology with a value 4.3% lower. . Comparative evaluations were also carried out between the application of the new lubrication and cooling technique MQL + CWCJ (Vortex Tube for Cooling and Cleaning the Wheel), and also with other promising systems such as MQL + WCJ (Compressed Air Jet for Cleaning the Wheel) and MQL + AC (Cold Air). The methods supported by MQL, with excellent performance in the refrigerated cleaning of the grinding wheel combined with the low consumption of cutting

fluid, which did not generate residue or contamination during and at the end of the process.

Keywords: External cylindrical grinding, minimum amount of lubricant (MQL), superabrasive wheel, refrigerated cleaning of the cutting surface of the wheel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais parâmetros contidos na usinagem por retificação 25
Figura 2 - Representação gráfica do ciclo de uma retificação cilíndrica..... 26
Figura 3 - Elementos básicos considerados no processo de retificação 27
Figura 4 - Retificação cilíndrica: Cinemática do processo 29
Figura 5 - Ilustração da profundidade de corte no processo de retificação cilíndrica 32
Figura 6 - Processo de formação do cavaco 34
Figura 7 - Grão abrasivo desgastado 37
Figura 8 – Atuação do MQL na interface de usinagem por retificação 39
Figura 9 - Rebolo com grãos fraturados e sem arestas de corte..... 40
Figura 10 - Gráfico da leitura de comprimento da amostra 42
Figura 11 - Esquema para exemplificar Rugosidade média 43
Figura 12 - Demonstração de Desvio de circularidade de acordo com a norma ISO 1101:2012 44
Figura 13 - Micrografia da amostra retificada 46
Figura 14 - Microfissuras por tensão residual..... 47
Figura 15 - Sensor de Emissão Acústica 48
Figura 16 - Desgaste do rebolo: radial e de quina..... 49
Figura 17 - Dressador conglomerado 50
Figura 18 - Modelos e posição de dressagem..... 51
Figura 19 - Lubrirrefrigeração convencional 52
Figura 20 - Tipos de desgaste: fraturas do grão abrasivo 54
Figura 21 - Saída de ar quente e frio modelo: contra fluxo 57
Figura 22 - Regulador fluxo saída ar do Tubo Vórtice 58
Figura 23 - A- Entrada de ar; B- Saída ar quente; C- Saída ar frio; D- Sextavado com anel roscado; E- Gerador; F- Inserto furo passante de latão; G- Corpo Principal; H- Válvula de controle; I- Câmara de Vórtex;..... 59
Figura 24 - Dimensões da peça de trabalho usada no processo de retificação antes e depois dos testes. 68
Figura 25 - Configuração experimental para diferentes condições de lubrirrefrigeração, sendo: (a) MQL + CA, (b) MQL + CWCJ e (c) MQL + WCJ 70
Figura 26 - Rugosidade (Ra) para diferentes condições de lubrificação. 75
Figura 27 - Valores experimentais de superfície rugosidade Rz 76

Figura 28 - Desvio de circularidade 77
Figura 29 - Desgaste diametral do rebolo 79
Figura 30 - Microscopia óptica da peça para (a) a superfície da peça após a retificação. 79
Figura 31 - Razão G para diferentes condições de lubrificação 81
Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície da peça para (a) método de inundação, (b) MQL, (c) MQL + CA, (d) MQL + WCJ e (e) MQL + CWCJ 82
Figura 33 - Potência de retificação para diferentes condições de lubrirrefrigeração . 83
Figura 34 - Força tangencial de corte para diferentes tipos de lubrirrefrigeração 84
Figura 35 - Microscopia confocal da superfície da peça para: (a) método de inundação, (b) MQL, (c) MQL + CA, (d) MQL + WCJ e (e) MQL + CWCJ 86
Figura 36 - Microdureza para diferentes condições de lubrificação 87

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Etapas na retificação cilíndrica externa de mergulho 35
Quadro 2 - Métodos para avaliação da circularidade de um componente 45
Quadro 3 - Tipos de Fluido de Corte 53
Quadro 4 - Aplicações do TVRH no setor industrial 60
Quadro 5 - Parâmetros de usinagem 71

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a	Profundidade de retificação	[µm]
a_d	Profundidade de dressagem	[µm]
b	Largura de retificação	[mm]
CNC	Comando Numérico Computadorizado	
COANA	Conselho Nacional do Meio Ambiente	
d_e	Diâmetro equivalente	[mm]
d_s	Diâmetro do rebolo	[mm]
d_w	Diâmetro da peça de trabalho	[mm]
EA	Emissão acústica	[V]
F_n	Força normal de corte	[N]
F_t	Força tangencial de corte	[N]
G	Relação G	
h_{eq}	Espessura equivalente de corte	[mm]
h_{max}	Espessura teórica máxima do cavaco	[mm]
H	Medida de resistência mecânica do material	
HRc	Dureza Rockwell C	[HRc]
HV	Dureza Vickers	[HV]
l_c	Comprimento de contato	[µm]
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante	
n_s	Rotação do rebolo	[rpm]
n_w	Rotação da peça	[rpm]
P	Potência de corte na retificação	[W]
P_w	Potência elétrica consumida	[W]
QW	Taxa de remoção volumétrica	[mm^3/s]
Q´w	Taxa específica de remoção volumétrica	[mm^2/s]
R_a	Rugosidade média aritmética	[µm]
RMS	Valor médio quadrático *(root mean square)*	[V]
t	Tempo de retificação	[s]
t_s	Tempo de centelhamento *(spark-out)*	[s]

Uc	Energia específica de corte	[J/mm^3]
V	Volts (tensão elétrica)	[V]
V_f	Velocidade de avanço do rebolo ou mergulho	[mm/min]

1 Sumário

1 INTRODUÇÃO 19
1.1 Justificativa 22
1.2 Objetivo geral 22
1.3 Objetivos específicos 23
2 REVISÃO LITERÁRIA 24
2.1 Processo de retificação 24
2.1.1 Retificação cilíndrica de mergulho 26
2.1.2 Parâmetros de corte do processo de retificação 28
2.1.3 Velocidade de corte 29
2.1.4 Velocidade da peça 30
2.1.5 Velocidade de mergulho 30
2.1.6 Profundidade de corte 31
2.1.7 Espessura equivalente de corte 32
2.1.8 Taxa de remoção de material 33
2.1.1 Relação G 35
2.2 Variáveis de saída do processo de retificação cilíndrica 36
2.2.1 Rugosidade 36
2.2.2 Rugosidade e influência no comportamento mecânico 40
2.2.3 Rugosidade de profundidade (Rz) 41
2.2.4 Desvio de circularidade 43
2.2.5 Microdureza 45
2.3.5 Emissão acústica 47
2.2.6 Dressagem 49
2.2.7 Vibração 51

2.3 Tipos de Fluido de corte para MQL 52
2.3.1 Fluido de corte 53
2.3.2 Fluido de corte e os problemas de sua utilização 55
2.4 Tubo Vórtice Ranque-Hilsch 56
2.4.1 Princípio físico do tubo vórtice de Ranque-Hilsch 60
2.5 Técnica de Mínima Quantidade de Lubrirrefrigeração (MQL) 63
2.5.1 Sistema auxiliar de limpeza 63
2.6 Rebolo de óxido de alumínio (Al2O3) 64
2.6.1 Ligantes 65
2.7 Microscopia Óptica confocal 66
2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura 66
3 MATERIAIS E MÉTODOS 68
3.1 Características do corpo de prova e máquina retificadora 68
3.2 Fluidos de corte utilizados 69
3.3 Condições de usinagem 71
3.4 Medição de rugosidade 72
3.4.1 Aço AISI 4340 Temperado Revenido 74
4 RESULTADO E DISCUSSÕES 75
4.1 Rugosidade (Ra e Rz) 75
4.1 Desvio de circularidade 77
4.2 Desgaste diametral do rebolo 78
4.3 Razão G 81
4.4 Potência de retificação 83
4.5 Força tangencial de corte 84
4.6 Microscopia confocal 86
4.7 Microdureza 87
5 CONCLUSÕES 89

5.1 Sugestões para trabalhos futuros 90

6 Bibliografia 91

1 INTRODUÇÃO

A retificação é considerada um processo de usinagem por abrasão por possuir em seu sistema um rebolo constituído de grãos abrasivos, o qual rotaciona à altas velocidades (em relação ao torneamento e fresamento) e cuja finalidade é gerar alta precisão dimensional e geométrica, associada a um excelente acabamento superficial (DOS ANJOS et al., 2016a). Suas principais diferenças em relação aos outros processos de usinagem são: a maior área de contato entre a ferramenta de corte e a peça, ferramenta abrasiva com inúmeras arestas de corte com grãos dispostos aleatoriamente, assim como o excessivo atrito entre os grãos abrasivos e a superfície da peça (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, [s.d.]). Essa é empregada na indústria metalmecânica de precisão, possuindo alto valor agregado (ALVES; BIANCHI; AGUIAR, 2008).

Durante a retificação, grande parte da energia, gerada pelo contato entre rebolo e peça, é transformada em calor, aumentando a temperatura na zona de corte. Caso essa temperatura não seja mantida em níveis aceitáveis, podem ocorrer danos térmicos à peça como: trincas, queima superficial, mudanças na microestrutura e tensões residuais (MARINESCU, 2007).

Para adequar a dissipação de calor gerada, faz-se necessária a utilização de fluido de corte. Esses fluidos têm três funções principais: lubrificação do contato entre o material e o rebolo, remoção dos cavacos da zona de corte e refrigeração do sistema, diminuindo o atrito (BIANCHI et al., 2019). Por apresentarem tais funções, os fluidos de corte possibilitam um menor desgaste da ferramenta abrasiva, colaborando para o aumento da produtividade além de produzirem uma melhor qualidade dimensional e superficial, sendo esta última, um fator crucial na resistência da peça contra corrosão e fadiga (DEBNATH; REDDY; YI, 2014). Porém, sua utilização e manejo do fluido de corte deve ser tratada com cuidado, uma vez que os elementos químicos contidos nele são nocivos à natureza e, portanto, podem gerar problemas à saúde dos operadores e danos ao meio ambiente (SADEGHI et al., 2009a).

Segundo (SANCHEZ et al., 2010), cerca de 16% do custo total de fabricação se deve a utilização do método de lubrirrefrigeração convencional (uso de fluido de corte em abundância), no qual há a necessidade de manutenção do reservatório de fluido, controle de bactérias, filtragem e descarte, o que encarece demasiadamente o

processo.

Dessa forma, há uma procura por fontes alternativas de lubrirrefrigeração que mantenha ou melhore o acabamento e qualidade desse processo de usinagem, causando menos impactos ao meio ambiente e sendo economicamente viável. O modelo que emergiu e recebeu evidência em relação ao método tradicional foi a mínima quantidade de lubrificação (MQL), a qual utiliza a mistura de ar comprimido e óleo em forma atomizada, sendo aplicado à zona de corte (SADEGHI et al., 2009b). Ele se adequa bem nas mais diversas operações de usinagem, possibilitando uma menor quantidade de fluido, máquinas mais limpas e um ambiente de trabalho menos nocivo ao operador, (WALKER, 2013).

A eficiência energética, custos e sustentabilidade ganham cada vez mais importância no meio industrial. Uma das chaves da eficiência energética é a utilização racional e econômica de métodos de lubrirrefrigeração.

O modelo convencional de utilização de líquidos refrigerantes acaba se tornando uma alternativa não sustentável, uma vez que agride o meio ambiente através da alta toxidade desse fluido, além do alto custo para o descarte correto. Logo, o sistema de lubrirrefrigeração MQL minimiza os danos à natureza, pois utiliza na maioria das vezes fluidos sintéticos e biodegradáveis que colaboram com a redução dos custos de produção por não necessitar de descarte, devido as baixas quantidades de utilização e pelo mecanismo de aplicação ser na forma de gotas de dimensões micrométricas, mantendo assim a qualidade de acabamento e tolerância das peças retificadas.

Por meio dessa tese pôde-se aprimorar e difundir a aplicação da tecnologia de MQL em locais que ainda não é possível sua aplicação, devido à alta geração de calor e do fenômeno de empastamento decorrente do processo.

Estudos foram necessários para otimizar essa tecnologia, uma vez que contribuem para o desenvolvimento de novas técnicas. O ineditismo está na comparação de várias técnicas de limpeza e resfriamento onde foi apresentado um compilado para a retificação nas seguintes modalidades:

- Método de inundação, vezes citado nessa tese como abundante, termo utilizado no meio industrial. A palavra em inglês é *flood,* e, deste modo será assim denominado nos gráficos dos resultados e também pelo fato de ser conhecido e amplamente usado pelos

pesquisadores deste e de outros países nos artigos das revistas científicas;

- Mínima Quantidade de Lubrirrefrigeração (MQL);
- MQL + CA, ou ainda aplicação de Ar Frio. O termo CA vem da sigla que em inglês significa *Cold Air*, e assim, como o termo anterior e os que estão a seguir, também foram padronizados por pesquisadores na escrita em artigos;
- MQL + WCJ ou Jato de Ar comprimido para Limpeza do Rebolo. Os pesquisadores de outros países compreendem WCJ, sigla que em inglês significa *Wheel Cleaning Jet*;
- MQL + CWCJ ou Tubo Vórtice para Resfriamento e Limpeza do Rebolo. Essa nova modalidade de resfriamento tem sua tradução no inglês como *Cooling Grinding Wheel Cleaning Jet.*

Destaca-se ainda que a utilização da técnica de mínima quantidade de lubrificante associada à limpeza com ar frio utilizando da tecnologia de tubo de vórtice é um tema escasso na literatura, conferindo alto teor de ineditismo a essa pesquisa, principalmente quando implementado com a técnica MQL+CWCJ.

Há estudos que descrevem ensaios com outros materiais e técnicas de limpeza do rebolo no processo de retificação, entretanto essa pesquisa reúne compilado de dados que permitiu destacar qual melhor resultado dentre as técnicas adotadas considerando vários aspectos durante a usinagem. Assim, ao adotar esta última modalidade no processo de retificação, neste caso MQL+CWCJ, pode-se perceber efetiva contribuição em relação a sustentabilidade além disso, uma retificação mais econômica, limpa e sustentável.

Este trabalho estrutura-se em 10 capítulos. Para compreensão e contextualização do processo de retificação há um estudo bibliográfico que se apresenta no capítulo 2. Sobre tipos de fluidos de corte capítulo 3. Além disso, estudos sobre outros métodos de lubrirrefrigeração também são abordados. Os materiais e métodos são descritos no capítulo 7. Discussão capítulo 8. As conclusões obtidas pelos resultados da limpeza com ar comprimido refrigerado usando tecnologia vórtice e demais técnicas é apresentado no capítulo 9.

1.1 Justificativa

A eficiência energética, custos e sustentabilidade ganham cada vez mais importância no meio industrial. Uma das chaves da eficiência energética é a utilização do fluido de corte de maneira racional e econômica. O modelo convencional de utilização de líquidos refrigerantes acaba se tornando uma alternativa não sustentável, uma vez que agride o meio ambiente através da alta toxidade desse fluido, além do alto custo para o descarte correto. Logo, o sistema de lubrirrefrigeração MQL minimizam os danos à natureza, pois utilizam na maioria das vezes fluidos sintéticos e biodegradáveis que colaboram com a redução dos custos de produção por não necessitar de descarte, devido as baixas quantidades de utilização e pelo mecanismo de aplicação ser na forma de gotas de dimensões micrométricas, mantendo assim a qualidade de acabamento e tolerância das peças retificadas.

Pretende-se através desse estudo aprimorar e difundir a aplicação da tecnologia de MQL em locais que ainda não é possível sua aplicação, devido à alta geração de calor e do fenômeno de empastamento decorrente do processo.

Além disso, ao permitir a inserção de novas técnicas eficientes de lubrirrefrigeração, promove-se ao mesmo tempo a assistência à saúde dos trabalhadores. Tanto a retificação quanto outras modalidades de usinagem, devem ser isentos de uma atmosfera tomada por microgotículas oriundas da alta velocidade da ferramenta e peça. Tomada por uma nuvem de fluido de corte disperso no ar, o ambiente de labor se torna insalubre.

A justifica é fundada não somente no desejo de fornecer alternativa sustentável de lubrificação para o processo de retificação cilíndrica, mas também, em assistir uma classe trabalhadora, que acima de tudo é muito tem sua condição salubre de trabalho negligenciada.

1.2 Objetivo geral

Analisar e comparar os resultados obtidos na retificação cilíndrica do aço AISI 4340 temperado e revenido, utilizando um rebolo superabrasivo com diferentes métodos de lubrirrefrigeração.

1.3 Objetivos específicos

a) Comparar os métodos de lubrirrefrigeração: convencional, MQL, MQL associado à limpeza com ar comprimido, além do MQL associado à limpeza com ar comprimido refrigerado pela tecnologia vórtice.
b) Avaliar comportamento através da análise das seguintes variáveis de saída: rugosidade, desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo ou relação G, microdureza, potência, vibração.

2 REVISÃO LITERÁRIA

Essa secção apresenta os temas fundamentais abordados e relacionados a esse trabalho. Desse modo esse tópico visa o entendimento e embasamento dos seguintes constituintes: fluidos de corte, mínima quantidade de lubrificante (MQL), utilização de jatos de ar comprimido na limpeza do rebolo no processo de retificação, tubo de vórtice, sistema de aplicação de MQL, e parâmetros no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340 temperado e revenido.

2.1 Processo de retificação

Na retificação cilíndrica existe a necessidade da ferramenta de corte rotacionar em altas velocidades se comparado ao processo de fresamento por exemplo. O disco abrasivo que possui arestas de corte na face de contato, ao tocar a peça de trabalho, retira material por abrasão. É uma operação que permite conseguir precisão dimensional, qualidade na superfície e tolerâncias geométricas dentro de padrões conforme especificado em projeto. (ANJOS *et al*., 2016).

Na retificação cilíndrica há algumas diferenças significativas se comparado a outros processo de desbaste, pois, o rebolo possui uma face de contato grande, garantindo dessa maneira que várias arestas de corte, dispostos aleatoriamente, toque ao mesmo tempo a face da peça de trabalho. O atrito é constante e deste modo há geração de calor nessa interface (BRINKSMEIER,1999). Ela é empregada na indústria metalmecânica de precisão, possuindo alto valor agregado (ALVES, 2008).

A qualidade superficial conferida a uma peça se dá mediante o processo de retificação e segundo (BEHERA; GHOSH; RAO, 2018)) exige precisão quanto as pequenas tolerâncias e garantia de acabamento superficial conforme requisitos do projeto.

A Retificação é um importante processo da cadeia produtiva, pois é tida como uma das últimas etapas de manufatura e manter sua integridade nessa fase é imprescindível sob pena de perder o componente e obter prejuízo pelo seu não aproveitamento (BIANCHI et al., 2019). Portanto, conhecer e definir bem os parâmetros desse processo de usinagem tem grande relevância, deste modo minimizar ou até mesmo excluir as probabilidades de erros é a premissa para aumento de produtividade (ANDERSON; WARKENTIN; BAUER, 2008b).

Concordante e discordante são as duas formas de realizar o processo de retificação de uma peça. Na modalidade concordante tanto a peça quanto o rebolo rotacionam em sentidos iguais.

Para modalidade discordante a peça gira no sentido oposto em relação ao giro do rebolo e segundo Rowe (2014) na opção de retificação discordante temos forças menores de atuação no contato. Afirma-se ainda que o acabamento superficial apresenta rugosidade menor. Um menor desgaste do rebolo também é elencado como vantagem na usinagem discordante (ROWE.; 2014).

Os parâmetros de entrada no sistema influenciam o resultado da retificação, ou seja, o tipo de máquina retificadora, material da peça de trabalho e rebolo escolhido para retificar, impacta diretamente os resultados para adquirir precisão e tempo de vida do rebolo conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Principais parâmetros contidos na usinagem por retificação

Fonte: Adaptado de KLOCKE, 2009.

Esse processo exige etapas iniciais que vão desde a conferência da quantidade, qualidade e aspecto do fluido de corte que auxilia no controle de resfriamento da interface da peça e rebolo. Passa pela avaliação da face do rebolo que exigirá paralelismo e perpendicularidade para com a peça e sistema de fixação da peça e do rebolo na retificadora cilíndrica.

2.1.1 Retificação cilíndrica de mergulho

No processo de retificação cilíndrica de mergulho a ferramenta de corte, denominada de rebolo, executa movimento de avanço na direção perpendicular à superfície da peça a ser manufaturada. Geralmente, a largura do rebolo é maior que a região da peça a ser retificada, desse modo é possível retificar várias superfícies ao mesmo tempo, a partir da disposição de vários rebolos combinado a uma afiação adequada dos mesmos (HASSUI; DINIZ, 2003).

O avanço do rebolo sobre a peça durante a retificação provoca deformações elásticas, em função da falta de rigidez da ferramenta de corte assim como da peça ou até mesmo da própria máquina retificadora. Isso ocasiona uma diferença entre o avanço real e o efetivamente programado, conforme ilustrado na .

Com o objetivo de que no final do processo de retificação a profundidade avançada seja aproximadamente igual à profundidade teórica, há um intervalo de tempo chamado de centelhamento, em que as deformações elásticas são suprimidas e o rebolo remove o material da peça na proporção esperada. No tempo de centelhamento, não há avanço da ferramenta de corte sobre a peça, fazendo com que o avanço real se aproxime do avanço teórico, com isso a peça atinge as dimensões necessárias (HASSUI; DINIZ, 2003).

Figura 2 - Representação gráfica do ciclo de uma retificação cilíndrica

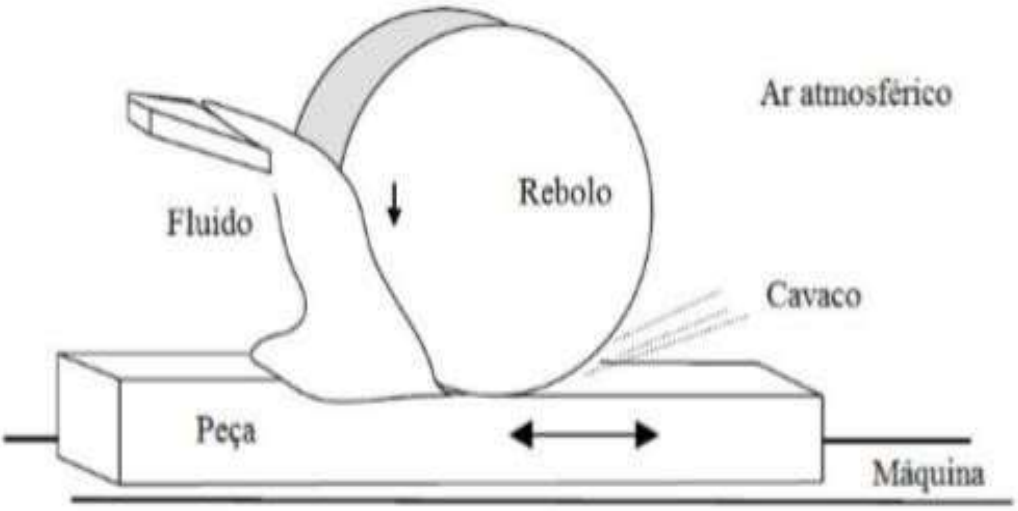
Fonte: Adaptado de Oliveira, 2002.

A representação gráfica do ciclo de uma retificação cilíndrica mostrada na Figura 2 se divide em 5 intervalos tempo. No intervalo T_1, início do ciclo, não há contato

entre a ferramenta de corte e a peça. Apenas o avanço do rebolo na direção da peça. Em T_2, acontece o contato do rebolo com a peça, aumentando a força de corte e provocando as deformações elásticas. O avanço é inferior ao programado, gerando uma diferença entre a posição, em termos de profundidade real e teórico. No intervalo T_3 ocorre a remoção do cavaco. Em T_4, tem-se o centelhamento e não há avanço do rebolo sobre a peça, assim a peça, o rebolo e a máquina se restauram das deformações elásticas provocadas em T_2. Nesse intervalo de tempo se adquirem tolerâncias dimensionais e geométricas da peça e a diminuição da rugosidade superficial. E, finalmente, em T_5 ocorre o recuo do rebolo.

Na Figura 3 estão representados os seis elementos básicos considerados no processo de retificação. Sendo eles: a máquina retificadora, o rebolo, o fluido de corte, a peça, a atmosfera e o cavaco produzido (MARINESCU et al., 2007).

Figura 3 - Elementos básicos considerados no processo de retificação



Fonte: MARINESCO et al.,2007.

A qualidade da peça ao final do processo de retificação está relacionada aos resultados obtidos, a partir da definição dos parâmetros de entrada e das variáveis de saída. Esses resultados são classificados em tecnológico, econômico e ambiental. Os resultados tecnológicos estão ligados ao acabamento da peça como rugosidade superficial e precisão dimensional. Os econômicos estão relacionados aos custos e tempo de produção, enquanto, o resultado ambiental está correlacionado à poluição e à saúde humana (WINTER et al., 2014). Considerando a etapa de acabamento por retificação a correspondência é de 20% a 25% dos custos de produção (WINTER et

al., 2014b). Entretanto, segundo (ANDERSON; WARKENTIN; BAUER, 2008b) as etapas de *setup*, ou ainda, etapa de ajuste dos parâmetros da máquina para o processo que irá minimizar erros e diminuir perdas.

2.1.2 Parâmetros de corte do processo de retificação

Para compreender os fenômenos que ocorrem durante o processo de retificação, bem como fazer os ajustes necessários para uma boa usinagem deve-se conhecer os parâmetros da retificação cilíndrica. Segundo (LOPES et al., 2018) existem diferenças entre geometria de rebolo e peça, isso exige fazer ajustes, comumente conhecido como *setup* de máquina, com objetivo de obter boa usinagem. As grandezas físicas do processo de retificação são:

a) d_s - diâmetro externo do rebolo (mm);

b) d_w - diâmetro da peça (mm);

c) a - Profundidade de corte (µm);

d) F_n - força normal de corte (N);

e) F_t - força tangencial de corte (N);

f) V_f - velocidade de mergulho (avanço) do rebolo (mm/min);

g) v_s - velocidade de corte ou periférica do rebolo (m/s);

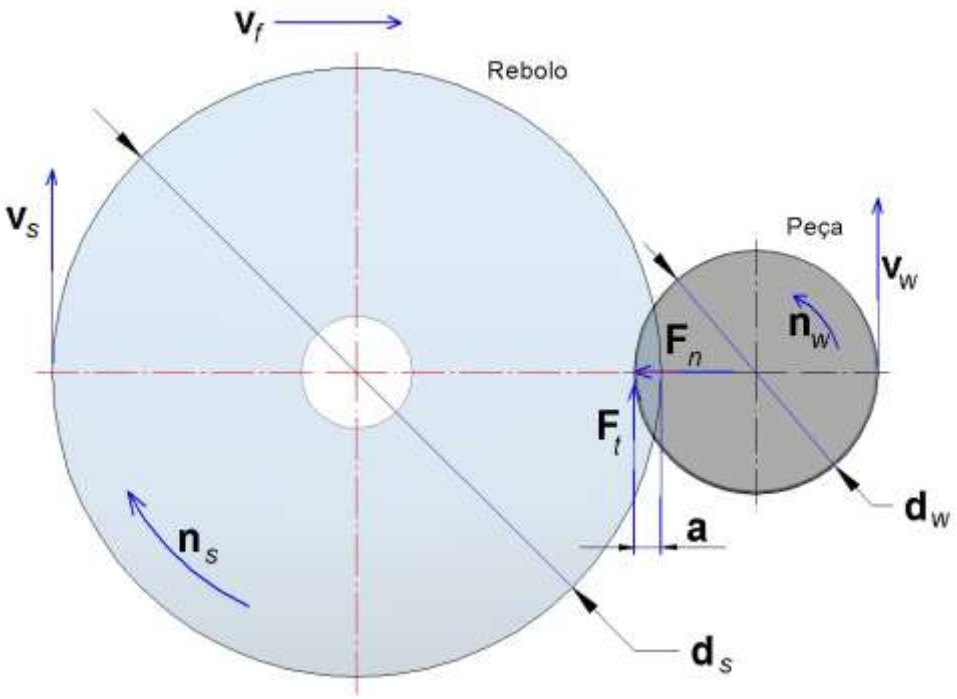
h) V_w - velocidade periférica da peça (m/s);

i) n_s - rotação do rebolo (rpm);

j) n_w - rotação da peça (rpm)

Para facilitar a interpretação pode-se visualizar as grandezas citadas anteriormente por meio da Figura 4 a seguir, que elenca 10 importantes parâmetros da retificação cilíndrica.

Figura 4 - Retificação cilíndrica: Cinemática do processo



Adaptado de Malkin, 1989

O tempo de usinagem reflete diretamente nos custos e para isso deve-se ajustar com cautela a profundidade de corte. Muito profunda pode causar queima na superfície do componente e desgaste prematuro do rebolo e desvio de forma na peça. Uma baixa profundidade incorre num tempo prolongado de operação e por consequência maior gasto de energia elétrica (WINTER, 2015). A caracterização dos parâmetros de corte será apresentada a seguir.

2.1.3 Velocidade de corte

A velocidade de corte tem conexão direta com o acabamento superficial na direção positiva quanto ao processo de usinagem, contudo negativa em relação a maior geração de energia térmica, além de elevar o consumo de potência. Entretanto, se tomarmos somente um grão do rebolo segundo (ALVES; BIANCHI; AGUIAR, 2008) será removido um volume menor de cavaco de tal sorte a diminuir as cargas sobre este grão abrasivo, colaborando ainda para maior vida útil do rebolo e aumentando sua dureza.

Velocidade de corte é conhecida também como velocidade periférica. Tomado um ponto qualquer no rebolo pode-se calcular a que velocidade ele se desloca. Essa

velocidade é determinada pela equação (1) a seguir:

$$v_s = \frac{\pi.d_s.n_s}{60.1000} \qquad (1)$$

Onde:

V_s = velocidade de corte do rebolo (m/s);
d_s = diâmetro do rebolo (mm);
n_s = rotação do rebolo (rpm).

Com objetivo realizar uma retificação onde se emprega altas velocidades segundo (JACKSON et al., 2001), deve-se adotar uso de rebolos de ligante metálico superabrasivos.

2.1.4 Velocidade da peça

A peça também permanece girando em torno do próprio eixo e por isso também possui velocidade periférica, conhecida também como velocidade da peça. A equação que define essa velocidade se assemelha com a anterior e pode ser verificada na equação (2):

$$v_w = \frac{\pi.d_w.n_w}{60.1000} \qquad (2)$$

Onde:

V_w = velocidade de corte da peça (m/s);
d_w = diâmetro da peça (mm);
n_w = rotação da peça (rpm).

Percebe-se que é importante conhecer o diâmetro externo do componente a ser usinado uma vez que a velocidade da peça é determinada de acordo com essa medida. Quanto ao aumento da velocidade implica na taxa de remoção de material (Q_w), que produzirá cavacos de espessura maior determinando, desta forma, a espessura equivalente (h_{eq}) (GRAF, 2004).

2.1.5 Velocidade de mergulho

Velocidade de mergulho tem relevância nesse estudo pois implica diretamente na força de corte tangencial. Consiste na velocidade com que o rebolo avança em direção ao componente usinado. A força tangencial é proporcional ao avanço (ALVES; BIANCHI; AGUIAR, 2008).

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

Centelhamento pode ser observado quando o rebolo conclui a retificação da face e ao retornar ao marco inicial de usinagem, ainda assim, por remoção elástica, remove material na superfície por onde o rebolo já havia passado (BALDO, 1994).

2.1.6 Profundidade de corte

A interface de usinagem por retificação se dá quando o rebolo e a peça, ambos em velocidades pré definidas se tocam, daí a velocidade com que o rebolo avança e atua sobre a superfície determina o avanço do corte, finalmente, a espessura da camada retirada do componente determina a profundidade de corte (BARCZAK; BATAKO; MORGAN, 2010a) e (MARINESCU, 2007).

As pesquisas de Winter (2015) mostraram que uma baixa profundidade de corte concorre para obtenção de uma superfície com baixa rugosidade. A tomada de decisão ocasiona também um aumento do tempo de usinagem.

Ao cessar o avanço do rebolo, depois que o mesmo alcançou a profundidade de corte desejada, ainda assim um centelhamento ocorre e é conhecido como *spark-out*, ou seja, rebolo e peça está em movimento, o mergulho já foi dado e um centelhamento ainda ocorre (MARINESCU et al., 2004), isso é positivo para o processo como um todo, pois promove uma estabilidade na usinagem.

A profundidade de corte real é encontrada pela diferença entre a profundidade de corte programada, suas deflexões e o degaste da ferramenta de corte acrescida da expansão térmica. Finalmente a profundidade real de corte pode ser determinada pela Equação (3).

A equação que define a velocidade de mergulho pode ser vista a seguir:

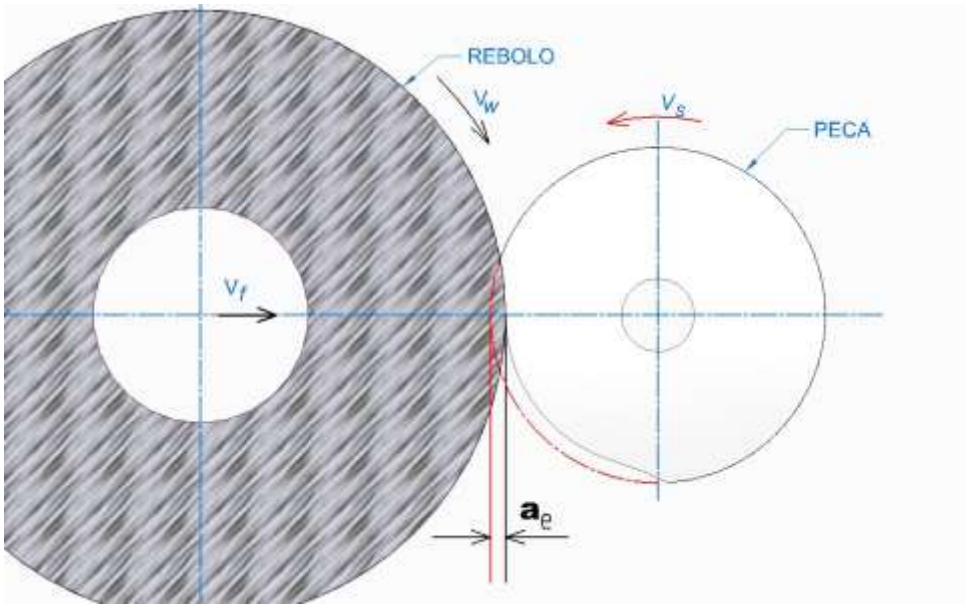
$$a_e = a - \delta - a_{sw} + a_t \qquad (3)$$

Onde:

a_w = profundidade de corte real;
a = profundidade de corte realizada no setup de máquina;
δ= deflexão do sistema (rpm);
a_{sw}=profundidade da camada desgastada do rebolo por revolução

A profundidade de corte está representada na Figura 5.

Figura 5 - Ilustração da profundidade de corte no processo de retificação cilíndrica



Fonte: adaptado de Rowe, 2014

Medir o componente a ser retificado antes é importante para realizar o ajuste dos parâmetros de corte e também posteriormente a retificação para constatação das medidas efetivas conforme projeto.

Segundo (MELLO; FUNES; CHINALI, 2014) calcular bem os parâmetros tais como profundidade de corte corrobora para uma menor deflexão da máquina. Essa deflexão refere-se à profundidade do rebolo na peça e pouca remoção de material em relação ao que foi planejado.

2.1.7 Espessura equivalente de corte

O parâmetro de espessura equivalente de corte está diretamente ligado ao comportamento do processo de retificação e associado a variáveis como força de corte, rugosidade, topografia da ferramenta de corte, entre outras, (MALKIN; GUO,

2007). A velocidade de corte é o que define a dureza dinâmica da ferramenta de corte, pois ao aumentar a velocidade de corte ocorre uma redução, proporcional, do número de grãos ativos do rebolo no mesmo intervalo de tempo, e isso leva a uma redução da força tangencial de corte (MALKIN, 1989). No entanto, o parâmetro de espessura equivalente de corte não considera o espaçamento dos grãos da ferramenta de corte, ficando evidente assim que, o comportamento da retificação está associado a uma combinação da espessura equivalente de corte e a distribuição das arestas de corte no rebolo (MARINESCU, et al., 2004).

Espessura equivalente de corte pode ser definida pela equação (4):

$$h_{eq} = \frac{Q_w}{V_s} = \frac{\pi.d_w.V_f}{60.1000.v_s} \qquad (4)$$

Onde:

h_{eq}= espessura equivalente de corte

Q_w= taxa de remoção do material (mm^3/s)

d_w= diâmetro da peça (mm)

V_f = velocidade de avanço da ferramenta de corte (mm/min)

V_s = velocidade de corte (mm/min)

2.1.8 Taxa de remoção de material

Quando se deseja aumentar a taxa de remoção do material é necessário alterar também a velocidade de avanço, entretanto, segundo (ALBERDI et al., 2011) e Rowe (2014) a vida útil da ferramenta diminui e conforme (RABIEI et al., 2014) essa taxa pode ser traduzida pelo produto entre volume de material removido e o tempo. É definida na equação (5) (MALKIN; GUO, 2007).

$$Q_w = \pi.d_w.a_e.\ V_w \qquad (5)$$

Onde:

Q_w = taxa de remoção de material (mm^3/s)

d_w= diâmetro da peça (mm)

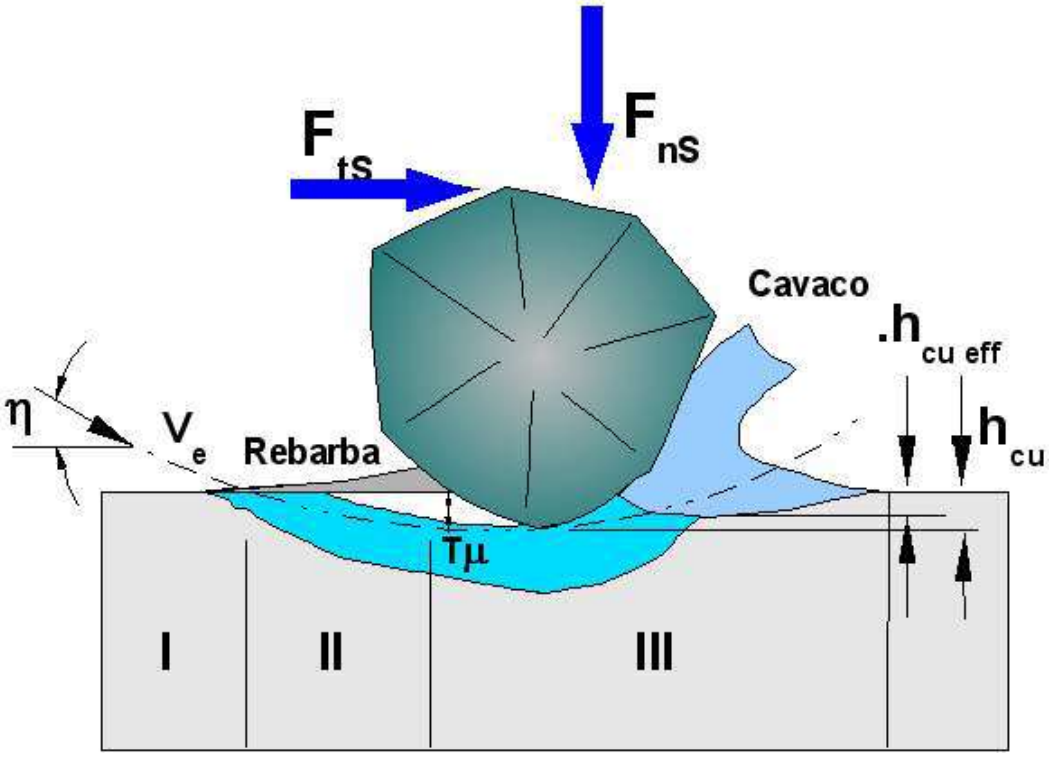
a_e = profundidade de corte (mm)

V_w = velocidade da peça (mm/min)

De acordo com Klocke (2009) as etapas de formação do cavaco se subdividem em 3 partes como apresentado na Figura 6, onde há primeiro o contato do rebolo e peça, mais precisamente, o grão abrasivo gerando uma deformação elástica do material da peça. Ao final, já na segunda etapa, do limite elástico começa a deformação plástica.

A formação do cavaco caracteriza a terceira fase, entretanto o formato do cavaco e tamanho dependerá do material da peça.

Figura 6 - Processo de formação do cavaco



Fonte: adaptado de Klocke (2009)

O processo de formação do cavaco se dá pela combinação entre fricção de dois elementos. O Quadro 1 apresenta detalhes das combinações para que ocorra deformação, remoção e os contatos.

Quadro 1 - Etapas na retificação cilíndrica externa de mergulho

Fase	Ocorrência	Contato
I	Região de formação elástica	Atrito grão/material da peça
II	Região de deformação elástica e plástica	Atrito grão/material da peça atrito interno do material
III	Deformação elástica e plástica + remoção de cavaco	Atrito grão/material da peça, atrito interno do material
-	Hcu	Espessura de usinagem
-	hcu eff	Espessura de corte efetiva
-	Tμ	Penetração de início de corte

A remoção é realizada pela ação de grãos, mais ou menos disformes, de materiais duros que são postos em interferência com o material da peça.

2.1.1 Relação G

Durante a retificação ocorre o desgaste do rebolo. A redução do rebolo se dá de três formas:

- A peça em atrito com grão abrasivo
- Quanto o grão abrasivo sofre fratura
- Quando ocorre fratura do ligante

O esforço que o rebolo é submetido incorre em solicitações mecânicas que geram aquecimento e perda de propriedades do ligante que une os grãos. Com tempo o ligante se deteriora(SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012a).

É possível medir quão eficiente é o rebolo por meio de uma relação dada pela equação 6, que permite calcular a razão entre o volume de material retirado e o volume gasto do rebolo conforme equação a seguir:

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} = \frac{a.V_w.t}{\pi.ds.\delta} \qquad (6)$$

Onde:

Z_w = volume do material removido (mm^3)

Z_s= volume de rebolo gasto (mm^3)

t= tempo de retificação (s)

δ= desgaste radial do rebolo (mm)

Rebolos que permitem alta produtividade e possui tempo de vida maior que os demais têm relação “G” alta, pois, desgastam-se menos e para (ANDERSON; WARKENTIN; BAUER, 2008a), são mais eficientes.

2.2 Variáveis de saída do processo de retificação cilíndrica

Nesta seção da revisão apresenta-se basicamente, dado pelas variáveis de saída os: impactos ambientais ocasionado pelo uso de fluido e ligado ao processo os custos de fabricação. O consumo de energia e a performance no uso do processo de retificação e usinabilidade com foco no acabamento. (WINTER et al., 2014a).

Rugosidade, desvio de circularidade, microdureza são algumas das variáveis que o trabalho agrupa, além de Relação G, Dressagem e vibração.

2.2.1 Rugosidade

A aparência superficial ou a rugosidade da peça é influenciada pelo método de produção, mas o intuito desse tópico é destacar o processo final da cadeia produtiva, neste caso a retificação e as nuances que interferem no alcance do dimensional e ensaios com rugosímetro.

Rugosidade são imperfeições contidas em uma superfície, podendo ser mensurada com recursos e equipamentos apropriados. A importância do acabamento superficial aumenta quando cresce a precisão de ajuste entre as peças. Uma menor tolerância de ajuste não é suficiente para garantir a funcionalidade do par acoplado (MARTINS, 2008).

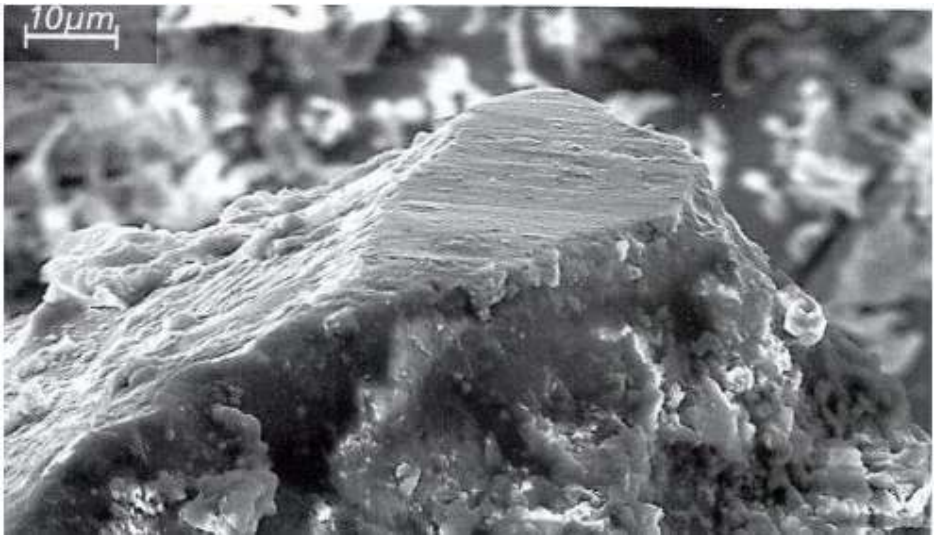
Quando as superfícies são observadas com recursos apropriados, revelam irregularidades. As orientações das irregularidades dependem do tipo de

processo que deu origem a superfície (OLIVEIRA, 2004). O comportamento de componentes mecânicos é bastante influenciado pela rugosidade. Dentre estas influências podemos destacar a resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes.

A rugosidade na superfície de uma peça que foi retificada corresponde a várias marcas deixadas pelo rebolo durante o processo.

Quando há desgaste do grão abrasivo, forma-se um platô na superfície do grão, conforme a Figura 7, aumentando as forças de corte, o atrito e a temperatura na região de corte, o que pode gerar problemas metalúrgicos ao material.

Figura 7 - Grão abrasivo desgastado



Adaptado Badger, et al (2010)

Quando os grãos abrasivos se desgastam pela ação da usinagem, é necessária uma nova dressagem para proporcionar aos grãos abrasivos do rebolo, novos gumes de corte (FERNÁNDEZ, 2011).

Controlar bem os parâmetros de corte resulta em uma usinagem uniforme. Sendo assim, quando a dressagem, que é a afiação do rebolo é corretamente executada, e o rebolo usado é adequado para o tipo de material e as condições de retificação são adequadas tem-se como resultado boa qualidade superficial.

Outros fatores que contribuem para bom processamento são: a lubrificação usada e o material da peça, características do dressador e condições dinâmicas da máquina além do tipo de grão, diâmetro do rebolo e tamanho da malha do mesmo (SHAJI; RADHAKRISHNAN, 2003). Além disso, de acordo com estudos, as forças de

corte, condições de Dressagem e o desgaste do rebolo influencia diretamente na qualidade superficial (PUERTO et al., 2013a).

Lubrificar a zona de contato entre peça e rebolo reduz a energia e a força de corte que o processo demanda, além disso o centelhamento é menor e também fragmentação do cavaco diminui o que corrobora para obtenção de qualidade superficial (WECK; HENNES; SCHULZ, 2001), (RAMESH; HAN, [s.d.]).

Em geral, uma peça usinada é examinada em termos macrogeométricos (direção, forma e orientação) e microgeométricos (rugosidade). Esses desvios na microgeometria da peça são examinados depois da operação de usinagem, ou mesmo durante, de acordo com as tolerâncias de rugosidade especificadas no projeto (MACHADO, 2011).

Na retificação pode-se avaliar a eficiência do processo ou proporção de grãos que perderam a afiação, analisando-se, assim a rugosidade da peça. Normalmente, ondulações e falhas devem ser evitadas na fabricação de uma superfície, pois representam erros de fabricação.

A retificação também influencia diretamente na rugosidade, sendo este um fator essencial na inspeção em várias aplicações industriais, como a produção e processamento de metais, semicondutores, cerâmicas, papel e plástico (DHANASEKAR, 2008).

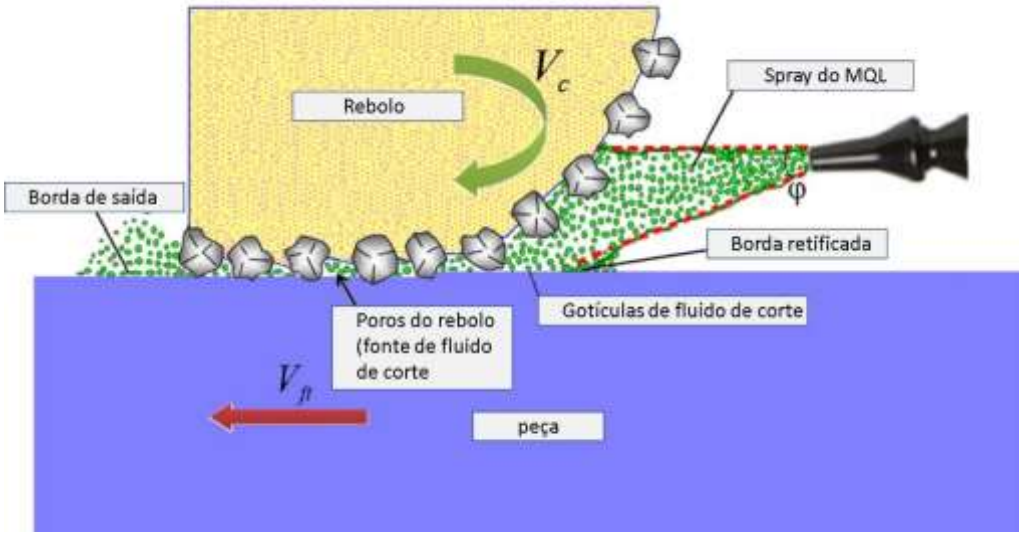
O efeito negativo da alta temperatura no processo de retificação deve ser evitado com uso do fluido de corte. Apesar das várias vantagens do uso de fluidos de corte nos processos de usinagem, apresentam sérias desvantagens, como problemas ecológicos e econômicos, que nortearam os trabalhos de pesquisa nas últimas décadas para reduzir ou mesmo eliminar o uso de fluido de corte.

Pesquisadores de vários países usam MQL como uma alternativa atraente para retificação. Este processo utiliza uma quantidade mínima de lubrificação e é conhecido também por retificação quase seca. Nesse sistema aerossóis, que são gotículas de óleo dispersas em um jato de ar, onde, conforme Figura 8, as gotículas de óleo transportadas pelo ar voam diretamente para a ferramenta de trabalho zona de corte, proporcionando as ações de refrigeração e lubrificação necessárias TAWAKOLI (2019).

Com MQL se reduz as forças normais e tangenciais do processo, entretanto, por outro lado aumenta a rugosidade da superfície em até 50%. Investigações por (Brinksmeier, 2018) confirmaram esses resultados e mostraram além disso, o tipo de

líquido refrigerante-lubrificante também pode influenciar consideravelmente o processo MQL.

Figura 8 – Atuação do MQL na interface de usinagem por retificação



Fonte: adaptado de TAWAKOLI (2019).

É sempre um problema quando o grão se desprende do ligante pois, além do cavaco que não é removido, formam-se rebarbas e por fim o grão fica alojado no material que sofreu deformação plástica. Outro grão que compõe a estrutura do rebolo deverá remover o material anterior e também os fragmentos que possivelmente não se desprenderam da superfície da peça (BEN FATHALLAH et al., 2009).

A forma do grão tem grande relevância pois quanto maior o número de arestas em contato com a face retificada menor a rugosidade obtida (BIGERELLE; HAGEGE; EL MANSORI, 2008).

Um grão que se desprende do ligante também se torna um problema pois, no exato momento que inicia o trabalho de riscar a peça e remover o cavaco, acaba se desprendendo do rebolo e vezes permanece cravado na peça ou pode também se desprender do rebolo ficar momentaneamente preso na peça e depois soltar, deixando um sulco e ou protuberâncias.

Algumas das possibilidades de tornar o processo ineficiente pode ser: a possibilidade de alguns grãos perderem suas arestas de corte e também lacunas que se criam pelo grão que se desprendeu do rebolo. Ambos casos estão ilustrados na Figura 9. Grãos fraturados ou sem aresta de corte alteram qualitativamente resultados da rugosidade.

Figura 9 - Rebolo com grãos fraturados e sem arestas de corte.

Fonte: adaptado de TAWAKOLI (2019).

Quanto maior a granulometria do rebolo, maior serão as marcas deixadas impressas no componente usinado. Maiores marcas propiciam oxidação precoce (ZHOU; LIN; PETTERSSON, 2016).

Outro fator que reduz uma alta rugosidade é aplicação de fluido de corte. Ausência de fluido ou a diminuição em proporções erradas aumenta a porcentagem de rugosidade podendo comprometer sua usabilidade e intercambialidade (HOLESOVSKY; HRALA, 2004).

2.2.2 Rugosidade e influência no comportamento mecânico

As variações mais recorrentes lidados à forma são: variação de ondulação, ovalização, retilineidade, planicidade, circularidade entre outros. O erro na peça compromete a intercambialidade num contexto de montagem impossibilitando bom funcionamento (ROSA, 2008). Durante o processo de usinagem o desvio macrogeométrico ocorre em guias defeituosas, folgas entre partes da máquina ou afrouxamento na fixação da peça. Os desvios microgeométricos são conhecidos como rugosidade, trata-se de variações ou irregularidades bruscas ou mínimas caracterizadas por sulcos (reentrâncias) ou protuberâncias (saliências) (MACHADO, 2008).

Segundo Gonçalves Jr (2001), para garantir, bom funcionamento de componentes intercambiáveis a rugosidade tem papel fundamental nesse cenário pois o estado de superfície de uma peça apresenta movimentos relativos entre faces de contato, influindo na:

- Qualidade de deslizamento
- Resistência ao desgaste
- Acoplamento forçado e possibilidades de ajustes
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluídos e lubrificantes
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece as camadas protetoras
- Resistencia à fadiga e à corrosão
- Aparência
- Vedação

Percebe-se, portanto, que o tamanho do grão abrasivo tem relevância quanto ao processo de medição pois, influencia bastante da taxa de deformação plástica. Maiores grãos deixarão maiores marcas bem como o tipo de abrasivo pode alterar as propriedades mecânicas (HOLESOVSKY; HRALA, 2004)

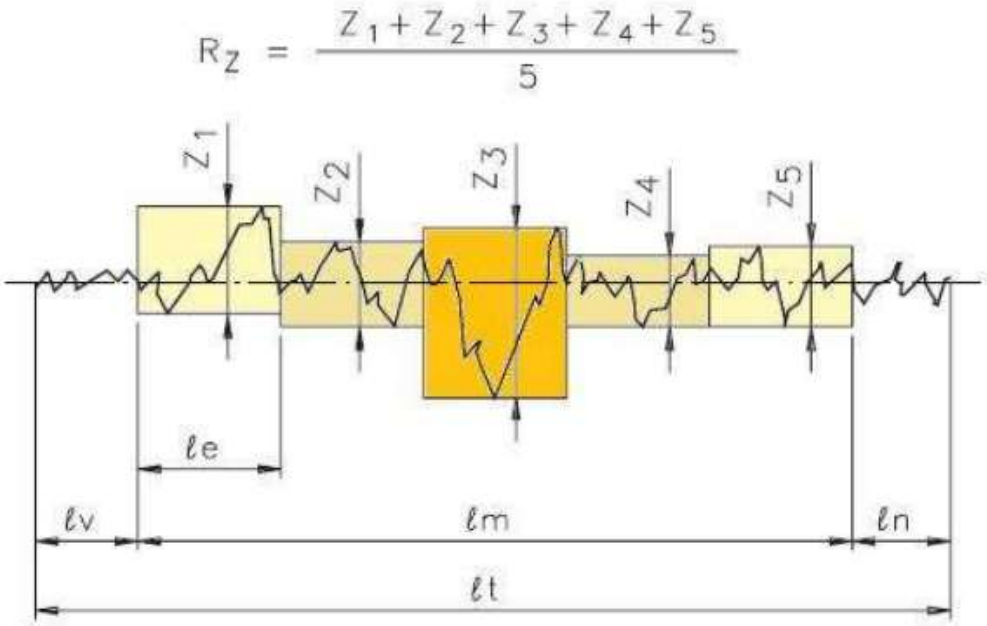
A NBR 8404 - Indicação do estado de superfície em desenho técnicos, fixa os símbolos e indicações complementares para a identificação do estado de superfície em desenhos técnicos. Pode-se, portanto, encontrar nesse documento da ABNT a tabela de intervalos de acabamento superficial que permite enquadrar qual foi o resultado de um processo de retificação. Valores obtidos em uma medição que estão entre 0,1µm e 1,6µm possui baixa rugosidade o que evidencia um bom *setup* de máquina e boa lubrificação (PUERTO et al., 2013a).

2.2.3 Rugosidade de profundidade (Rz)

Medido pela distância vertical entre o pico mais alto e o mais profundo vale dentro de uma amostragem de Rugosidade de profundidade média (Rz) comprimento. Calcula-se essa rugosidade por meio da média aritmética dos Rz em amostragens consecutivas, ou seja, é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no recorte (comprimento de amostragem).

Na representação gráfica do perfil apresentado na Figura 10, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no comprimento de amostragem (le).

Figura 10 - Gráfico da leitura de comprimento da amostra



Fonte: O autor (2020)

2.2.3.1 Aplicações e vantagens da utilização de Rugosidade Rz

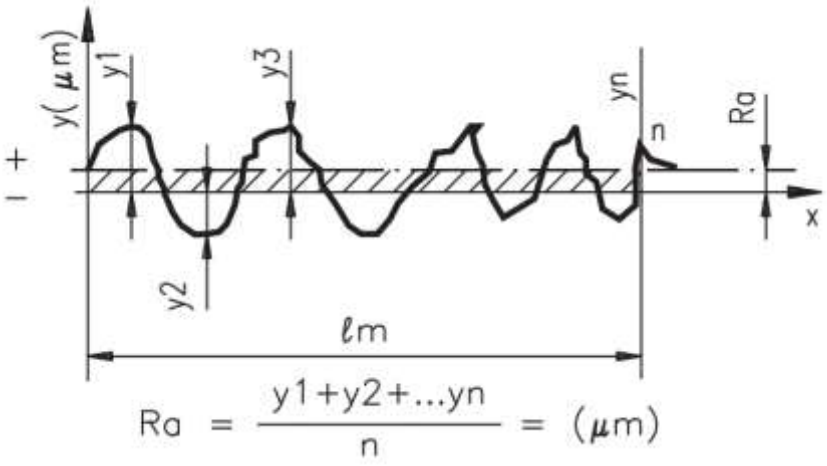
O parâmetro Rz pode ser empregado nos casos onde pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada. Por exemplo: superfícies de apoio e de deslizamento, ajustes prensados, e também em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido.

Dentre as vantagens é que este parâmetro informa a distribuição média da superfície vertical. Além disso é de fácil obtenção em equipamentos que fornecem gráficos, pois em perfis periódicos, define muito bem a superfície.

2.2.3.2 Rugosidade Ra

É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (**yi**), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (**/m**). Pode ser vista na Figura 11 e, conforme essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (**/m**).

Figura 11 - Esquema para exemplificar Rugosidade média



Fonte: O autor (2020)

O parâmetro Ra pode ser usado nos seguintes casos:

a) Quando for necessário o controle contínuo da rugosidade nas linhas de produção;
b) Em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de usinagem bem orientados (torneamento, fresagem etc.);
c) Em superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins apenas estéticos.

A Vantagem do parâmetro Ra se encontra no fato de ser o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo. É aplicável à maioria dos processos de fabricação. Devido a sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica). Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram muito seu valor. Para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade nesse parâmetro está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude.

2.2.4 Desvio de circularidade

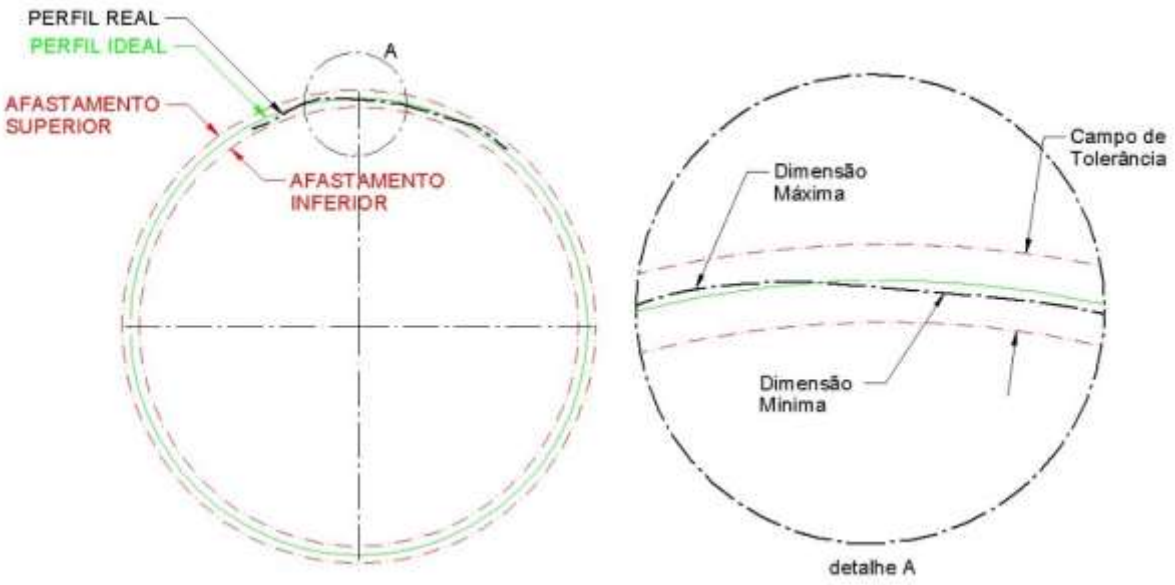
Como a execução de uma peça dentro do campo de tolerância dimensional não é garantia de funcionamento adequado é necessário que estejam dentro de formas predefinidas e deste modo possam trabalhar adequadamente e funcionar sem problemas. Entretanto, é quase impossível manter produção seriada de peças com

dimensões nominais exatas, também é muito difícil manter a forma de uma peça real rigorosamente igual ao projeto. A

Figura 12 apresenta os limites inferior e superior que fazem referência a área mais alta e mais baixa num perfil real da peça micrométrica.

O intervalo que envolve os dois limites, denominados afastamentos, refere-se ao campo de tolerância, neste caso as linhas adjacentes acompanham a forma circular que por sua vez caracteriza a medição dessa forma.

Figura 12 - Demonstração de Desvio de circularidade de acordo com a norma ISO 1101:2012

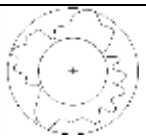
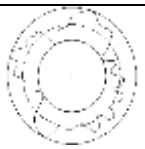
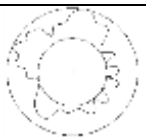


Fonte: adaptado Wangner, 2020

A norma ISO 1101 de 2012 que trata sobre Especificação Geométrica de Produtos (GPS) orienta que a maior variação, os picos, de medida capturada pelo instrumento deve ser a dimensão máxima e a menor variação, os vales, a dimensão mínima. Como o projeto terá afastamento superior e inferior para manter dentro de padrões de tolerância esse intervalo entre afastamentos é o campo de tolerância para a circularidade verificada.

No Quadro 2 são apresentadas algumas formas para controlar circularidade.

Quadro 2 - Métodos para avaliação da circularidade de um componente

Métodos de Avaliação de Circularidade	
MMC - A circularidade é determinada pela diferença entre os raios do Círculo Mínimo Circunscrito e o Círculo Inscrito concêntrico. O círculo de referência neste momento é o Círculo Mínimo Circunscrito.	
LC - A circularidade é determinada pela diferença entre os raios do círculo circunscrito e o círculo inscrito, ambos são concêntricos ao círculo da referência obtido - método dos quadrados.	
MZC - A circularidade é determinada pela diferença mínima entre os raios concêntricos dos círculos circunscrito e inscrito. O círculo da referência no método da zona mínima do centro é o círculo médio equidistante e concêntrico a estes dois círculos.	
MIC - A circularidade é determinada pela diferença entre os raios do Círculo Máximo Inscrito e o Círculo Circunscrito concêntrico. O círculo de referência neste método é o Círculo Máximo Inscrito.	

Fonte: Compilado Norma ISO (2012)

Controlar esse parâmetro é importante pois durante o processo de retificação a vibração que corrobora para micro desgaste e também aumento da variação da circularidade.

2.2.5 Microdureza

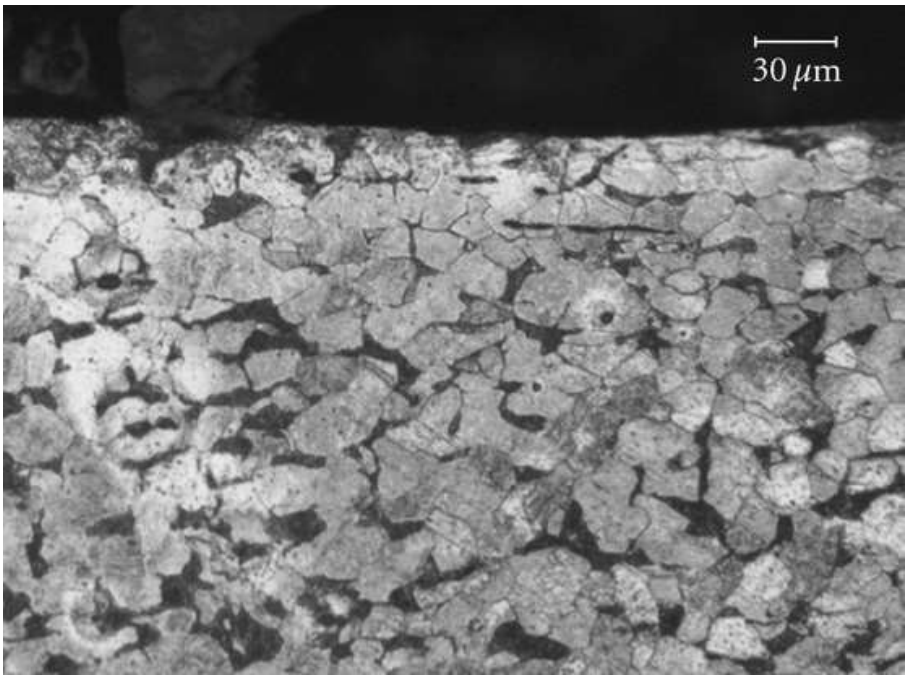
Durante o processo de retificação à medida que o rebolo avança em direção a peça, a temperatura aumenta substancialmente num curto período de tempo. Ocorre mudanças estruturais superficiais como o endurecimento superficial oriundo dessa sobrecarga de temperatura. A integridade superficial da peça é comprometida (HOLESVSKI; HRALA, 2004).

A temperatura que se acentua durante o início da usinagem viabiliza queima superficial, transformação de fase e consequentemente danos térmicos. Outros malefícios desse superaquecimento são: aumento da tensão residual, diminuição de resistência a fadiga e pode gerar endurecimento superficial e trincas (MALKIN, 1989)

A Figura 13 mostra uma análise metalográfica para revelar a transformação de

fase entretanto, segundo KUMAR (2011) nenhuma transformação de fase significativamente foi constatada. Esse ensaio foi realizado em aço carbono.

Figura 13 - Micrografia da amostra retificada



Fonte: Kumar; Yadav (2011)

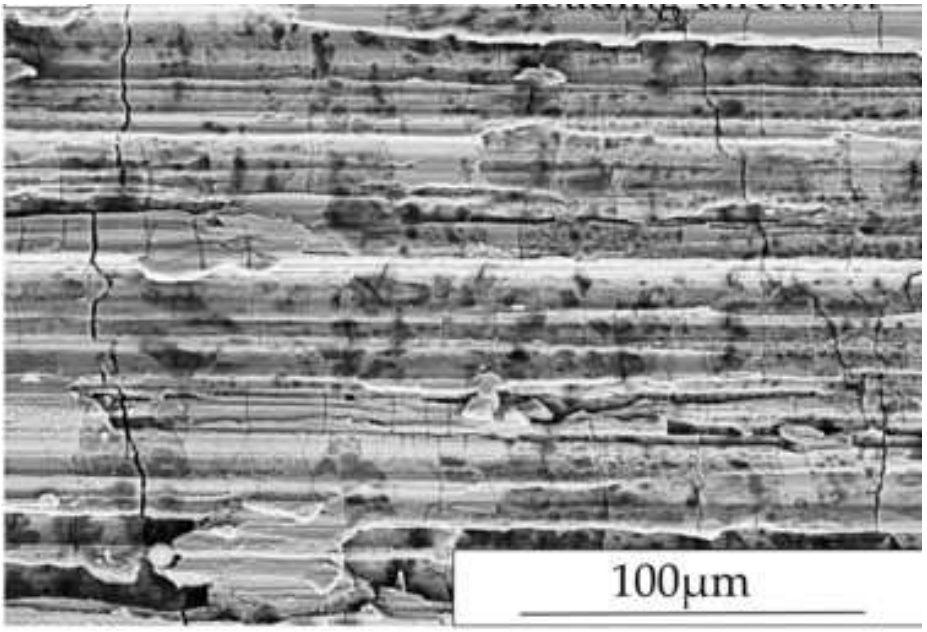
Segundo Salotis e Kolios (2015) aumento abrupto de temperatura e em seguida resfriamento súbito ocorre o endurecimento superficial na peça conhecido como têmpera, mas pode ocorrer o inverso pois conforme (MALKIN; GUO, 2007) se a peça já tiver passado pelo processo de têmpera a peça pode alcançar a faixa de temperatura que irá conferir o revenimento, deste modo, perderá a dureza.

Grande parte da energia do processo de retificação é transformada em calor. No início da usinagem isso é acentuado o que aumenta a possibilidade de queima da superfície da peça, transformação de fase, danos térmicos, amolecimento superficial, aumento da tensão residual, trincas e diminuição de resistência à fadiga (MALKIN, 1989). O trabalho de Nian (2017) afirma alguns aços possuírem dilatação térmica distintas e estarem mais suscetíveis a micro lesões residuais. A mesma autora investigou sobre a influência da retificação e análise da microestrutural de alguns aços que apresentam microfissuras, como apresentado na

Figura 14 iniciadas por retificação, tensões residuais e tração superficial

induzida com ausência de fluido de corte (ZHOU; PENG; PETTERSSON, 2016).

Figura 14 - Microfissuras por tensão residual



Fonte: ZHOU (2016)

Segundo Malkin (1989), os aços são retificados após o tratamento térmico. Com isso, a queima superficial pode ocasionar uma retêmpera, originando uma microestrutura frágil que prejudicará a resistência à fadiga. Em contraponto, devido ao aquecimento do material durante a retificação e seu resfriamento proporcionado pelo refrigerante, pode ocorrer o revenimento e perda de dureza superficial.

Portanto, a microdureza é uma variável que complementa os resultados da análise microscópica do material. Dessa forma, é importante para avaliar as possíveis transformações microestruturais que a peça possa passar durante sua produção e dessa maneira consegue-se uma melhor análise da integridade superficial.

2.3.5 Emissão acústica

Esta tese não prevê na conclusão dados sobre resultados de medição para análise de emissão acústica, entretanto, por ser um método de grande valia, fica registrado algum texto que esclarece resumidamente do que trata o tópico.

A utilização de sensores piezoeléctricos no monitoramento da emissão acústica no processo de retificação tem se tornado cada vez mais frequente devido ao seu

baixo custo e a sua capacidade de captar os sinais acústicos emitidos pelas partes que rotacionam da máquina retificadora (MARINESCU et al., 2007).

Para detectar anormalidades é desejável que se tenha um sistema que não necessita acompanhamento humano constante para monitoramento (KIM et al.2001).

O AE (Acoustic Emission) é um sinal sensível e suas faixas de frequência estão muito além das vibrações mecânicas e ruídos elétricos, o que torna esse sistema muito vantajoso para filtrá-los (AHN, 2001). AE ocorre de modo análogo em fluidos nos estados gasoso e/ou líquido. A fonte da emissão acústica em corpos sólidos pode ser um agente externo ou uma fonte interna como: deformação plástica, fratura, formação de uma trinca, transformação de fase e outros (LIAO et al., 2006).

A técnica emissão acústica pode ser usada para detectar: queima, iminência de colisão do rebolo com a peça, desgaste além de verificar dressagem entretanto, tem como desvantagem a variação da sensibilidade conforme montagem e posição que ocupa no sistema. Assim para obter boa sensibilidade deve ser montado bem próximo da interface de contato entre rebolo e peça, conforme Figura 15 (KHETTABI et al., 2017).

Figura 15 - Sensor de Emissão Acústica

Fonte: O autor

Segundo (MALKIN, 2008), a emissão acústica (EA) é definida como uma onda elástica transiente gerada por uma rápida dissipação de energia de uma fonte localizada no material, quando submetido a um estado de tensão. Na maioria dos casos está ligada à interação dos grãos abrasivos e a superfície do material. Dessa

forma, (WANG et al., 2001) afirmou que esta variável está intimamente ligada com as condições superficiais da ferramenta abrasiva e da peça que está sendo usinada.

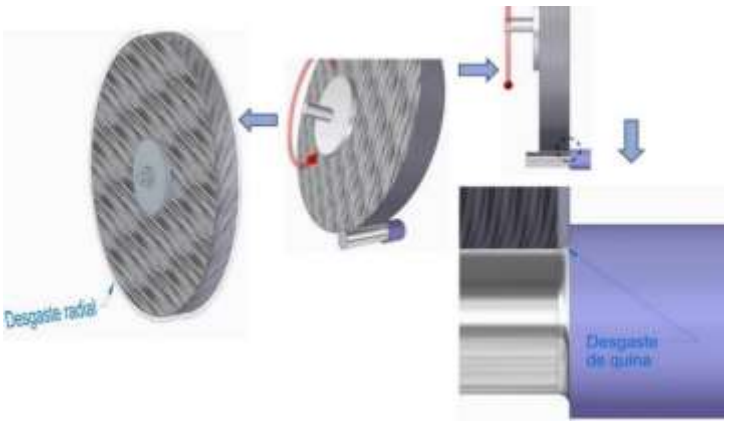
A emissão acústica tornou-se uma excelente fonte de monitoramento pois a grande maioria dos materiais emitem sons à altas frequências quando submetidos a esforços. Logo, através dessa técnica, pode-se analisar não só o desgaste do rebolo como também a integridade superficial da peça usinada, além da constatação de danos térmicos gerados no processo (KHETTABI, 2017; WEBSTER, 1996).

2.2.6 Dressagem

Dressagem é a afiação da superfície de corte do rebolo que é uma forma de limpar o rebolo cuja face de corte está carregada de cavacos nos poros e ainda, de tal sorte a remover da superfície de corte do rebolo grãos mal ancorados e/ou fraturar grãos arredondados que não removem mais material da peça.

O desgaste do rebolo é comum à medida que este cumpre seu papel removendo material da peça, portanto na medida que o rebolo sofre desgaste é necessário realizar o procedimento de dressagem. Esse desgaste pode ser tanto no raio da ferramenta quanto na quina conforme observado na Figura 16, contudo o exemplo é aplicado na retifica plana.

Figura 16 - Desgaste do rebolo: radial e de quina



Fonte: modelagem do autor (2022)

Comentado em tópicos anteriores, tanto os rebolos novos, ou ainda os recém-fabricados, bem como usados, depois de alguns ciclos de uso, podem apresentar problemas de irregularidades em sua face de contato e variação do raio. O desgaste

irregular da superfície de corte do rebolo não é desejado no processo de retificação bem como abrasivo com gumes arredondados e desgastados. Poros entre os abrasivos são muito importantes, porém se ficar entupidos impedem o alojamento de novos cavacos e deste modo dificulta a remoção de material, daí a necessidade de dressar o rebolo antes de iniciar o processo (PUERTO et al., 2013b).

Com desgaste excessivo, o rebolo apresenta forma e dimensões alteradas e não atende mais as especificações projetuais e geometria da peça. Uma face de rebolo lisa, ou ainda com grãos abrasivos arredondados, sem gumes vivos, acaba por não remover mais material ou não remover a mesma quantidade de material de forma igual em todo comprimento da face da peça. A seguir, na

Figura 17 uma opção de dressador concglomerado.

Figura 17 - Dressador conglomerado

Fonte: adesferramentas, 2021

As características geométricas e funcionais do rebolo são, portanto, restauradas pelo processo de dressagem, pois conforme Leonesio (2014) a oscilação gerada pelo rebolo são consideradas vibrações forçadas induzidas e a mecânica do processo de retificação depende criticamente da densidade da aresta de corte e de sua geometria.

Dressar o rebolo significa realizar uma limpeza com objetivo de desobstruir os

poros do rebolo. Ao passo que se realiza a dressagem a mesma operação que limpa a face de trabalho do rebolo também perfila o mesmo, ou seja, dá-se forma ao rebolo. Portanto, a topografia do rebolo e as condições sob as quais é preparado têm profunda influência no desempenho de retificação (SHAJI; RADHAKRISHNAN, 2003).

A seguir, apresentado à esquerda alguns modelos de dressadores com ponta de diamante e à direita a posição que o dressador assume em relação ao rebolo.

Figura 18 - Modelos e posição de dressagem

Fonte: site Geolit, 2021

Dressagem e procedimentos além de tipos dressadores não se esgotam nesse tópico pois demais detalhes de montagem e velocidade são igualmente importantes.

Dressar é, portanto, uma forma de reafiação que além de limpar os cavacos alojados nos poros e reafiar a superfície remove os grãos que assumiram forma arredondada.

2.2.7 Vibração

O monitoramento dos sinais de vibração em processos de retificação tem demonstrado uma correlação entre a vibração e a integridade da peça manufaturada. Desse modo é considerado um parâmetro importante, já que pode limitar a produção e a qualidade superficial das peças produzidas (AHRENS et al., 2016). A inspeção é visual e realiza-se um teste para quanto a existência.

Rebolos desbalanceados também geram vibração, fato que ocorre mediante falta de concentricidade entre o rebolo e o eixo (LEONESIO et al., 2014). Para compreender com mais clareza o princípio é o do batimento de uma peça, ou seja, o rebolo não deve apresentar variação de batimento radial ou axial. Para toda máquina

tem um procedimento e para cada rebolo os cuidados inerentes a sua correta montagem.

Um exame visual para verificar se apresenta danos aparentes é comum antes de iniciar remoção de material. Uma prova de som para constatar se apresenta trincas também é procedimentos comum. Manter um rebolo bem acondicionado livre de umidade excessiva e sem incidência direta de luz solar são protocolos que ajudam a diminuir a vibração (RASIM; MATTFELD; KLOCKE, 2015).

2.3 Tipos de Fluido de corte para MQL

Lubrificar e refrigerar são ações fundamentais aplicados em vários processos de usinagem e amplamente empregada no processo de retificação de peças e a composição do fluido possui relação ao tipo de processamento da peça que será usinada. É comum em empresas o método por inundação conforme Figura 19.

Figura 19 - Lubrirrefrigeração convencional

Fonte: site Lubrifoc (2014)

Dentre os elementos que compõem os fluidos temos: água e os óleos que poderão ser sintéticos, vegetais ou minerais. Com objetivo de ter um veículo para uma troca de calor com a peça, resfriando-a, em virtude do atrito que eleva a temperatura da peça temos o refrigerante, neste caso a água.

A definição das condições de lubrirrefrigeração se baseia na variação dos tipos de fluido de corte aplicados na técnica de MQL. Os tipos de fluidos de corte

comumente usados aoresentados a seguir no Quadro 3.

Quadro 3 - Tipos de Fluido de Corte

Ordem/descrição	Características	Aplicação
Fluido 1 – Biocut 9000	É um fluido sintético	Especificadamente, para aplicação na técnica de lubrirrefrigeração de MQL.
Fluido 2 – ME-2	É um fluido sintético	Destinado a aplicação na técnica de lubrirrefrigeração convencional. Este fluido é bastante difundido e utilizado no ambiente industrial em processos de usinagem.
Fluido 3 – Aquoil 180	É um fluido aquoso com base vegetal	Desenvolvido para aplicação na técnica de lubrirrefrigeração convencional. Possui baixo valor agregado e apresenta menor impacto ambiental.

O papel da lubrificação fica para os vários tipos de óleos que foram descritos ROWE, 2014. Há também um importante composto: os inibidores de corrosão que podem ter origem animal ou provenientes de nitritos. Há também a presença de umectantes/estabilizantes, fungicidas, bactericidas. Durante o uso do fluido para que o mesmo não altere seu volume no sistema contenedor há também presente componentes que inibem geração de bolhas de ar que são os antiespumantes além de conter aditivos de alta pressão (TAWAKOLI et al., 2011).

2.3.1 Fluido de corte

Durante a retificação, como visto em tópicos anteriores, há o contato do rebolo com o componente e nesse atrito gera um abrupto aumento de temperatura, portanto, o propósito de lubrificar e controlar a temperatura nessa interface é muito importante. Além disso promove ainda a limpeza da superfície do rebolo e peça, conhecida também como zona de contato (DE MELLO BELENTANI et al., 2014).

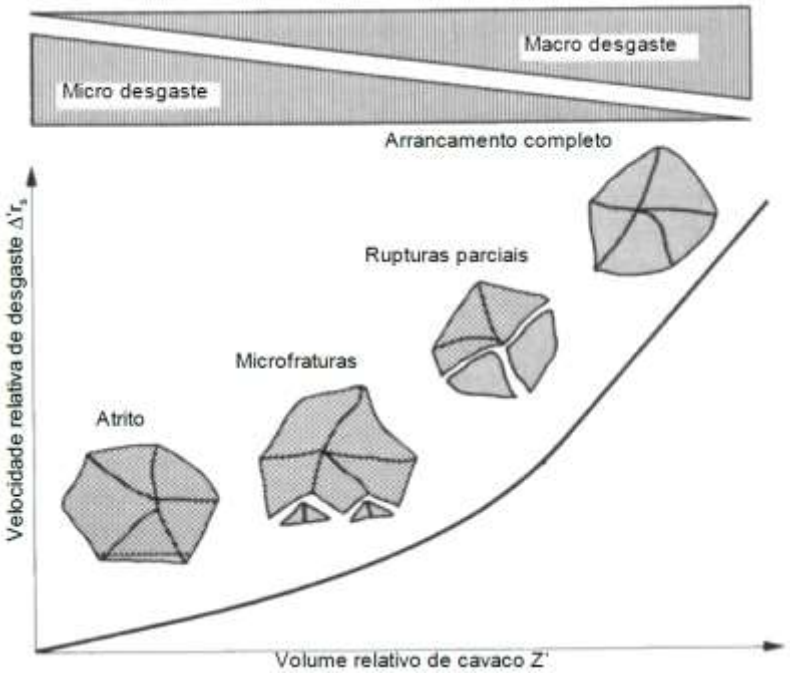
O aumento da produtividade tem conexão com a boa regulagem da

lubrirrefrigeração em qualquer processo de usinagem e não é diferente na retificação pois, pode-se aumentar a taxa de remoção de material se bem escolhido o tipo fluido e considerando as características físico-químicas do material e propriedades do rebolo.

Com ações preventivas e cálculos devidamente realizados há estudos que mostram um aumento da vida útil do rebolo, um melhor acabamento superficial, tanto em pequenas quanto longas áreas retificadas (DOS ANJOS et al., 2016b).

Outro fator de importância observado é menor força de corte e por fim alcançar dimensões finais do componente finalizado dentro dos padrões de tolerância geométrica e dimensional (SOKOVIĆ; MIJANOVIĆ, 2001). A falta de lubrificação ou até mesmo a incorreta lubrificação pode gerar microfraturas, ou rupturas parciais do grão abrasivo, conforme apresentado na Figura 20, a peça pode apresentar queima em sua superfície e deste modo comprometer seu uso.

Figura 20 - Tipos de desgaste: fraturas do grão abrasivo



Fonte: Metalografia CFPWL (2009)

Pode-se obter uma peça dentro de medidas previamente estabelecidas de acordo com projeto final no processo de retificação, entretanto os danos térmicos causados por lubrirrefrigeração ineficiente, podem afetar o componente mediante a queima ou pior, por microfissuras que podem apresentar propagação de trincas (SANCHEZ et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2012).

Além de queima da peça o rebolo sofre deformações induzidas termicamente e precoce desgaste podendo gerar prejuízos de matéria-prima, no caso do componente que pode ser inutilizado e de insumos de usinagem neste caso o rebolo que deve precisa ser dressado (SANCHES et al., 2017).

Aplicação adequada de fluido refrigerante aumenta vida útil da ferramenta, permite controlar com regularidade as medidas da peça até o seu dimensional final e pelo fato de ser um dos processos que finaliza a cadeia produtiva do objeto, confere grau de acabamento conforme a finalidade de uso, e deste modo, aprimorando as propriedades tribológicas conferindo resistência as tensões residuais e não menos importante diminuindo a corrosão prematura (DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

Uma das propriedades físicas que confere vantagem na retificação encontrada no fluido de corte é a baixa viscosidade. Quanto mais calor o liquido refrigerante retirar da superfície da peça melhor, ou seja, trocar esse calor e diminuir a temperatura da peça antes e depois do desbaste na região de corte, melhor o fluido cumpre um de seus papéis. Baixa viscosidade corrobora ainda com o sistema de filtros que a máquina possui.

Um ponto negativo quanto a viscosidade baixa são as gotículas de fluido de corte que se dispersam no ambiente em virtude da velocidade com que o rebolo trabalha. A névoa que ocupa o ambiente de usinagem é tóxica e pode causar doenças respiratórias, alergias e dermatites (KLOCKE, 2009).

Ao passo que a indústria confere elevação da qualidade e aumento da quantidade produtiva adotando processo de retificação com eficaz lubrificação, torna-se um desafio garantir a integridade salutar da mão de obra que lida com o fluido de corte. Igual dificuldade atribui-se ao fato de estabelecer uma usinagem ecologicamente correta no tocante: descarte (STANFORD; LISTER, 2002).

Características de estabilidade operacional bem como a de economia em relação a diluição e rendimento deve ser considerado, contudo, igual atenção deve ser dada a facilidade de filtragem e possibilidades de reciclagem, de inflamabilidade baixa e baixa impregnação no rebolo e peça (MARINESCU et al., 2007).

2.3.2 Fluido de corte e os problemas de sua utilização

A utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem apresenta alguns aspectos negativos como: impacto do descarte do fluido ao meio ambiente e os riscos

proporcionados à saúde dos operários submetidos ao ambiente de trabalho com tais fluidos. Logo, leis e protocolos devem ser atendidos ao utilizar e descartar esse tipo de fluido. O CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, estabelece a quantidade de diferentes tipos de óleo permitida na água. O art. 34 da resolução 357/06 permitia uma concentração de até 20 mg/L de óleo mineral e até 50 mg/L de óleos vegetais e animais em água. Porém, esse artigo foi revogado pela resolução 430/11 que estabeleceu que nenhuma quantidade de óleo poderia estar contida na água. Portanto, o enrijecimento das leis tem influenciado os usuários de óleo solúvel a escolher os produtos pela maior facilidade no tratamento e descarte após o uso (MOUSSA; GARNIER; PEERHOSSAINI, 2017)

Segundo BARTZ (2001), fluidos de corte contém substâncias tóxicas tais como: nitroaminas, formaldeídos, substâncias orgânicas contendo parafinas cloradas e bifenis poli clorados, substâncias orgânicas contendo fósforo, as quais foram caracterizadas como substâncias nocivas para a saúde e meio ambiente. Dentre elas, as nitroaminas estão entre as mais tóxicas e foram identificadas como cancerígenas (EAST; HOWES, 1991). Além disso, os fluidos de corte podem sofrer contaminação, por meio de outros corpos, fluido ou micro-organismos, degradando suas propriedades anticorrosivas e de lubrificação (SOCOVIC e MIJANOVIC, 2001).

Analisando esses aspectos, (GUSTAVO; BRASIL, 2010) relataram que muitos desses refrigerantes tornam-se propícios ao crescimento de bactérias e fungos e, portanto, tornam-se mais tóxicos ao ser humano e ao meio ambiente.

2.4 Tubo Vórtice Ranque-Hilsch

Basicamente consiste em um cilindro alimentado por ar sob pressão de modo a produzir duas correntes de ar, uma quente e outra fria e que saem por extremidades opostas. O tubo de vórtice de Ranque-Hilsch é considerado um dispositivo bastante simples onde um fluxo de ar comprimido divide-se em dois fluxos, entretanto, as temperaturas de saída são respectivamente inferiores e superiores em relação a de entrada, efeito denominado separação térmica (KLEIN; SKYE; NELLIS, 2006).

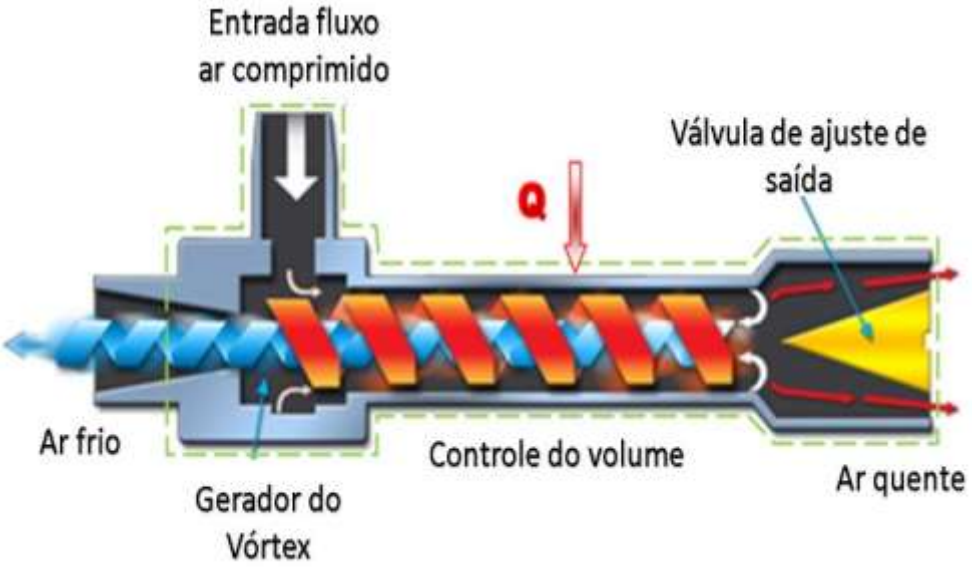
Considerado simplesmente um processo dinâmico de fluido que ocorre no interior de um dispositivo formado por vários componentes, porém sem partes móveis. O TVRH (Tubo Vórtice de Ranque-Hilsch) é concebido por um tubo cilíndrico que possui um furo, denominado orifício de entrada para que seja possível o ar comprimido

de entrada fluir tangencialmente por meio de vários canais dispostos de forma equidistante (NELLIS, 2006).

Vários e simultâneos fluxos de ar em alta pressão são afetados pela forma interna curva, o ar então faz um desenho espiralado na parede interna do tubo formando uma coroa circular quente percorrendo a parede interna do tubo (BALMER, 1988). Espiralado na direção oposta ao fluxo de ar quente, ocupando a parte central do tubo, tem-se o ar frio. Tanto o ar quente quanto o frio deixam a cavidade interna do dispositivo por saídas axiais que podem ser tanto por lados opostos quanto pelo mesmo lado.

Caso o ar quente e frio saia pelo mesmo lado trata-se do modelo: *uni-flow* de tubo vórtice, já para saída de temperaturas diferentes por lados opostos trata-se do modelo de: contra fluxo. Existem válvulas de saída que controlam a massa de ar que escapa do dispositivo por meio de um fuso em forma de cone que influi diretamente na temperatura que sai o dispositivo (KLEIN et al, 2006). **Erro! Fonte de referência n ão encontrada.** pode-se identificar o caminho percorrido pelo fluxo de ar e também algumas partes que compõe o sistema.

Figura 21 - Saída de ar quente e frio modelo: contra fluxo



Adaptado de Brener (2015)

No entanto, como o dispositivo não tem partes móveis e necessita apenas de ar pressurizado para funcionar, ele se mostra interessante para algumas aplicações

industriais, como partida rápida para geradores de eletricidade à vapor, liquefação natural de gás, separação de partículas em gases de exaustão e resfriamentos pontuais, de uma maneira geral, como no caso do resfriamento de componentes eletrônicos e de juntas soldadas.

O dispositivo se adequa bem para aplicações que necessitam uma ou ambas temperaturas uma vez que é possível controle preciso das faixas altas ou baixas. Na

Normalmente os modelos de TVRH possuem válvula posicionada na saída do ar quente que permite controle da taxa de fluxo de massa. A referida válvula regula o valor da fração fria aumentando desta forma a pressão nos limites de saída do ar quente. Importante destacar que a posição da válvula influencia a configuração do movimento dentro da câmara (AHLBORN; GORDON, 2000).

Apesar do sistema não conter partes móveis alguns componentes apresentam geometria complexa. Após compreender estudo de alguns autores no que tange o controle e a importância do controle de fluxo de ar, um dos que foi considerado bastante eficiente de acordo com (EIAMSA-ARD; PROMVONGE, 2008) é este conforme Figura 22.

Figura 22 - Regulador fluxo saída ar do Tubo Vórtice

Fonte: modelagem 3D do autor adaptado de Secchiaroli (2009)

Este componente tem geometria mais elaborada pois sua superfície cilíndrica

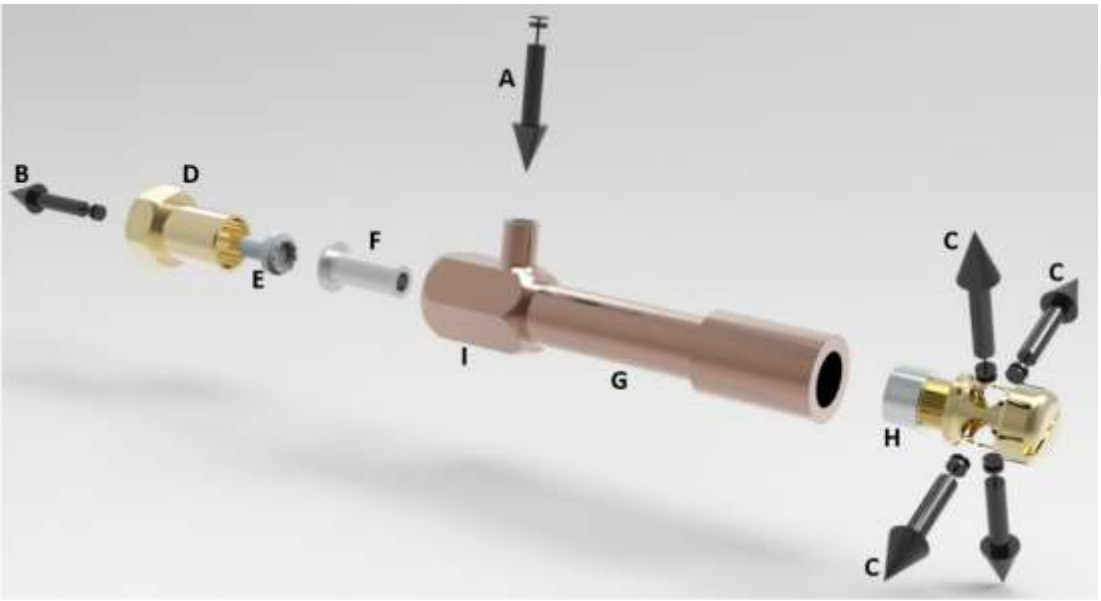
externa possui lacunas anelares para permitir saída do fluxo de ar que se desloca espiralado na parte interna do tubo principal para fora.

Há estudos conforme apontado por Secchiaroli (2009) em simulações numéricas por modelos computacionais do escoamento neste tipo de dispositivo são geralmente consideravelmente quentes, no entanto o mesmo autor cita que há poucos estudos, mesmo que por modelos matemáticos e computacionais realizados tanto quente quanto frio.

Alguns componentes de um TVRH têm destaque no contexto, como o caso dos itens (E) e (H): Gerador e Regulador do fluxo de saída apresentado na

, no caso do Gerador possui entradas radiais que permitirão transformar o movimento do ar que entra radial em tangencial na parede interna do corpo principal.

Figura 23 - A- Entrada de ar; B- Saída ar quente; C- Saída ar frio; D- Sextavado com anel roscado; E- Gerador; F- Inserto furo passante de latão; G- Corpo Principal; H- Válvula de controle; I- Câmara de Vórtex;



Fonte: modelagem 3D do autor adaptado de Montelpare (2009)

Igual importância é dado na porção (I) da mesma figura, onde ocorre a mudança de sentido do fluxo de ar. Essa seção chama-se câmara de vórtex e todos os elementos contidos nessa montagem são estáticos.

Um arquivo CAD modelado em *software mid range* de mecânica permite entender cada componente que forma o TVRH. Investigar cada parte viabiliza uma

compreensão correta dos componentes na montagem. A modelagem não seguiu pelo rigor nas medidas, entretanto, permite uma boa visão por meio da perspectiva explodida apresentada a seguir.

O TVRH é amplamente usado na indústria. Segundo (SECCHIAROLI et al., 2009) algumas das aplicações mais comuns são apresentadas no quadro 4.

Quadro 4 - Aplicações do TVRH no setor industrial

Grande área	Função
Engenharia Química	• separar misturas de gases; • purificar misturas; • liquefazer gazes;
Engenharia de alimentos	• desidratar misturas de duas fases;
Engenharia mecânica	• ferramentas de resfriamento/aquecimento em operações;
Engenharia de Petróleo e Gás	• Separar partículas em fluxo de gás
Engenharia elétrica	• resfriamento de dispositivos eletrônicos;

O dispositivo é bastante adequado para as aplicações anteriores pois, permite precisão e controle quando se trata de regular a temperatura de trabalho. O conjunto não necessita de manutenção além de ser leve.

2.4.1 Princípio físico do tubo vórtice de Ranque-Hilsch

O tubo de vórtice, também conhecido como tubo de vórtice Ranque-Hilsch, é um dispositivo mecânico que separa um gás comprimido em correntes quentes e frias. O gás emergente da extremidade "quente" pode atingir temperaturas de 200 ° C (392 ° F), e o gás emergente da "extremidade fria" pode atingir −50 ° C (−58 ° F). (WALKER, 1975). O dispositivo não tem partes móveis.

O gás pressurizado é injetado tangencialmente em uma *câmara de turbulência* e acelerado a uma alta taxa de rotação. Conforme explicado por Walker (1975) devido ao bico cônico na extremidade do tubo, apenas o invólucro externo do gás comprimido pode escapar por essa extremidade. O restante do gás é forçado a retornar em um vórtice interno de diâmetro reduzido dentro do vórtice externo.

Abordagem fundamental é baseada apenas nos primeiros princípios da física e

não se limita apenas aos tubos de vórtice, mas se aplica ao gás em movimento em geral. Mostra que a separação da temperatura em um gás em movimento é devida apenas à conservação da entalpia em um referencial móvel.

> O processo térmico no tubo de vórtice pode ser estimado da seguinte maneira: 1) A expansão adiabática do gás que entra, que resfria o gás e transforma seu conteúdo de calor em energia cinética de rotação. A entalpia total, que é a soma da entalpia e da energia cinética, é conservada. 2) O fluxo de gás rotativo periférico move-se em direção à saída quente. Aqui, o efeito de recuperação de calor ocorre entre o fluxo periférico de rotação rápida e o fluxo axial de rotação lenta oposta. Aqui, o calor é transferido do fluxo axial para o periférico. 3) A energia cinética de rotação se transforma em calor por meio da dissipação viscosa. A temperatura do gás sobe. Como a entalpia total foi aumentada durante o processo de recuperação de calor, essa temperatura é maior do que o gás que entra. 4) Parte do gás quente sai pela saída quente, levando o excesso de calor. 5) O resto do gás se dirige para a saída fria. À medida que passa para a saída de frio, sua energia térmica é transferida para o fluxo periférico. Embora a temperatura no eixo e na periferia seja quase a mesma em todos os lugares, a rotação é mais lenta no eixo, de modo que a entalpia total também é menor. 6) O gás resfriado com baixa entalpia total do fluxo axial deixa a saída fria Spakovszky (2007).

Segundo Anthony (2012), o principal fenômeno físico do tubo de vórtice é a separação da temperatura entre o núcleo do vórtice frio e a periferia do vórtice quente. O "efeito do tubo de vórtice" é totalmente explicado com a equação de trabalho de Euler, também conhecida como equação da turbina de Euler, que pode ser escrita em sua forma vetorial mais geral como conforme descreve equação 6. Polihronov; Jeliazko; Straatman (2012).

$$T = \frac{\vec{v}.\vec{w} \text{ x } \vec{r}}{C_p} = const \qquad (6)$$

Onde:

T= Temperatura total ou de estagnação na posição radial

$\vec{v}$= A velocidade angular do sistema

$\vec{r}$= velocidade absoluta do gás observada a partir do quadro de referência estacionário é denotada

C_p = É a capacidade térmica isobárica do gás

A equação acima é válida para uma passagem adiabática de turbina; isso mostra claramente que enquanto o gás se movendo em direção ao centro está ficando mais frio, o gás periférico na passagem está "ficando mais rápido". Portanto, o resfriamento do vórtice é devido à propulsão angular. Quanto mais o gás esfria ao atingir o centro, mais energia rotacional ele fornece ao vórtice e, portanto, o vórtice gira ainda mais rápido.

Esta explicação deriva diretamente da lei da conservação de energia. O gás comprimido à temperatura ambiente é expandido para ganhar velocidade através de um bico; ele então sobe a barreira centrífuga de rotação durante a qual a energia também é perdida *Xue; et al. (2010)*. A energia perdida é entregue ao vórtice, o que acelera sua rotação. Em um tubo de vórtice, a parede cilíndrica circundante confina o fluxo na periferia e, portanto, força a conversão da energia cinética em interna, que produz ar quente na saída quente.

Portanto, o tubo de vórtice é um turbo expansor sem rotor. Consiste em uma turbina de influxo radial sem rotor (extremidade fria, centro) e um compressor centrífugo sem rotor (extremidade quente, periferia). A saída de trabalho da turbina é convertida em calor pelo compressor na extremidade quente. (POLIHRONOV; JELIAZKO; STRAATMAN; ANTHONY, 2015).

2.4.1.1 Aplicativos atuais

Os tubos de vórtice comerciais são projetados para aplicações industriais para produzir uma queda de temperatura de até 71 ° C (127 ° F). Sem peças móveis, sem eletricidade e sem refrigerante (NEWMAN; *STREAMTEK* 2020).

Tubos de vórtice são usados para resfriar ferramentas de corte (tornos e fresas, tanto manuais quanto máquinas CNC) durante a usinagem. O tubo de vórtice é adequado para esta aplicação: as oficinas de máquinas geralmente já usam ar comprimido e um jato rápido de ar frio fornece tanto o resfriamento quanto a remoção dos "cavacos" produzidos pela ferramenta. Isso elimina completamente ou reduz

drasticamente a necessidade de refrigerante líquido, que é confuso, caro e prejudicial ao meio ambiente (BALMER, 1988).

2.5 Técnica de Mínima Quantidade de Lubrirrefrigeração (MQL)

A Mínima Quantidade de Lubrificante utiliza uma pequena quantidade de fluido associado ao ar comprimido e direcionados à zona de corte com o intuito de diminuir o atrito entre a ferramenta de corte e a peça (WALKER 2013). A quantidade “mínima” varia dependendo da circunstância. Segundo a norma Alemã DIN são 50 ml/hora de lubrificante e em casos excepcionais 150 ml/hora.

A aplicação do MQL na retificação emergiu como uma alternativa à redução da utilização de refrigerantes em abundância, então alcançando uma produção mais limpa (OLIVEIRA et al, 2012). Essa técnica de lubrirrefrigeração promove uma lubrificação mais eficiente, pois jatos de ar carregando gotículas de óleo penetram diretamente na zona de corte (OBIKAWA et al, 2006), diferentemente do modelo convencional, no qual procedimentos específicos devem ser tomados para que o fluido alcance esse mesmo espaço.

Segundo (OLIVEIRA et al, 2012), algumas das vantagens do MQL se dão pelo fato de que após a usinagem, o ambiente de trabalho, aparas e ferramentas estão menos impregnadas de fluido, facilitando a limpeza e, portanto, diminuindo custos. Além disso, durante a retificação, como a peça a qual está sendo trabalhada não se encontra totalmente coberta por fluido, o monitoramento visual se faz possível.

2.5.1 Sistema auxiliar de limpeza

O MQL, apesar de ser ecologicamente correto e apresentar uma viabilidade econômica maior, não apresenta o mesmo desempenho dos fluidos de corte em abundância (GUERMANDI et al., 2010). A maior preocupação em seu uso se deve à dificuldade para trocar calor no contato peça-ferramenta, assim como a menor limpeza da zona de corte propiciando condições para que se forme uma pasta composta de óleo mais cavacos, a qual contribui para que o rebolo tenha seus poros entupidos (BRINKSMEIER, 1996). Uma solução para esse problema segundo Guermandi (2010) é a utilização de um sistema de limpeza para o rebolo. Essa limpeza através da injeção de ar comprimido na zona de corte possibilita uma melhor rugosidade superficial da

peça, ainda assim evitando riscos na mesma. Isso ocorre, pois, o ar desse sistema auxiliar age diretamente na eliminação da pasta e consequentemente dos cavacos aderidos aos poros do rebolo.

2.6 Rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3)

O rebolo é uma ferramenta abrasiva cuja forma se assemelha a de um disco constituído de núcleo, ligantes e grãos abrasivos (BIANCHI, EDUARDO CARLOSOLIVEIRA et al., 2012). Esses grãos abrasivos são arestas cortantes com geometria indefinida que removem o material de maneira simultânea e uma de suas características mais importantes é que eles sejam mais duros que o material a ser retificado (MALKIN; GUO, 2007).

Pode-se destacar o rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3)uma das opções dentre os abrasivos convencionais desenvolvidos para atender às variadas exigências das operações de retificação, pois, apesar de apresentar a menor dureza dentre todos os abrasivos tem grande utilização e importância nas indústrias.

O rebolo de óxido de alumínio possui a vantagem de ser relativamente resistente ao impacto, podendo ser empregado na retificação de materiais ferrosos (HASSUI, 2002). Este material é o mais duro dos óxidos, sendo possível encontrá-lo no mercado em diversas formas e tamanhos. O primeiro óxido de alumínio sintético foi coproduzido pelo processo de eletro fusão da bauxita no ano de 1.900, por Charles Jacobs, funcionário da empresa Ampere Electro-Chemical.

Os abrasivos artificiais possuem vantagens em relação aos abrasivos naturais, pois, eliminam as impurezas e inconsistências presentes nos abrasivos naturais (KRAR, 1994).

Dentre todos os tipos de óxidos de alumínio, uma de suas características gerais é a baixa condutividade térmica, um fator limitante no processo de retificação (MARINESCU et al., 2007).

Ainda segundo o mesmo autor existem vários tipos de alumina devido à possibilidade de adicionar diferentes óxidos em sua solução sólida, isso permite controlar facilmente suas propriedades. Os tipos descritos pelo autor são: alumina marrom, alumina branca, alumina rosa, alumina rubi e alumina cerâmica.

2.6.1 Ligantes

Os ligantes promovem a fixação e manutenção dos grãos abrasivos em um rebolo. Esses ligantes devem: resistir às forças de retificação, às elevadas temperaturas, às forças centrífugas oriundas de elevados níveis de rotação da ferramenta abrasiva e aos ataques químicos provocados pelos fluidos de corte. Ainda assim, asseguram a rigidez do rebolo e a organização das partículas abrasivas (MALKIN, 1989).

Ainda segundo o mesmo autor, são utilizados, geralmente, aglomerantes resinoides, metálicos e vitrificados.

Segundo Marinescu et al. (2004), o ligante deve obedecer às seguintes funções:

- Proporcionar uma adequada retenção do grão, sem que haja uma prematura perda do abrasivo.
- Permitir uma controlada erosão do ligante para que as arestas de corte dos grãos abrasivos sejam expostas.
- Ser suficientemente forte para transferir as forças de retificação do eixo para a peça.
- Proporcionar uma adequada dispersão térmica.

Segundo Malkin e Guo (2008) a maioria dos rebolos constituídos de abrasivos convencionais são confeccionados com ligante vitrificado ou resinoide. Para a maioria dos rebolos constituídos de superabrasivos o ligante utilizado é resinoide ou metálico, também o ligante vitrificado é amplamente utilizado para rebolos de CBN. A escolha do aglomerante deve ser feita considerando-se o tipo e tamanho do rebolo, as condições de trabalho, a vida do rebolo e ainda a relação custo/benefício de produção.

As velocidades de corte em que o rebolo deve operar são determinadas de acordo com o tipo do aglomerante, dependendo da resistência mecânica do mesmo. Além disso, os grãos abrasivos e os aglomerantes devem possuir coeficientes de dilatação térmica análogos. Isso é necessário para que não ocorra a formação de tensões internas durante o trabalho a elevadas temperaturas (MALKIN, 1989).

2.7 Microscopia Óptica confocal

A técnica da microscopia óptica é de fundamental relevância para a análise da estrutura da peça, pois possibilita o estudo das superfícies, permitindo uma visão geral de danos, desgaste e falhas, bem como danos térmicos.

Os aços são retificados após o tratamento térmico. Com isso, a queima superficial pode ocasionar uma retêmpera, originando uma microestrutura frágil que prejudicará a resistência à fadiga. Entretanto, em função do aquecimento do material durante a retificação e da taxa de resfriamento proporcionada pelo refrigerante, pode ocorrer o revenimento e perda de dureza superficial (MALKIN, 2008).

A microscopia Confocal é uma ferramenta altamente eficaz na caracterização da superfície e subsuperfície de diferentes materiais (NEAUPORT *et al.*, 2009 e FINE *et al*., 2006). Ainda segundo os autores, seu funcionamento consiste em uma luz monocromática que é dirigida à superfície da peça e na qual a luz refletida é recolhida.

Apresenta um funcionamento bem próximo de um Microscópio óptico, onde uma luz é emitida por uma fonte de excitação que passa através de um orifício situado em um plano conjugado (confocal) com o ponto de estudo da amostra e com um segundo orifício posicionado em frente ao detector (BORATTO, 2014). Além disso, possui a vantagem de ser uma técnica não destrutiva de seccionamento ótico, a qual permite uma visualização em 3D da superfície do material (topologia), ou ainda, da estrutura interna de materiais semitransparentes (estudo abaixo da superfície).

A luz laser, ao realizar a varredura da superfície, fornece um mapa bidimensional da luz captada. Dessa forma, é possível obter a informação do perfil de profundidade a partir da capacidade do microscópio confocal de focar a luz incidente na superfície ou abaixo dela e apenas a luz a partir desse ponto focal é recolhida utilizando uma abertura confocal. Vale salientar que o material a ser analisado deve ser transparente à luz incidente para que possa ser completamente estudado.

2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura

A finalidade da microscopia eletrônica de varredura é obter imagens ampliadas em uma determinada superfície, permitindo assim analisar a estrutura superficial com o intuito de detectar falhas, fraturas e poros. Essa análise é realizada após a

usinagem, possibilitando o entendimento das solicitações mecânicas e térmicas durante o processo. Segundo Trino (2014), ela fornece informações morfológicas e topográficas de superfícies sólidas com maior resolução quando comparada à microscopia óptica clássica. Portanto, se apresenta como uma das técnicas mais adequadas para analisar e explicar os fenômenos que ocorrem na escala micrométrica e submicrométrica. De acordo com Marinescu *et al*. (1998) a microscopia eletrônica de varredura (MEV) é muito utilizada na caracterização de superfícies fraturadas, para investigar a estrutura superficial, detectar falhas e poros abertos. Mannheimer (2002) complementa que este equipamento tem sua maior aplicação no exame de superfícies rugosas. Ainda segundo o mesmo autor, este instrumento apresenta facilidade na visualização e interpretação de imagens.

Nessa técnica de análise é utilizado o bombardeamento de elétrons na superfície do material para se obter sua representação precisa, onde um fino feixe de elétrons (0,01µm de diâmetro) varre linearmente a superfície do material. O impacto dos elétrons primários do feixe faz com que os elétrons secundários da superfície do material sejam emitidos e captados. Assim, esses elétrons secundários formam a imagem, onde as regiões da superfície do material, que estão mais baixas, irradiam menos elétrons e as mais altas irradiam mais (SALMON, 1992).

Em sua tese Fusse (2005) afirma que este tipo de equipamento possui algumas vantagens com relação ao microscópio óptico, devido à sua alta resolução em torno de 0,003µm contra 0,1µm do microscópio óptico. Além disso, o poder de resolução do MEV resulta em ampliações da ordem de 10 a 300.000 vezes. Uma outra vantagem é a profundidade de foco, cerca de 300 vezes maior.

Ainda segundo o mesmo autor, o MEV é um equipamento de grande potencial, podendo realizar diferentes análises. Um exemplo disso seria na área de materiais, onde o MEV é utilizado principalmente na análise microestrutural, como precipitados, fases, análise de superfícies fraturadas (análise de falhas), micro-análise qualitativa e quantitativa (com o auxílio de acessórios), determinação do tamanho de grão e porcentagem de fase em microestruturas de materiais.

Deve-se citar que a preparação da superfície a ser analisada é de extrema importância, e esta deve estar polida e isenta de qualquer contaminação. Isso porque o excesso de rugosidade compromete a resolução da imagem e a presença de partículas estranhas à peça pode colaborar para conclusões indevidas.

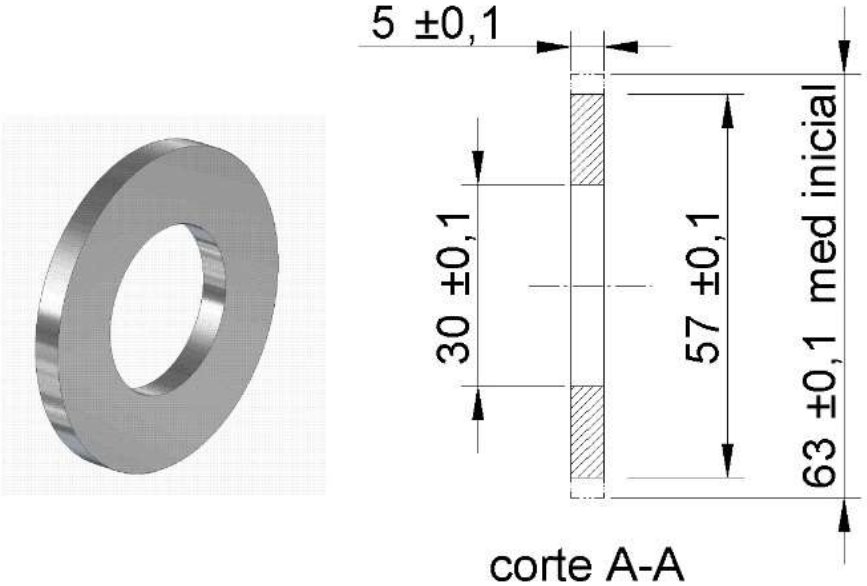
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção tem por objetivo comparar as variações do processo de retificação que cada técnica de lubri-refrigerante pode causar. Todos os testes foram aplicados ao externo retificação cilíndrica usando material de aço AISI 4340 temperado e revenido, no qual uma média dureza de 55 ± 2 HRC foi alcançada.

3.1 Características do corpo de prova e máquina retificadora

A peça tem uma forma de anel, com um diâmetro externo de 62 ± 0,1 mm, um diâmetro interno de 30 ± 0,1 mm e 5 ± 0,1 mm de espessura, como mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Dimensões da peça de trabalho usada no processo de retificação antes e depois dos testes.



Fonte: O autor

O aço AISI 4340 é um aço de alta resistência mecânica. É uma importante característica para aços estruturais. Possui ainda alta resistência a fadiga ou ainda, a capacidade de um material suportar carregamentos repetitivos/cíclicos com um mínimo de redução na resistência nominal por um maior número de ciclos. Possui também alta tenacidade que é a capacidade de suportar impactos e não se romper, é a energia que o material pode absorver antes de ocorrer a ruptura. Este aço possui

ainda uma alta temperabilidade. É utilizado na confecção de dispositivos e peças sujeitas a cargas elevadas e periódicas, virabrequins de avião, tratores, caminhões e automóveis, bielas, engrenagens, eixos sujeitos a grandes esforços e peças que demandam, para longas seções, boas características mecânicas (CAMARGO et al., 2009).

A máquina retificadora cilíndrica externa CNC utilizada foi a RUAP515H da marca Sulmecânica para realizar os testes. Um rebolo de óxido de alumínio branco (Al2O3) com aglutinante vitrificado foi utilizado, produzido pela Norton Abrasives - Grupo Saint Gobain, modelo 38A 150 L 6 V, com dimensões de 355 mm (diâmetro externo) x 127 mm (orifício diâmetro) x 25,4 mm (espessura).

Foi usado um dressador aglomerado multigranular de diamante, 15 mm de comprimento por 8 mm de espessura, da Master Diamond, era usado para operações de dressagem.

Para cada operação, aproximadamente 200 µm de camada foi removida através de 50 passagens de 4 µm cada na superfície de corte do rebolo, com um avanço de 500 mm/s do dressador, enquanto a velocidade do rebolo era de 32 m/s. O primeiro sistema foi o método de inundação, no qual foi equipado com uma bomba centrífuga, reservatório de fluido, válvulas esfera, medidor de fluxo, mangueiras e bico de aplicação.

3.2 Fluidos de corte utilizados

O fluido de corte usado neste sistema foi um óleo semi-sintético produzido pela ITW Chemical Products, modelo Rocol Ultracut 370, diluído em água até uma concentração de 1:32. ou seja, uma parte de óleo para 32 partes de água (3% óleo). O fluido de corte foi aplicado sob baixa pressão (0,1 MPa) e em abundância, com vazão de 17 l/min.

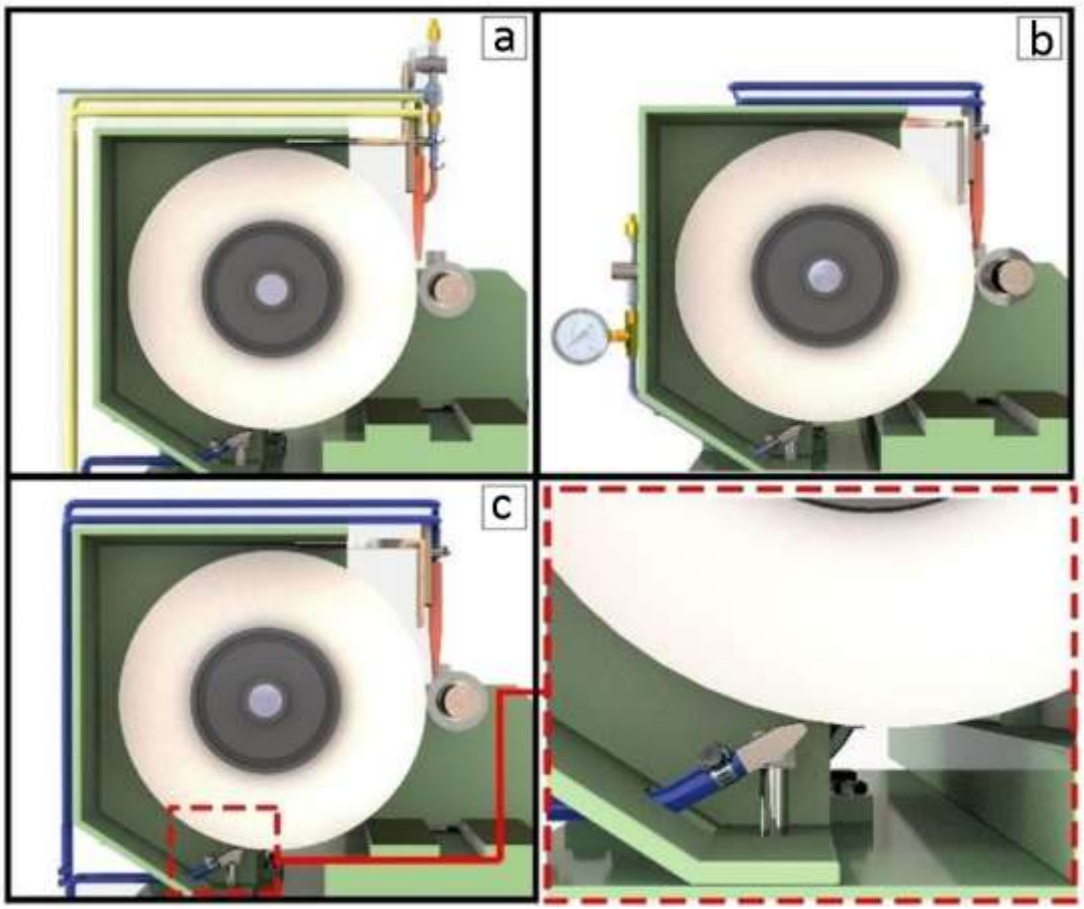
O sistema MQL apresenta um regulador de pressão, um compressor de ar e um bico de aplicação com um sistema de mistura produzido por ITW Chemical Products Ltda, modelo ITW Accu-Lube 79053D. Seguindo a configuração proposta por (TAWAKOLI et al., 2007), o bico foi posicionado em 25 mm da superfície de corte e inclinado 10° sobre a interface de corte. Para a aplicação, um óleo vegetal produzido pela ITW Chemical Products, modelo Rocol Biocut 9000, com aditivos antioxidantes.

Para o tubo vórtice de resfriamento e limpeza do rebolo (CWCJ) foi usado,

produzido por Emuge-Franken.

A partir desses equipamentos, a temperatura do ar comprimido injetado na superfície de corte do rebolo pode ser controlada. Uma representação esquemática dos sistemas MQL + CA, MQL + CWCJ e MQL + JALR estão apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Configuração experimental para diferentes condições de lubrirrefrigeração, sendo: (a) MQL + CA, (b) MQL + CWCJ e (c) MQL + WCJ



Fonte: autor (2021)

De acordo com (WANG et al., 2016), os óleos vegetais podem sofrer oxidação prematura que eventualmente o degrada, e o aditivo impede que isso ocorra. A mistura de Ar-Óleo foi aplicada a uma pressão de 0,8 MPa com vazão de 150 ml/h.

O sistema de resfriamento do método MQL com ar resfriado foi posicionado próximo ao bocal de aplicação MQL. O tubo de vórtice, que constitui o sistema. Ele inseriu ar comprimido a uma pressão de 0,4 MPa e 0 °C na interface de corte.

Outro sistema foi o jato de ar para limpeza do rebolo (WCJ), consiste em mangueiras, um compressor de ar, controle de pressão válvulas e no bico de aplicação. Este sistema foi posicionado a 1 mm da superfície do rebolo, com uma incidência no ângulo de 30° no eixo do rebolo. O jato de ar foi lançado contra a ferramenta a uma pressão de 0,2 MPa e a temperatura da sala (25° C).

Para cada uma das cinco diferentes técnicas lubrificantes (inundação, MQL, MQL + CA, MQL + WCJ e MQL + CWCJ), cinco peças foram usinadas para obter melhor confiabilidade dos resultados. Em todos os testes, uma velocidade de mergulho de 0,50 mm/min e uma taxa de remoção específica de 1,62 mm^3/s foram usadas.

3.3 Condições de usinagem

A remoção do material ocorreu ao longo de 50 ciclos de 0,1 mm/ciclo. Ao final, 2102,9 mm^3 do material foram removidos da peça, deixando-o com um externo diâmetro de 57 mm. A rotação do rebolo foi fixada em 1792 rpm, enquanto a rotação da peça foi de 163 rpm. Assim, a razão β do processo foi 11: 1, ou seja, em que do rebolo executou onze voltas, enquanto a peça de trabalho apenas uma.

De acordo com (SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012b) esta razão β minimiza os efeitos batimento radial, o que reduz a variação da rugosidade. Uma centelha com duração de 5 segundos, após cada ciclo de retificação, também foi definida para minimizar erros de formulário. O Quadro 5 resume os parâmetros adotados durante a usinagem.

Quadro 5 - Parâmetros de usinagem

Condições do Experimento	Valores
Processo de retificação	Retificação cilíndrica externa de mergulho
Rebolo	Óxido de alumínio branco, 38 A 150 L 6 V
Peça de trabalho	Aço AISI 4340 temperado e revenido
Velocidade de avanço (*vf)*	0,50 mm/min
Velocidade de corte (*Vs)*	32 m/s
Rotação da peça de trabalho	163 rpm
Tempo de centelhamento	5 s
Largura de retificação	5 mm

Técnica de Lubrirrefrigeração	Inundação e MQL
Vazão do fluido de corte	17 l/min (Flood) 150 ml/h (MQL)
Pressão do fluido de corte	0.1 MPa (Flood) 0.8 MPa (MQL)
Temperatura	imersão, MQL and MQL + WCJ / 25 °C MQL + CWCJ and MQL + CA / 0 °C
Pressão de ar do sistema de limpeza / Ângulo de incidência	0.2 MPa / 30°
Pressão do vórtex	0.4 MPa
Dressador	Diamante multigranular (15 mm x 8 mm x 10 mm)
Profundidade e velocidade de dressagem	50 cycles of 4 µm (200 µm) / 500 mm/min

3.4 Medição de rugosidade

Medidas de rugosidade superficial (Ra e Rz) foram realizadas em cada componente após o final de cada teste. Dez medições foram feitas em cada peça para ambas as medições, 36° de distância uma da outra, e dos valores foram calculadas as médias. Para isso, um instrumento produzido por Taylor Hobson, modelo Surtronic3+.

Para o cálculo do desvio de circularidade o mesmo princípio foi usado, três medições em diferentes posições foram feitas para cada peça de trabalho e, em seguida, a média foi calculada para determinar o desvio.

A medição foi feita por um circularímetro de Talyrond 31C, produzido pela empresa Taylor Hobson, usado com o filtro Least Square Circle (LSCI), com 0,02 µm de precisão.

O desgaste diametral do rebolo foi determinado usando o método indireto, conforme proposto por (MALKIN; KOHLI; GUO, 1995). Para este parâmetro, um cilindro de aço AISI 1020 (90 HRB) com Ø 35 mm x 120 mm, foi usinado pelo rebolo antes de dressar, fazendo seu perfil marcado no cilindro.

A partir disso, a superfície usinada do cilindro foi medida usando o Instrumento

Surtronic 3+ e o software TalyMap, ambos por Taylor Hobson. Além dessa variável de saída, a medição de desgaste do rebolo também foi usada na relação G, em que uma relação é alcançada entre o volume do material (já conhecido) e o volume do rebolo consumido.

Essa relação é obtida por meio da equação 7:

$$G = \frac{Vw}{Vs} = \frac{\frac{(\pi Dw^2 - (\pi dw^2)}{4}.t}{2\frac{(\pi Dr^2 - (\pi dr^2)}{4}.t} \qquad (7)$$

Onde:

VW é o volume de material removido;

Vs o volume de desgaste do rebolo;

Dw o diâmetro inicial da peça de trabalho;

dw o diâmetro final da peça de trabalho;

Dr o diâmetro inicial do rebolo;

dr o diâmetro final do rebolo e

t refere-se à espessura da peça de trabalho.

Os dados de corrente (A) e tensão (V) da retificadora foram usados para determinar a potência de retificação e a força de corte tangencial. Os dados foram obtidos através de dois sensores de efeito Hall, com uma taxa de atualização de 2kS/s, e por um codificador para monitorar a rotação do rebolo.

Os sinais foram tratados por um circuito eletrônico Curvopower 3 e transmitido para uma placa de aquisição de dados A / D, PCI- Modelo 6035EDAQ, produzido pela Empresa National Instruments, que foi instalado em um computador.

Então, O software LabView 7.1, da National Instruments, foi usado para analisar os dados obtidos e determinar a potência consumida e a força de corte tangencial, esta última também precisava de um módulo eletrônico para converter a corrente do motor e valores de tensão em sinais de tensão.

Um teste de microdureza Vickers foi realizado para cada corpo de prova. Para isso, três medições de dureza foram feitas para cada uma das cinco profundidades diferentes (60, 120, 180, 240 e 300 μm), e a média dos resultados de cada profundidade foi calculada. O teste foi realizado por um Mitutoyo Testador de

microdureza HM-211, com carga de 300 gramas, seguindo as recomendações da ASTM E140, que é uma tabela de equivalência de dureza e de acesso público.

As superfícies das peças de trabalho e do rebolo após a retificação também foram analisadas. Nas peças de trabalho, um microscópio eletrônico de varredura (MEV) produzido pela Empresa Carl Zeiss, modelo EVO LS15, com uma ampliação de 1000x. Bem como o Olympus Confocal microscópio, modelo LEXT OLS4100 foi usado para verificar possíveis irregularidades da superfície.

Para o rebolo, um microscópio óptico, da Dnt, modelo Digimicro Scale, foi utilizado com uma ampliação de 220x.

3.4.1 Aço AISI 4340 Temperado Revenido

Como visto em tópico anterior o aço AISI 4340 é um aço de alta resistência mecânica e fadiga, alta tenacidade, além de uma alta temperabilidade. É utilizado na confecção de dispositivos e peças sujeitas a cargas elevadas e periódicas. Em relação à sua composição química, segundo (BIDA et al., 2000), o aço AISI 4340 é composto de aproximadamente 0,38% de C (carbono), 96% Fe (ferro), 0,2% Si (silício), 1,3% Ni (níquel), 0,8% Cr (cromo), 0,04% S (enxofre), 0,7% Mn (manganês), 0,25% Mo (molibdênio) e 0,035% P (fósforo).

Assim como informa a empresa Schmolz Bickenbach, o tratamento térmico deste aço é feito normalmente entre 830 - 850 °C, seguido por um resfriamento em óleo. Um revenimento completo pode ser feito à 840 °C seguido por um resfriamento controlado. Dessa forma, a dureza do material alcança entre 52-56 HRc.

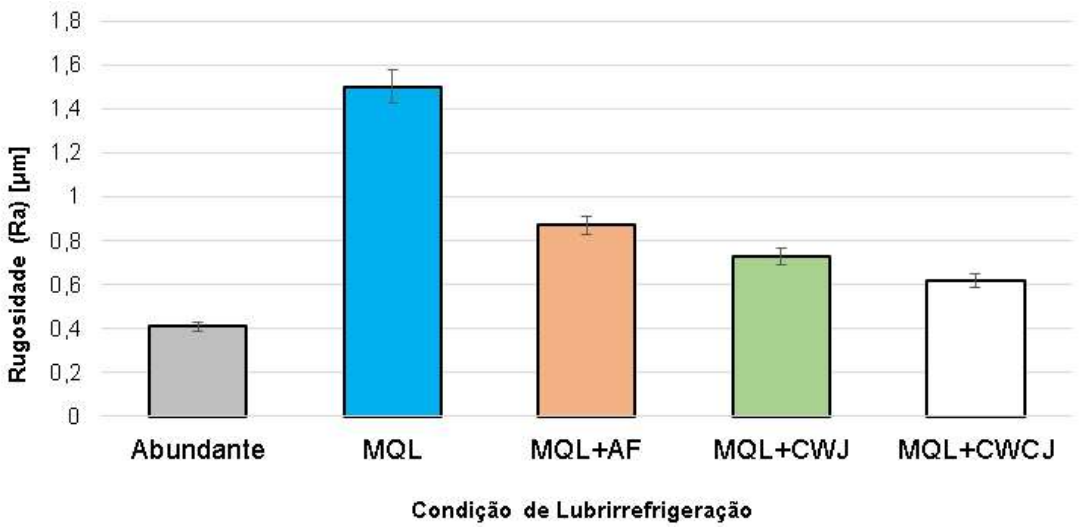
4 RESULTADO E DISCUSSÕES

Os referidos testes, serão observados e analisados nesta etapa por meio de gráficos e imagens obtidas por todos os equipamentos usados.

4.1 Rugosidade (Ra e Rz)

Os resultados da rugosidade (Ra) obtidos sob os diferentes sistemas de lubrirrefrigeração estão apresentados a seguir. O método de inundação foi o que apresentou o melhor resultado neste quesito, sendo 0,41µm, como pode ser visto na Figura 26. Como vazão de fluido usado por este método é muito grande em relação ao MQL, atua mais intensamente na zona de corte, proporcionando bom resfriamento e lubrificação. Essa abundância de fluido impede o acúmulo de cavacos e grãos abrasivos soltos na interface de contato, e com isso o rebolo permanece afiado por mais tempo. Além disso, o método de inundação, conforme Figura 26 reduz as deformações elásticas e plásticas do material causadas por altas temperaturas, que afetam negativamente a superfície usinada.

Figura 26 - Rugosidade (Ra) para diferentes condições de lubrificação.



Fonte: O autor (2021)

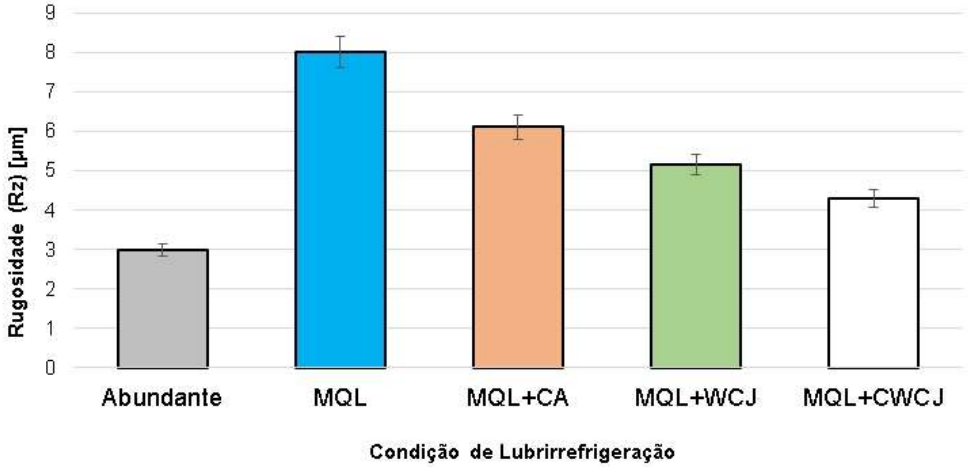
Entre todos os sistemas em que o MQL foi aplicado, o tubo vórtice de resfriamento e limpeza do rebolo (CWCJ), apresentou os resultados mais próximos dentre os obtidos pelo método abundante ou inundação, com diferença de 0,2 µm na

rugosidade Ra. Isso ocorre porque ao combinar ar frio (CA) com o sistema tubo vórtice de resfriamento, o efeito entupimento é reduzido ainda mais, pois o ar frio facilita a retirada de cavacos, assim, perdem sua maior capacidade de aderência em altas temperaturas. Este fenômeno ocorre, por causa das altas tensões mecânicas que rebolo exerce sobre a peça, que acaba moldando os cavacos nos poros do rebolo, o que torna difícil sua remoção. Como consequência, os cavacos começam a cobrir as arestas de corte e formam uma pasta quando se unem ao fluido de corte. Desta forma, ao resfriar o rebolo sem uso de fluido, os cavacos ficam mais secos (evitando a formação desta pasta) e quebradiços, reduzindo as deformações necessárias para alojar-se no rebolo.

Os dois outros sistemas auxiliares testados, ar frio e jato de ar comprimido limpeza do rebolo, apresentou maior rugosidade superficial (Ra) valores, 0,87 µm para MQL + CA e 0,73 µm para MQL + WCJ. Finalmente, o MQL sem qualquer sistema auxiliar apresentou os piores resultados para o acamamento superficial, obtendo um valor de 1,15 µm. Este alto valor está associado à sua baixa capacidade de reduzir a temperatura e remover os cavacos da zona de corte.

Esta combinação de efeitos fornece um cenário perfeito para a alocação de cavaco para os poros do rebolo aumentando o entupimento. Consequentemente, aumenta os esforços usados durante a usinagem, bem como o calor gerado pelo atrito entre o cavaco alojado no rebolo e a peça de trabalho. A Figura 27 apresenta gráfico com novo método de medição, e nota-se os resultados deste parâmetro a mesma tendência da superfície para rugosidade Rz para todos os métodos, mostrando ainda mais, uma aproximação do método de inundação com o MQL + CWCJ.

Figura 27 - Valores experimentais de superfície rugosidade Rz



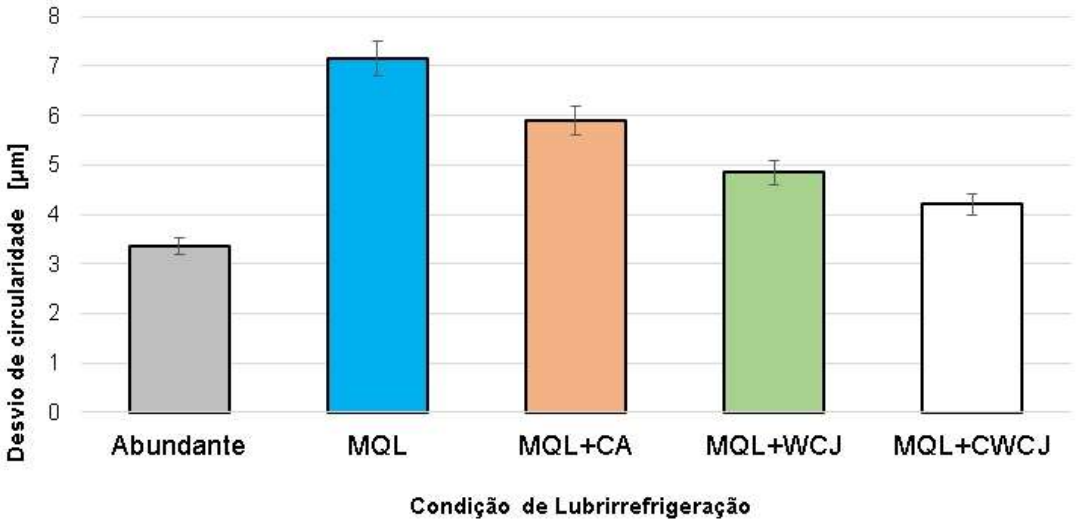
Fonte: O autor (2021)

Porém, é fundamental observar que todos os resultados encontrados são inferiores a 1,6 µm, que é o limite de rejeição estipulado para o processo de retificação na literatura (MALKIN, 2007). Melhorar a confiabilidade do parâmetro analisado, além da rugosidade superficial média (Ra), foi utilizada a superfície rugosidade Rz. Nele, a superfície é dividida em cinco partes, da qual a rugosidade média é obtida. Desta forma, obtêm-se uma medição mais precisa, uma vez que algumas variações entre vales e picos podem acabar não sendo detectada pela rugosidade superficial Ra, sendo visível por Rz.

4.1 Desvio de circularidade

O desvio de circularidade é uma variável fundamental no tema da análise do acabamento da peça. Esta variável pode mostrar excessivo estresse no processo e variações térmicas significativas, considerando que esses dois requisitos tendem a deformar o peça de trabalho radialmente (BIANCHI et al., 2018a). Assim, entre os diferentes métodos testado, o MQL sem sistema auxiliar foi aquele que apresentou os maiores resultados no desvio de circularidade, 7,15 µm, pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 - Desvio de circularidade



Fonte: O autor (2021)

Conforme apresentado na Figura 28, o motivo foi sua baixa capacidade de remover o calor da interface de corte, causando uma expansão térmica indesejada da ferramenta e peça de trabalho, tendo a extrema precisão do processo e levando a erro de circularidade.

Assim como a rugosidade, o sistema MQL + CWCJ obteve excelentes resultados no desvio de circularidade, destacando-se de MQL + CA e MQL + WCJ.

Enquanto o método de inundação obteve um desvio de 3,35 µm, o tubo vórtice de resfriamento e limpeza do rebolo (CWCJ) atingiu 4,20 µm. Esta pequena diferença no desvio de circularidade é causada por uma redução no entupimento dos poros do rebolo, devido à excelente limpeza proporcionada pela ação do ar frio do tubo vórtice.

Além disso, o ar frio proveniente do tubo vórtice promove menor expansão térmica da ferramenta, reduzindo a imprecisão.

Além disso, MQL desempenha um papel essencial na lubrificação das arestas de corte, dada sua excelente capacidade de atingir a zona de corte. Desta forma, o atrito entre a peça de trabalho e a ferramenta diminui, facilitando a usinagem e minimizando atuação de tensões de compressão.

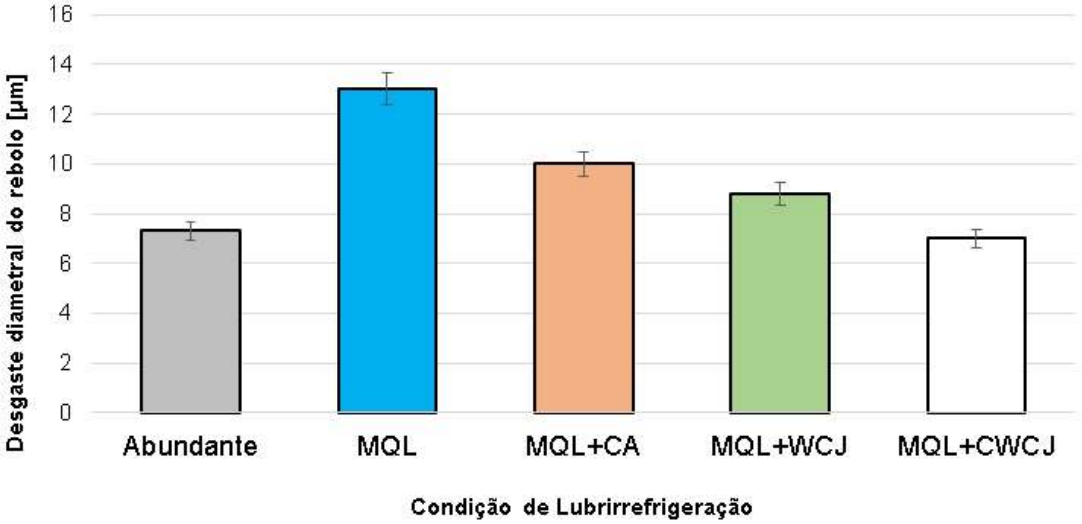
Entre os outros métodos, MQL + WCJ apresentou resultados próximos a MQL + CWCJ, com 13,3% maior no desvio de circularidade, confirmando a eficiência de limpeza auxiliar. Isso porque com a limpeza do rebolo, há uma menor quantidade de material impregnado no mesmo, o que consequentemente ajuda a manter muito mais arestas de corte ativas, fazendo com que o rebolo atue com mais eficiência.

Desta forma, as forças de corte são melhor distribuídas entre os grãos abrasivos ativos e, uma vez que o estresse de atuação é uma das principais causas das deformações radiais, os resultados do erro de circularidade tendem a melhorar significativamente.

4.2 Desgaste diametral do rebolo

O sistema que obteve o menor desgaste diametral do rebolo entre as técnicas MQL foi o MQL + CWCJ, com um valor de 6,93 µm, conforme mostrado na Figura 29 onde o desgaste foi 4,3% menor em relação ao método de inundação, que obteve desgaste de 7,24 µm.

Figura 29 - Desgaste diametral do rebolo

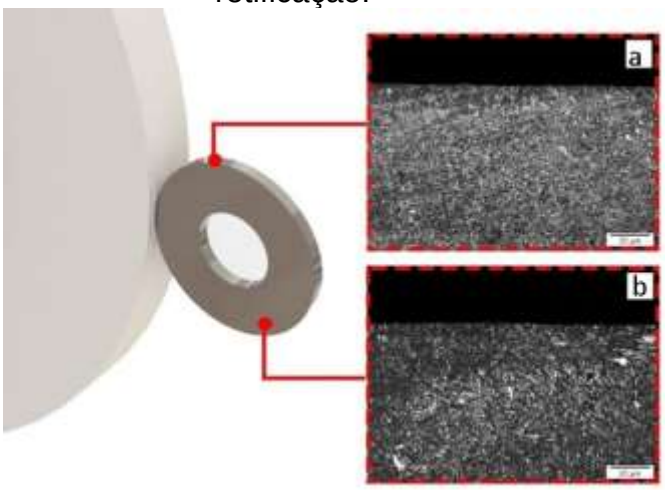


Fonte: O autor (2021)

Este baixo desgaste do rebolo fornecido por MQL + CWCJ, é devido à excelente lubrificação fornecida por MQL, que reduz as forças de corte fazendo com que os grãos fraturam com menos frequência, o que reduz o desgaste. Além disso, a limpeza associada ao resfriamento fornecido pelo sistema auxiliar WCJ, reduz o efeito de entupimento, o que reduz a transferência de energia por fricção na zona de corte na forma de calor, e junto com a eficiência no resfriamento, mantém a capacidade de fixação da pasta o grão abrasivo do rebolo.

Figura 30 apresenta imagem da superfície retificada. O rebolo usado neste ensaio foi o CBN. O ensaio se deu usando o sistema MQL+CWCJ na retificação do aço AISI 4340.

Figura 30 - Microscopia óptica da peça para (a) a superfície da peça após a retificação.



Fonte: O autor (2021)

O sistema MQL+CWCJ foi escolhido porque foi o que apresentou o melhor resultado no desgaste diametral do rebolo, que pode ser garantido com as imagens do microscópio óptico. Nesse sentido percebe-se que a superfície usada no processo não apresenta trincas perceptíveis, entupimento excessivo e quebra de grãos em blocos, que seriam identificados por arranhões ou manchas grandes nessa superfície. Assim, quando comparada a uma região não retificada (b) com a superfície efetiva (a), foi possível observar apenas regiões ligeiramente mais claras na superfície, caracterizadas por um baixo entupimento e desgaste constante dos grãos abrasivos ao longo da extensão da superfície retificada.

Por outro lado, ao contrário do método MQL + WCJ, há MQL sem qualquer sistema auxiliar, onde o desgaste mais significativo do rebolo foi na ordem de 12,96µm. Isso aconteceu porque o resfriamento deste método é mais precário, o que provoca alta temperatura na região de corte, e assim o ligante perde sua capacidade de segurar o grão abrasivo, fazendo com que se soltem mais facilmente, contribuindo para um desgaste precoce.

O uso de ar frio para MQL (MQL+CA) resultou em 21,8% de redução no desgaste do rebolo em comparação com o MQL tradicional. Esta redução é causada devido ao ar resfriado proporcionando uma melhor troca térmica, que mantém os grãos afiados por mais tempo, bem como manter as propriedades do aglutinante, evitando que os grãos se desprendam da ferramenta facilmente, como ocorre no MQL tradicional.

Para o MQL + WCJ, os resultados para desgaste diametral do rebolo foi de 8,64 µm, não estavam longe daqueles encontrados na fonte técnica como os manuais por exemplo. Como o efeito de entupimento é reduzido devido ao jato de ar que expulsa os cavacos presos do rebolo, o fluido de corte penetra na zona de corte com mais facilidade, porque o os poros são mais limpos.

Como resultado, as forças, durante a usinagem se reduz, fazendo com que os grãos se desgastem com menos frequência. Assim, reduzindo a temperatura devido ao menor atrito, o material mantém sua rigidez com mais intensidade, fazendo com que os grãos cisalhem mais facilmente o material em vez de deformá-los plasticamente (LOPES et al., 2018).

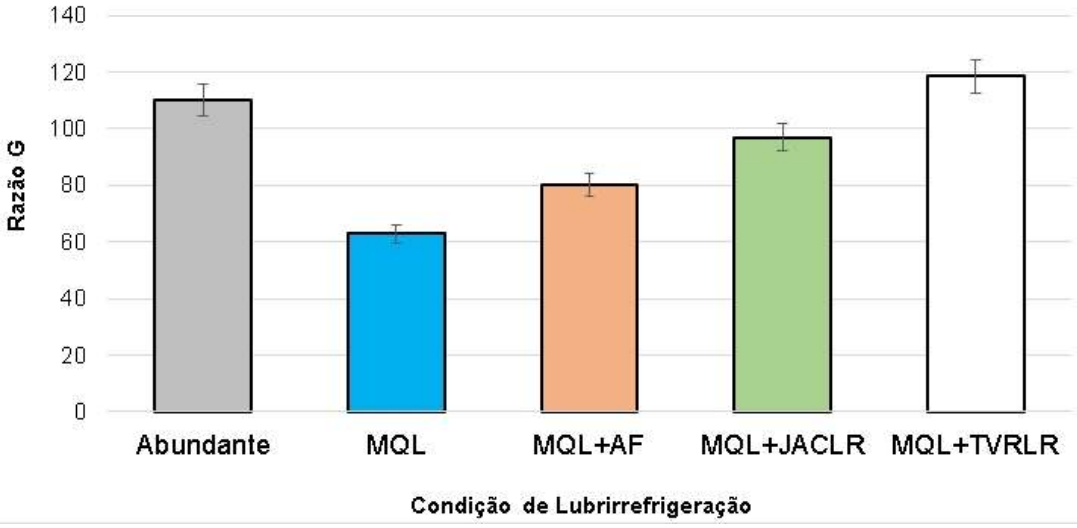
A deformação plástica é necessária pois sem esse fenômeno não haveria remoção de material, entretanto, retirar material da superfície da peça deixando marcas como sulcos e ou protuberâncias é um indício de que a retificação não está

sendo eficiente. Garantindo uma retirada uniforme de material garante-se também uma superfície isenta de rebarbas.

4.3 Razão G

O resultado para Relação G pode ser observado na Figura 31 onde a melhor relação foi obtida foi pelo MQL + Sistema CWCJ com valor de 118,53, enquanto a inundação sistema obteve o segundo melhor resultado com 7,20% menor atuação.

Figura 31 - Razão G para diferentes condições de lubrificação



Fonte: O autor (2021)

O melhor resultado no método MQL+CWCJ é causado pela excelente lubrificação do sistema MQL, como penetra mais facilmente na região de corte por causa da alta pressão aplicada, fazendo com que as forças de usinagem sejam reduzidas.

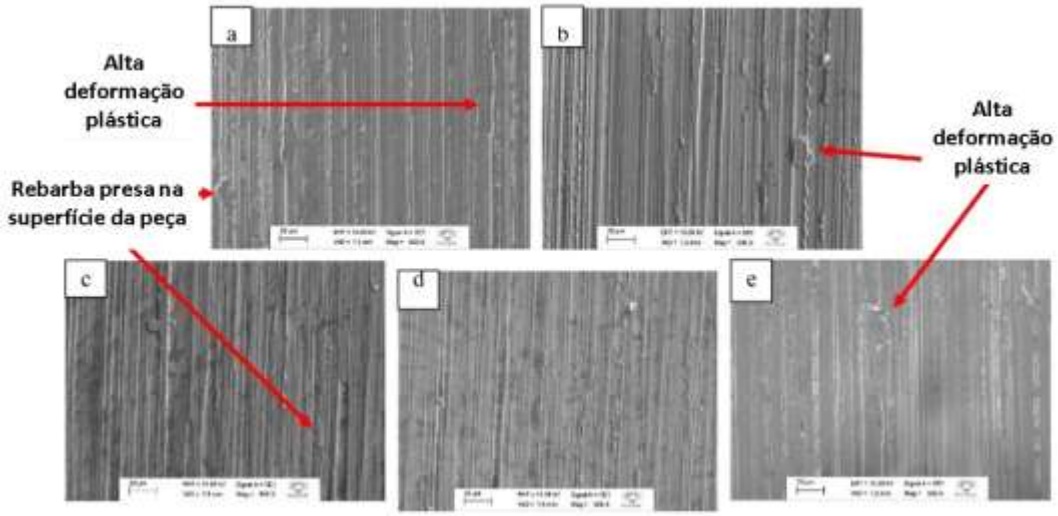
Outro fator de destaque está na aliança com limpeza e troca térmica fornecida pelo sistema tubo vórtice para resfriamento e limpeza do rebolo, reduz os impasses do alto calor gerado no rebolo, mantendo as propriedades mecânicas do aglutinante, além de limpar os poros, o que reduz o entupimento.

Todas essas melhorias são refletidas na superfície da peça usinada, deixando com menos irregularidades em relação aos outros métodos, pois visto na aplicação do microscópio eletrônico de varredura (SEM) na Figura 32.

Seguindo os resultados do desgaste do rebolo, o pior método era MQL sem qualquer sistema auxiliar, com uma proporção de 63,38. Este fenômeno é causado devido à baixa capacidade para dissipar o calor que este método tem em comparação

com os outros, fazendo com que o ligante perca força, o que acaba facilitando o desprendimento do grão, aumentando o desgaste.

Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície da peça para (a) método de inundação, (b) MQL, (c) MQL + CA, (d) MQL + WCJ e (e) MQL + CWCJ



Fonte: o autor (2021)

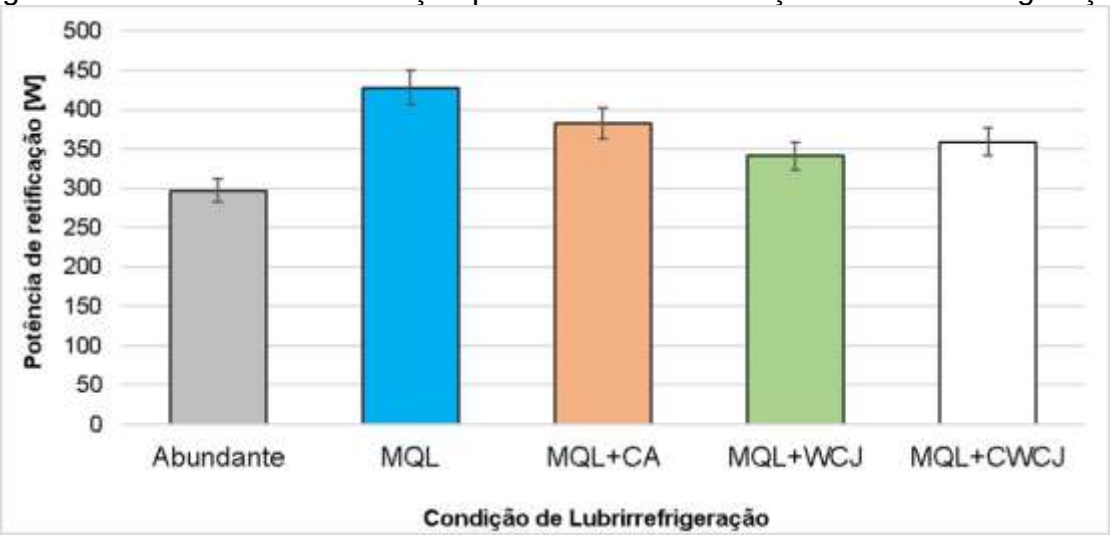
A baixa capacidade de limpeza da zona de corte também influencia a taxa de retificação, pois aumenta o efeito de entupimento, levando a uma perda da capacidade de corte do rebolo, já que os cavacos acabam cobrindo os grãos abrasivos. Dessa forma, muitos grãos começam a agir sem arestas de corte afiadas, causando várias deformações e irregularidades na peça de trabalho, como pode ser observado na Figura 32b.

Além do sistema MQL + CWCJ, o sistema de jato de ar comprimido de limpeza do rebolo (WCJ) foi o que obteve resultado mais próximo do método de inundação, obtendo uma razão de 95,07, que foi 16,21% menor do que método abundante. Como este sistema promove a limpeza do rebolo, o efeito do entupimento refletido em a peça é bastante reduzido o que leva a um melhor uso do rebolo, por isso é possível perceber a redução desses efeitos na Figura 32d. MQL + CA, por outro lado, obtido uma proporção menor do que MQL+WCJ. No entanto, 27,9% acima MQL sem sistema auxiliar, pois, promovendo uma melhor troca térmica com a aplicação de ar frio, promove uma melhoria na capacidade de resfriamento da zona de corte, apenas onde o MQL executa mal.

4.4 Potência de retificação

Tal como acontece com as demais variáveis analisadas, na retificação alimentada por MQL sem sistema auxiliar gera aquele com os maiores valores conforme Figura 33, atingindo o valor de 428,0 W. Embora seu baixo poder de resfriamento reduza a rigidez do material enquanto está sendo usinado e, consequentemente reduziu o poder de remoção, o alto entupimento gerado por este método foi muito mais impactante, fazendo com que o aumentasse a potência de retificação.

Figura 33 - Potência de retificação para diferentes condições de lubrirrefrigeração



Fonte: O autor (2021)

Alternativamente, a aplicação conjunta do sistema de ar frio com o MQL, fez a potência ter queda de 10,5% sobre o MQL sem algum auxílio. Isso ocorre porque a melhor capacidade de remover o calor fornecido pelo ar resfriado mantém o corte arestas afiadas, facilitando a retirada de material, que consequentemente, reduz a potência.

Com o uso do sistema de limpeza do rebolo com ar comprimido WCJ, a melhoria foi mais significativa, com uma queda na potência de 11,0% em relação ao sistema CA. Esta diminuição na potência foi o suficiente para superar até mesmo o sistema CWCJ.

Enquanto WCJ apresentou um valor de 341,0 W de potência consumida, CWCJ obteve potência de 359,0 W. Estes valores baixos são devido à limpeza do rebolo

fornecida pelo jato de ar comprimido, que remove os cavacos alojados no intersticiais da ferramenta, reduzindo o entupimento e mantendo a capacidade de corte da ferramenta. Assim, foi reafirmado que o entupimento teve um impacto mais significativo na potênica de retificação do que o resfriamento, pois a capacidade de resfriamento do sistema CWCJ tornou do rebolo mais rígida, o que afetou diretamente o aumento do poder de corte.

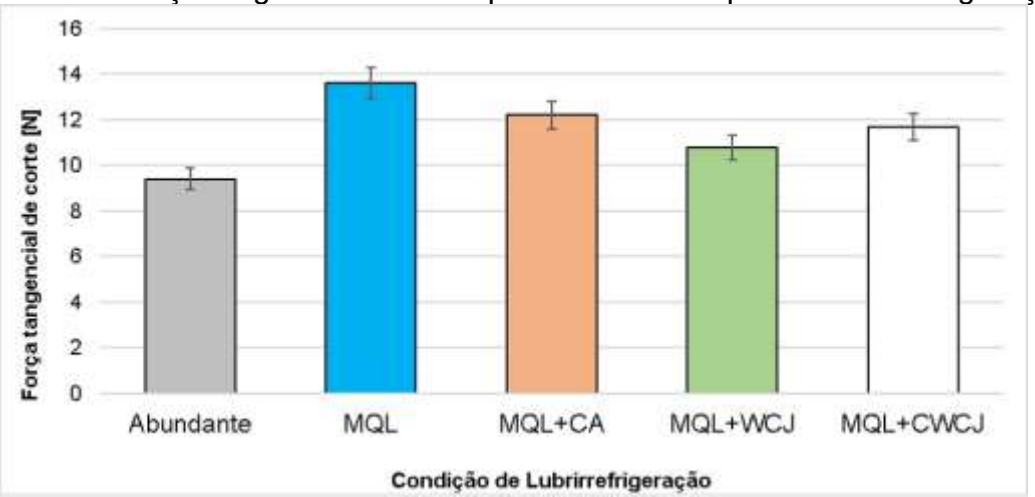
Finalmente, o método por inundação foi o que apresentou o menor valor de potência de corte, com um resultado de 297,0 W. A boa capacidade de lubrificação da ferramenta, combinada com o resfriamento fornecido por este sistema, explica os resultados de baixa potência, porque, com bastante fluido, pouco material fica alojado nas porosidades do rebolo, enquanto a lubrificação mantém os grãos afiados.

4.5 Força tangencial de corte

A Figura 34 apresenta os dados obtidos no estudo da força de corte tangencial realizada para os diferentes métodos analisados no decorrer desta pesquisa. A aplicação de MQL + WCJ mostrou os melhores resultados entre sistemas usando MQL, exercendo uma força tangencial de 10,8 Newtons.

A condição de lubrirrefrigeração com MQL+WCJ foi a que mais se aproximou do método abundante. Já os métodos com MQL+CA e MQL+CWCJ permaneceram com resultados próximos e ambos valores para força tangencial de corte acima em relação ao WCJ.

Figura 34 - Força tangencial de corte para diferentes tipos de lubrirrefrigeração



Fonte: O autor (2021)

O MQL tradicional, por outro lado, apresentou os maiores valores, atingindo 13,6 Newtons. Por isso, ao comparar esses dois resultados, é possível perceber uma redução de 20,4% proporcionada pela adição de limpeza ao o sistema MQL. O uso do método de inundação, amplamente aplicado na indústria, resultando em 9,4 N, indicando uma redução de 30,9% em comparação com o MQL tradicional. A adição de CA, ar frio, à técnica MQL mostrou melhorias, obtendo uma força de corte tangencial de 12,2 Newtons, 10,3% menos que o valor alcançado pelo tradicional MQL. No entanto, este valor de força é ainda maior quando em comparação com os outros sistemas presentes neste estudo.

Nesse sentido, a força tangencial está associada a remoção de material da peça de trabalho. É diretamente afetada pela qualidade das arestas de corte do abrasivo grãos e também pela ocorrência de entupimento dos poros do rebolo (SATO et al., 2019). Além disso, a ocorrência mais significativa de casos de obstrução a um aumento nos fenômenos de esfregar e arar (criando sulcos) a superfície do material, aumentando a força tangencial durante a operação.

Pode-se perceber ainda que o uso de WCJ causa um grande impacto tendo em vista os menores valores de força tangencial de corte, considerando que, entre as quatro alternativas métodos para o método de inundação, os dois melhores envolvem o uso da WCJ para promover a limpeza da ferramenta. Assim, o alto valores alcançados pelo uso de MQL tradicional e MQL+CA é causado pela baixa taxa de remoção de cavacos dos poros do rebolo.

A adição de ar frio ao sistema MQL ajuda a melhorar o resfriamento da superfície de corte, reduzindo assim a perda evaporativa da camada de óleo de corte depositada na superfície contribuindo para uma melhoria na lubrificação durante operação, reduzindo a chance do fenômeno de seca fricção ocorrendo, causada pela ausência de fluido lubrificante na interface de corte.

Nesse sentido, prolongando presença da camada de óleo na superfície de corte ajuda a reduzir atrito no contato rebolo/peça, reduzindo a força tangencial. No entanto, quando este jato de ar frio é direcionado a superfície de corte do rebolo após o contato com a peça, a ferramenta se torna mais rígida, aumentando a força tangencial do CWCJ quando comparado ao WCJ. Mesmo assim, existe um grande potencial para limpeza de cortes junto com MQL como um substituto para o método de inundação, tanto pelos excelentes resultados apresentados, como também para sua maior sustentabilidade.

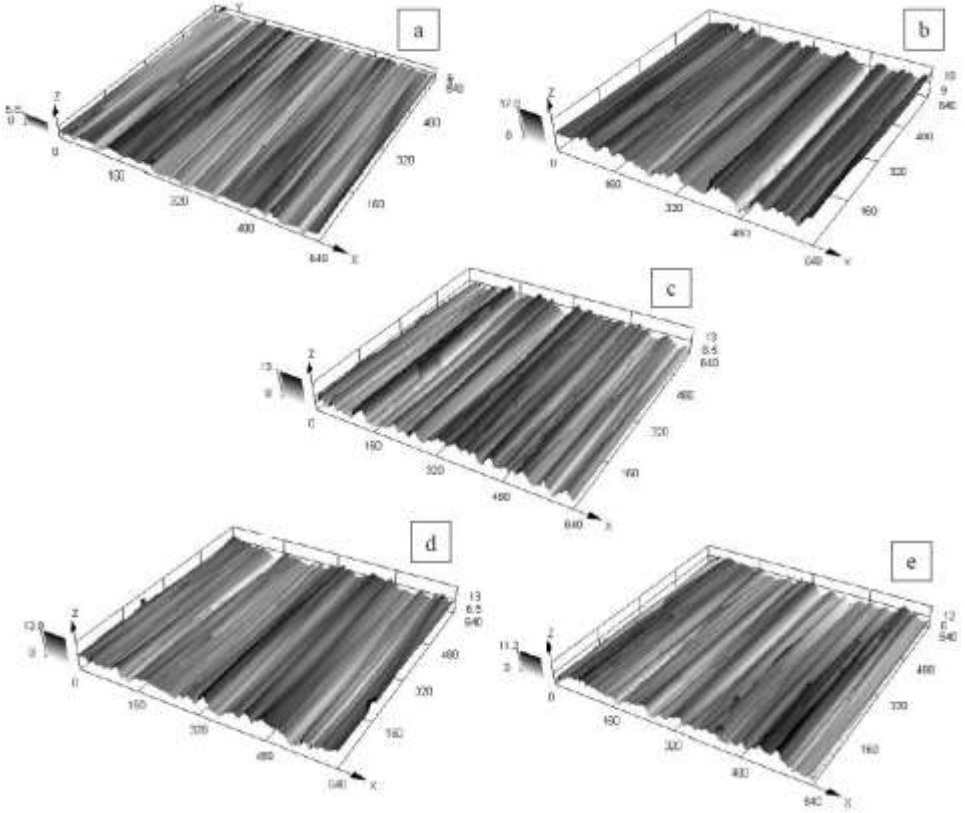
4.6 Microscopia confocal

Através da microscopia confocal, é possível visualizar melhor a topografia da peça usinada, permitindo uma melhor compreensão da influência da lubrificação da refrigeração métodos durante a usinagem do material.

Além do mais, a análise da superfície do material usando o confocal permite um aumento na confiança dos dados obtidos por a análise de alguns parâmetros de qualidade superficial, principalmente a rugosidade da superfície.

Na Figura 35, fica claro que a melhor superfície foi produzida aplicando a técnica de inundação, enquanto o tradicional MQL com óleo puro mostrou uma distorção mais significativa em a topografia analisada.

Figura 35 - Microscopia confocal da superfície da peça para: (a) método de inundação, (b) MQL, (c) MQL + CA, (d) MQL + WCJ e (e) MQL + CWCJ



Fonte: O autor (2021)

Este resultado já era esperado desde as melhores capacidades de lubrificação e refrigeração do método de inundação contribui para uma redução drástica no fenômeno de entupimento, juntamente com a menor ocorrência de deformação

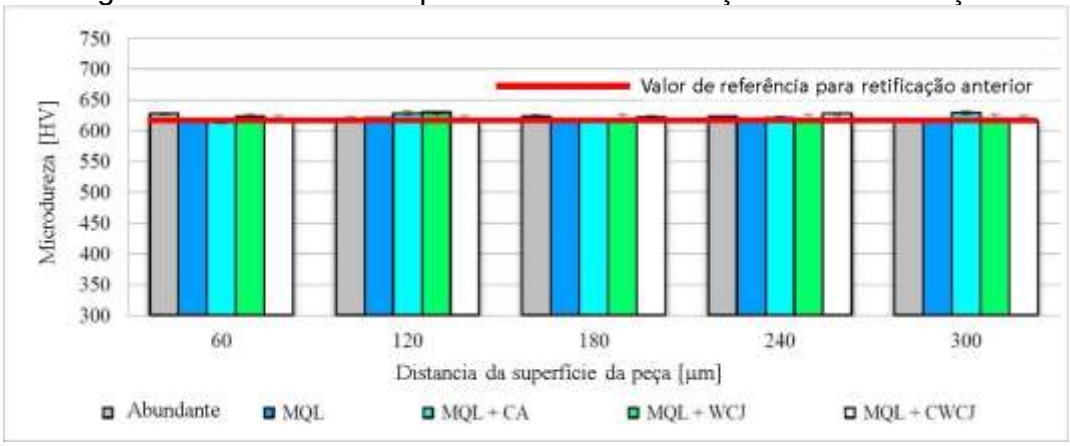
plástica(DA SILVA et al., 2020), foi possível verificar que as imagens superficiais das peças obtidas por microscopia confocal mostrou a mesma tendência da superfície parâmetros de rugosidade Ra e Rz.

4.7 Microdureza

Na linha de produção, a retificação é geralmente a última no processo ao qual a peça é submetida, sendo responsável por dar o acabamento final ao produto. Assim, ao atingir este estágio, a peça de trabalho já foi submetida aos tratamentos térmicos necessários e já tem as propriedades mecânicas e microestruturais necessárias para poder desempenhar suas funções no futuro (LOPES et al., 2019). Nesse sentido, a ocorrência de alguma alteração em suas propriedades, causadas pelas condições extremas e temperaturas atingidas durante a operação de retificação, podendo comprometer totalmente o desempenho e a funcionalidade da versão final deste produto, sendo necessário descartar a peça com todo o custo adicional das etapas de fabricação anterior (BIANCHI et al., 2018b).

A Figura 36 mostra os dados obtidos sobre o microdureza na superfície do material. Através da análise desses valores, é possível identificar a ocorrência ou não de mudanças microestruturais, como o endurecimento do material, possivelmente causado pela alta temperatura da superfície de corte.

Figura 36 - Microdureza para diferentes condições de lubrificação



Fonte: o autor (2021)

O valor de referência usado para a peça de trabalho era de aproximadamente 615 HV, e foi extraído do teste de microdureza antes da operação de retificação. Tanto

os maiores e os menores valores foram observados após a retificação com MQL + WCJ, atingindo um pico de 630 HV a 120 μm da superfície da peça, logo após atingir 614 HV em 180 μm da superfície.

O valor mais alto mostra um aumento de 2,4% em relação ao valor de referência, enquanto uma redução de 0,2% pode ser observada para o valor mais baixo. Assim, concluiu-se que a diferença máxima na microdureza alcançado de um teste para o outro entre todos os métodos foi 2,6%, indicando que nenhuma mudança microestrutural foi encontrada em qualquer um dos métodos analisados neste trabalho.

5 CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas na aplicação da nova técnica de lubrirrefrigeração MQL + CWCJ, quando em comparação com os outros sistemas promissores (MQL + WCJ e MQL + CA) e dominante (inundação e MQL), na retificação do aço AISI 4340 com rebolos de óxido de alumínio (Al2O3), concluiu-se que: O método MQL + CWCJ mostrou-se muito satisfatório e bons resultados em todas as variáveis de saída analisadas, dado a sua excelente atuação com a limpeza refrigerada do rebolo combinado com o baixo consumo de fluido de corte (MQL), que proporcionou menores custos de armazenamento, compra, e descarte de fluidos. Portanto, garantiu um uso desta técnica sem resíduos e contaminação durante e no final do processo de retificação. Mesmo assim, este método alcançou os melhores resultados nos testes e razão G para desgaste diametral.

O método convencional abundante, também apresentou excelentes resultados em todas as variáveis de saídas analisadas, sendo o mais eficiente nos demais parâmetros analisados. No entanto, isso foi possível devido à abundância de fluido usado que causa vários problemas, como aumento custos de produção, o risco para a saúde do operador, e possível dano ambiental, considerando a forma de descarte. Como resultado, este método perde muito valor agregado nas indústrias de inovação de hoje.

As técnicas de MQL + CA e MQL + WCJ obtiveram resultados intermediários nos parâmetros avaliados, permanecendo sempre à frente do MQL tradicional. Apesar disso, menor a complexidade a ser introduzida no processo quando comparado com MQL + CWCJ torna-os excelentes alternativas na busca pela união da sustentabilidade, simplicidade e eficiência.

Por outro lado, todas as técnicas testadas não apresentaram dano térmico e variações indesejáveis na estrutura das peças, considerando os testes de microdureza, microscopia óptica do rebolo, microscopia confocal e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Portanto, todas as técnicas podem ser aplicadas à retificação de aço AISI 4340 usando um rebolo de óxido de alumínio.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

1- Ensaio com mesmos parâmetros de corte para avaliação do acabamento superficial do aço AISI 8620 temperado que é muito usado na construção das colunas dos moldes de injeção plástica.
2- Ensaios com os mesmos parâmetros de corte para o aço AISI 8640 temperado que compõe partes internas do molde de injeção plástica.
3- Retificação com outros rebolos para os aços SAE D-2, D-6 para composição de matrizes de punção em moldes de estampagem por corte e repuxo de componentes cilíndricos ou prismáticos.

6 Bibliografia

AHLBORN, B. K.; GORDON, J. M. The vortex tube as a classic thermodynamic refrigeration cycle. **Journal of Applied Physics**, v. 88, n. 6, p. 3645–3653, 2000.
AHN, J. H. et al. **Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission**. [s.l: s.n.].

AHRENS, M. et al. An Active Damping Method for Chatter Vibration in Plunge Grinding Using Electromagnetic Actuators. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 197–200, 2016.

ALBERDI, R. et al. Strategies for optimal use of fluids in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 6, p. 491–499, jun. 2011.

ALVES, M. C. S. I. ; BIANCHI, E. C. I. ;; AGUIAR, P. R. I. Influência da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados. p. 636–642, 2008.
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, 2008a.

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, 11 ago. 2008b.

BALMER, R. T. Pressure-driven ranque-hilsch temperature separation in liquids. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, v. 110, n. 2, p. 161–164, 1988.

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, 2010a.

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, nov. 2010b.

BEHERA, B. C.; GHOSH, S.; RAO, P. V. Modeling of cutting force in MQL machining environment considering chip tool contact friction. **Tribology International**, v. 117, 2018.

BEN FATHALLAH, B. et al. Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 3–4, p. 261–272, 2009.

BIANCHI, EDUARDO CARLOSOLIVEIRA, 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, dez. 2012.

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, 2018a.

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, 2018b.

BIANCHI, E. C. et al. Application of the auxiliary wheel cleaning jet in the plunge cylindrical grinding with Minimum Quantity Lubrication technique under various flow rates. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 233, n. 4, p. 1144–1156, 1 mar. 2019.

BIGERELLE, M.; HAGEGE, B.; EL MANSORI, M. Mechanical modelling of micro-scale abrasion in superfinish belt grinding. **Tribology International**, v. 41, n. 11, p. 992–1001, nov. 2008.

BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. [s.d.].

DA SILVA, A. E. et al. Behavior of austempered ductile iron (ADI) grinding using different MQL dilutions and CBN wheels with low and high friability. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 11–12, p. 4373–4387, 2020.

DE MELLO BELENTANI, R. et al. Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 88–96, jan. 2014.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. **Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A reviewJournal of Cleaner Production**Elsevier Ltd, , 15 nov. 2014.

DOS ANJOS, M. A. et al. Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, por meio de diferentes métodos de lubrirrefrigeração. **Revista Materia**, v. 21, n. 1, p. 169–184, 2016a.

DOS ANJOS, M. A. et al. Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, por meio de diferentes métodos de lubrirrefrigeração. **Revista Materia**, v. 21, n. 1, p. 169–184, 1 jan. 2016b.
EAST, F.; HOWES, T. F ,,?, m. v. 40, p. 623–630, 1991.

EIAMSA-ARD, S.; PROMVONGE, P. Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 7, p. 1822–1842, 2008.
GUO, C. et al. Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated CBN Wheels. v. 1, n. 3, p. 3–6, 2007.

GUSTAVO, L.; BRASIL, G. U. Alternativa tecnológica para diminuir a abundância de fluidos de corte na retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos. **Revista GEPROS**, v. 0, n. 4, p. 127, 2010.

HOLESOVSKY, F.; HRALA, M. Integrity of ground cylindrical surface. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153–154, n. 1–3, p. 714–721, 10 nov. 2004.
JACKSON, M. J. et al. High-speed grinding with CBN grinding wheels - applications

and future technology. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 110, n. 1, p. 78–88, 2001.

KHETTABI, R. et al. Effect of MQL and dry processes on the particle emission and part quality during milling of aluminum alloys. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 5–8, 2017.

KLEIN, S. A.; SKYE, H. M.; NELLIS, G. F. Comparison of CFD analysis to empirical data in a commercial vortex tube. **International Journal of Refrigeration**, v. 29, n. 1, p. 71–80, 2006.

KUMAR, S. et al. **Assessment of Microhardness Profile in Grinding Using Barkhausen Noise Technique at Various Analysis ParametersISRN Materials Science**, 2011.

LEONESIO, M. et al. Force-field instability in surface grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 9–12, p. 1347–1360, 2014.

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, 1 jul. 2018.

LOPES, J. C. et al. Behavior of hardened steel grinding using MQL under cold air and MQL CBN wheel cleaning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 10, 2019.

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

MALKIN, S.; KOHLI, S.; GUO, C. Energy partition to the workpiece forgrinding with aluminum oxide and CBN abrasive wheels. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 117, n. 2, p. 160–168, 1995.

MARCHI, M. Monitoramento da queima da peça no processo de retificação plana baseado no estudo espectral do sinal de emissão acústica com implementação por hardware. p. 123, 2012.

MELLO, R. DE; FUNES, H.; CHINALI, R. Utilization of Minimum Quantity Lubrication (MQL) with Water in CBN Grinding of Steel. v. 17, n. 1, p. 88–96, 2014.

MOUSSA, T.; GARNIER, B.; PEERHOSSAINI, H. Temperature measurement of flat glass edge during grinding and effect of wheel and workpiece speeds. **Measurement Science and Technology**, v. 28, n. 6, 2017.

NADOLNY, K. The effect upon grinding fl uid demand and workpiece quality when an innovative zonal centrifugal provision method is implemented in the surface grinding of steel CrV12. v. 113, p. 960–972, 2016.

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, 2013a.

PUERTO, P. et al. **Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear**. Procedia Engineering. **Anais**...Elsevier Ltd, 2013b

RABIEI, F. et al. Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization. p. 1–14, 2014.

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, 1 jan. 2015.

RAMESH, K.; HAN, H. **The Effects of Grinding Wheel Speed on Burr Creation and Surface Quality**. [s.l: s.n.].

RASIM, M.; MATTFELD, P.; KLOCKE, F. Analysis of the grain shape influence on the chip formation in grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 226, p. 60–68, 25 jul. 2015.

SADEGHI, M. H. et al. Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti – 6Al – 4V titanium alloy. p. 487–500, 2009a.

SADEGHI, M. H. et al. Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 44, n. 5–6, p. 487–500, set. 2009b.

SALONITIS, K.; KOLIOS, A. Experimental and numerical study of grind-hardening-induced residual stresses on AISI 1045 Steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 79, n. 9–12, p. 1443–1452, 27 ago. 2015.

SANCHES, P. et al. **Revista Brasileira de Design da Informação / Brazilian Journal of Information Design São Paulo | v. 14 | n**. [s.l: s.n.].

SANCHEZ, J. A. et al. Machining evaluation of a hybrid MQL-CO2 grinding technology. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 18, p. 1840–1849, dez. 2010.

SATO, B. K. et al. Influence of water in the MQL technique in the grinding of steel AISI 4340 using CBN wheels. **Revista Escola de Minas**, v. 71, n. 3, p. 391–396, 1 jul. 2018.

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.

SECCHIAROLI, A. et al. Numerical simulation of turbulent flow in a Ranque-Hilsch vortex tube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, n. 23–24, p. 5496–5511, 2009.

SHAJI, S.; RADHAKRISHNAN, V. Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method. **Journal of Materials**

Processing Technology, v. 141, n. 1, p. 51–59, 2003.

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. **Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluidsInternational Journal of Machine Tools and Manufacture**Elsevier Ltd, , 2012a.

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, 2012b.

SOKOVIĆ, M.; MIJANOVIĆ, K. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 109, n. 1–2, p. 181–189, 2001.

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 SPEC. ISS., p. 734–739, 2007.

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

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, 20 jul. 2016.

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

WINTER, M. et al. Determining optimal process parameters to increase the eco-efficiency of grinding processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 644–654, 2014a.

WINTER, M. et al. Determining optimal process parameters to increase the eco-efficiency of grinding processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 644–654, 1 mar. 2014b.

ZHOU, N.; LIN, R.; PETTERSSON, R. Journal of Materials Processing Technology Surface integrity of 2304 duplex stainless steel after different grinding operations. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 229, p. 294–304, 2016.

ZHOU, N.; PENG, R. L.; PETTERSSON, R. Surface integrity of 2304 duplex stainless steel after different grinding operations. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 229, p. 294–304, 1 mar. 2016.